

ANALISIS SEISMISITAS MALUKU DAN BARAT PAPUA BERDASARKAN DISTRIBUSI FREKUENSI-MAGNITUDO GEMPA

^{1*)} Putri Melani, ^{2*)}Arie Realita, ^{3*)}Tjipto Prastowo

^{1*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: putri.20041@mhs.unesa.ac.id

^{2*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

^{3*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

Abstrak

Pengurangan risiko bencana seismik di Maluku dan barat Papua dilakukan melalui studi seismisitas dengan analisis parameter a -value dan b -value. Nilai a merefleksikan level seismisitas wilayah dan nilai b menunjukkan level stres struktur batuan bawah permukaan. Perhitungan parameter a dan b maupun M_c dilakukan dengan membagi *study area* menjadi tiga zona seismik. Penelitian ini menerapkan hukum Gutenberg-Richter dengan pendekatan *maximum likelihood* terhadap kejadian gempa dari katalog ISC-GEM tahun 1970-2023 untuk kejadian gempa $3,0 \leq M_w \leq 8,0$ serta kedalaman sumber dangkal (*shallow sources*) dan relatif dalam (*intermediate sources*). Hasil ukur $b \approx 0,6-0,8$ menunjukkan struktur batuan bawah permukaan Maluku dan barat Papua mengalami stres tektonik relatif tinggi. Melalui hasil ukur ketiga parameter seismik (M_c , b dan a), diketahui bahwa seismisitas wilayah utara Maluku dipengaruhi oleh sumber relatif dalam sedangkan wilayah selatan Maluku dan barat Papua dipengaruhi oleh sumber dangkal. Seismisitas sumber relatif dalam di barat Papua (Zona 3) adalah yang terendah dibandingkan dua zona lain (Zona 1 dan Zona 2) pada kedalaman yang sama atau lebih dangkal. Analisis variasi spasial b menunjukkan gempa kuat dengan kedalaman tertentu (*shallow* atau *intermediate*) ditemukan di area dengan nilai b rendah. Distribusi frekuensi kejadian gempa di wilayah Maluku dan barat Papua menunjukkan dominasi gempa dangkal (< 70 km) sebagai akibat dari struktur area dekat permukaan yang cenderung labil.

Kata Kunci: seismisitas, Maluku, barat Papua, Gutenberg-Richter, nilai a , nilai b

Abstract

Seismic risk reduction in Maluku and western Papua can be carried out using seismicity studies and analysis of parameters a -value and b -value. The a -value reflects seismicity level and the b -value indicates the level of tectonic stress of subsurface structures. The calculations of a -value, b -value and M_c were performed by dividing study area into three seismic zones. This study applied the Gutenberg-Richter law using the maximum likelihood approach to earthquakes from the ISC-GEM catalog for 1970-2023 events having magnitudes $3.0 \leq M_w \leq 8.0$ from shallow and intermediate sources. The result of $b \approx 0.6-0.8$ showed that the subsurface structures of Maluku and western Papua experienced relatively high tectonic stress. Through the measurements of M_c , b dan a , it can be inferred that seismicity in the northern Maluku was influenced by relatively deep sources while the southern Maluku and the western Papua were affected by shallow sources. The seismicity of relatively deep sources in western Papua (Zone 3) is the lowest compared to the other two (Zones 1 and 2) at the same depth or shallower. Analysis of b -value spatial variation shows strong earthquakes of a particular depth (*shallow* or *intermediate*) found in regions of low lying b -values. The frequency distribution of tectonic earthquakes in the Maluku and western Papua shows the dominance of shallow earthquakes (< 70 km) as a result of the unstable structure located near the surface.

Keywords: seismicity, Maluku, west Papua, Gutenberg-Richter, a -value, b -value

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kompleksitas tatanan tektonik dan geologi Indonesia memicu kerentanan wilayah terhadap potensi bencana seismik (Cummins, 2017; Irsyam *et al.*, 2020; Hutchings and Mooney, 2021). Pergerakan Lempeng Indo-Australia ke arah utara menunjam Lempeng Eurasia (Irsyam dkk., 2017; Widiyantoro *et al.*, 2020) dan Lempeng Pasifik ke arah barat menekan wilayah teritorial Indonesia bagian timur, terutama Maluku dan Papua (Watkinson and Hall, 2017; Irsyam *et al.*, 2020) diakomodasi sebagai zona subduksi. Jalur zona subduksi yang terbentuk akibat pertemuan lempeng tersebut bisa memicu gempa tektonik dan pembangkitan gelombang tsunami apabila sumber gempa berada di dekat atau di bawah laut (Nugraha *et al.*, 2015; Nugraha *et al.*, 2018; Felix *et al.*, 2022).

Shodiq *et al.* (2015) melaporkan bahwa Maluku termasuk dalam wilayah dengan seismisitas tinggi yang memungkinkan gempa M_w 6 terjadi setiap tahun. Level seismisitas tinggi di Maluku karena aktivitas tektonik Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Filipina yang saling menekan memicu simpanan energi potensial seismik yang besar dalam bentuk stres tektonik. Bagian utara Pulau Seram adalah batas zona subduksi Lempeng Indo-Australia dan Eurasia (Wattimanela *et al.*, 2014). Maluku memiliki area konvergensi, yaitu *Molucca Sea Collision Zone* (MSCZ) (Wattimanela *et al.*, 2014) dengan tatanan tektonik unik kompleks, di mana Busur Halmahera berada di sebelah timur dan Busur Sangihe di sebelah barat yang saling bertumbukan (Nugraha *et al.*, 2017). Gempa tektonik di sepanjang Busur Halmahera pada November 2015 mengisyaratkan tingginya seismisitas kawasan tersebut (Gunawan *et al.*, 2016).

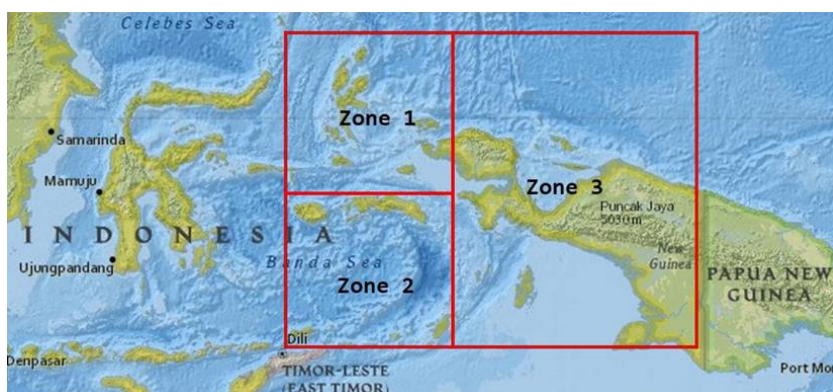
Selaras dengan Maluku, wilayah barat Papua (bukan Provinsi Papua Barat) merupakan daerah pertemuan Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Pasifik (Bock *et al.*, 2003). Pergerakan ketiga lempeng tersebut memicu kehadiran patahan atau sesar, yaitu kontak fisik antara dua blok batuan geologi bawah permukaan, di mana blok batuan bawah permukaan yang satu bisa bergeser secara mendatar, ke atas maupun ke bawah relatif terhadap blok batuan lain. Sebagai akibatnya, struktur geologi wilayah barat Papua banyak didominasi oleh patahan. Patahan tersebut bisa memicu gempa tektonik yang berpusat di daratan atau di laut dan tanah longsor (Sahara *et al.*, 2020). Posisi geografis wilayah Maluku dan barat Papua sebagai area penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta topografi kawasan dan batimetri laut Maluku dan barat Papua. Bagian utara Pulau Seram merupakan zona subduksi Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Struktur geologi barat Papua didominasi oleh patahan lokal. Kotak merah pada gambar sisipan menunjukkan posisi geografis wilayah Maluku dan barat Papua di antara kepulauan lain Indonesia timur (Gambar ini dibuat dengan bantuan ArcGIS 8.10 yang dapat diakses via ArcGIS Online dengan Basemaps <https://arcgis.com/home/group.html>).

Pengetahuan tentang level seismisitas wilayah Maluku dan barat Papua bisa dipelajari dari tiga parameter, yaitu: M_c (*magnitude of completeness*), a -value dan b -value. Selain ketiga parameter seismik tersebut, variasi spasial b -value juga bisa memberi gambaran stres tektonik yang dialami oleh batuan bawah permukaan suatu kawasan. Ketiga parameter seismik bersama dengan variasi spasial b -value ditentukan

dengan memanfaatkan data statistik gempa di wilayah Maluku dan barat Papua yang diperoleh dari katalog *International Seismological Centre-Global Earthquake Model* (ISC-GEM) antara 1970-2023 dengan bantuan aplikasi ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019). Penentuan ketiga parameter seismik dan variasi spasial b -value untuk wilayah Maluku dan barat Papua dilakukan dengan membagi kedua wilayah tersebut menjadi tiga zona seismik seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta zona seismik area penelitian: wilayah utara Maluku termasuk Pulau Halmahera (Zona 1), selatan Maluku termasuk Pulau Seram (Zona 2) dan barat Papua (Zona 3). Penentuan parameter seismik a -value dan b -value serta variasi spasial b -value dilakukan berdasarkan ketiga zona seismik tersebut (Gambar ini dibuat dengan bantuan <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>).

B. Hukum Gutenberg-Richter

Seismisitas suatu wilayah dapat diketahui melalui distribusi statistik FMD yang dapat dituliskan dalam bentuk Hukum Gutenberg-Richter (1944) sebagai berikut,

$$\log N(M) = a - bM \quad (1)$$

di mana N menyatakan jumlah kejadian gempa berkekuatan $M \geq M_c$ (*magnitude of completeness*) dalam kurun waktu tertentu. M_c didefinisikan sebagai nilai magnitudo terkecil di mana Hukum Gutenberg-Richter pada persamaan (1) masih berlaku valid. Dengan demikian, gempa berkekuatan $M < M_c$ tidak akan digunakan sebagai data penelitian (Woessner and Wiemer, 2005; Mignan, 2012; Mignan and Woessner, 2012). Parameter a dan b merupakan parameter seismik yang relevan dengan kerentanan wilayah terhadap potensi bencana seismik. Secara umum, arti fisis parameter a adalah level seismisitas suatu wilayah yang besarnya bergantung pada luas wilayah tersebut, panjang periode pengamatan, serta magnitudo terbesar (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sedangkan parameter b merupakan rasio gempa kecil terhadap gempa besar yang menunjukkan level stres batuan bawah permukaan (Godano *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017).

Pada penelitian ini, parameter a dan b dihitung dengan pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) dengan bantuan aplikasi ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019). Sebelum kedua parameter tersebut ditentukan, M_c ditentukan terlebih dahulu dengan akurasi estimasi M_c adalah penting karena estimasi M_c yang terlalu tinggi menyebabkan berkurangnya sampel data statistik gempa. Sebaliknya, jika estimasi M_c terlalu rendah akan menghasilkan parameter a dan b yang menyimpang jauh dari nilai sebenarnya (Mignan, 2012; Mignan and Woessner 2012). Estimasi M_c diperoleh melalui metode MAXC yang cocok dengan data gempa yang terkumpul (Woessner and Wiemer, 2005).

C. Pendekatan Maximum Likelihood

Pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) yang digunakan dalam penentuan a dan b adalah salah satu pendekatan perhitungan berdasarkan statistik probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Pendekatan ini tidak memperhitungkan *dependent variables* sehingga ketidakpastian perhitungan a dan b dapat direduksi sampai batas minimum yang menyebabkan level akurasi hasil akhir perhitungan untuk kedua parameter adalah tinggi (Nava *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

Pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) berbasis asumsi, yaitu statistik gempa terdistribusi eksponensial (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017) dengan estimasi b bisa diperoleh melalui persamaan Utsu (1966),

$$b = \frac{1}{\ln 10 [\bar{M} - (M_c - \Delta M/2)]} \quad (2)$$

dengan $\bar{M}$ adalah magnitudo rata-rata untuk gempa $M \geq M_c$ dan $\Delta M = 0,1$ disebut dengan *binning interval* (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Nilai $b < 1,0$ menunjukkan bahwa batuan geologi bawah permukaan memiliki stres yang tinggi dan sebaliknya untuk $b > 1,0$ maka akumulasi stress tektonik bawah permukaan masih relatif rendah (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sedangkan estimasi a didapatkan melalui

$$a = \log N + \log(b \ln 10) + M_c b \quad (3)$$

dengan akurasi perhitungan nilai a bergantung pada akurasi perhitungan nilai b dan M_c (Mignan and Woessner, 2012; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Data penelitian adalah data sekunder berupa kejadian gempa di wilayah Maluku dan barat Papua selama 1970-2023 dengan magnitudo $3,0 \leq M_w \leq 8,0$ dan kedalaman sumber dekat permukaan sampai 350 km di bawah permukaan yang didapatkan melalui katalog ISC-GEM (<http://www.isc.ac.uk/iscgem/>). Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan bantuan aplikasi ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) untuk menghasilkan estimasi M_c , b -value, a -value dan variasi spasial b -value dengan pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965). Untuk menjamin kemurnian data *mainshocks* digunakan metode penapisan Uhrhammer (1986) dan teknik MAXC untuk menjamin keakuratan M_c , b dan a (Woessner and Wiemer, 2005). Level seismisitas wilayah Maluku dan barat Papua diketahui dari penerapan hukum Gutenberg-Richter (1944) dan persamaan Utsu (1966).

B. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan 77.659 kejadian gempa (*raw data*) di wilayah Maluku dan barat Papua selama 1970-2023 dengan variasi kekuatan magnitudo $3,0 \leq M_w \leq 8,0$ dan kedalaman sumber gempa mencapai 350 km yang diunduh melalui katalog ISC-GEM. Data sekunder sebanyak itu dipilih berdasarkan kedalaman *shallow* (< 70 km) dan *intermediate* (70-350 km) *sources*. Gempa kurang dari $M_w 3,0$ tidak disertakan karena tidak bersifat merusak. Gempa dengan kedalaman lebih dari 350 km tidak disertakan karena umumnya tidak menyebabkan kerusakan serius pada objek di permukaan Bumi. Baik *shallow* maupun *intermediate sources* melibatkan gempa subduksi, gempa patahan kerak di daratan dan gempa latar. Kemudian, seluruh data *foreshocks* dan *aftershocks* dihapus dengan metode penapisan Uhrhammer (1986) untuk meningkatkan akurasi hasil perhitungan M_c , b -value dan a -value (Teng and Baker, 2019).

C. Teknik Pengolahan Data

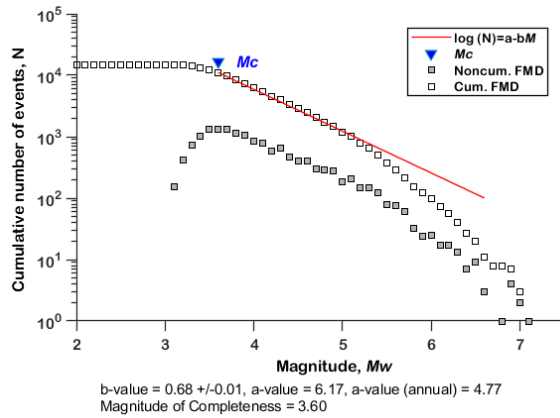
Pengolahan data dilakukan pada ketiga zona seismik, yaitu: (1) Zona utara Maluku, (2) Zona selatan Maluku, (3) Zona barat Papua (Gambar 1). Batas-batas wilayah Zona 1 adalah $2,90^\circ$ LU– $2,80^\circ$ LS dan $125,78^\circ$ – $131,84^\circ$ BT meliputi area utara Kepulauan Maluku termasuk Pulau Halmahera. Batas-batas wilayah Zona 2 adalah $2,80^\circ$ – $8,30^\circ$ LS dan $125,78^\circ$ – $131,84^\circ$ BT meliputi Pulau Buru, Ambon, Seram serta pulau-pulau kecil di sekitar selatan Kepulauan Maluku. Batas-batas wilayah Zona 3 adalah $2,90^\circ$ LU– $8,30^\circ$ LS dan $131,84^\circ$ – $140,80^\circ$ BT meliputi seluruh wilayah barat Papua serta Kepulauan Kai dan Kepulauan Aru. Seluruh *raw data* diunduh dan disimpan dalam format file.csv. Dengan bantuan *spreadsheet*, data gempa dikonversi menjadi M_w (*converted data*) menurut konversi Irsyam dkk. (2017). Data tersebut diolah kembali dengan bantuan ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019), untuk memperoleh *output* berupa kurva FMD (dengan estimasi M_c , b -value, a -value), variasi spasial b -value dan histogram variasi kedalaman sumber gempa.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

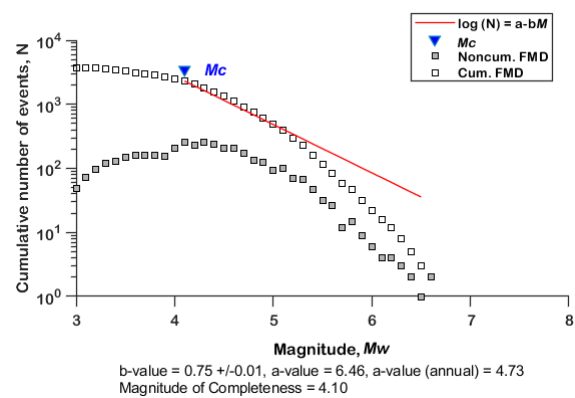
Hasil-hasil penelitian ini dibahas sesuai urutan produk gambar yang dihasilkan oleh ZMAP7.0, yaitu (1) kurva FMD; (2) variasi spasial b -value dan (3) histogram kedalaman sumber gempa. Masing-masing produk gambar tersebut dibuat berdasarkan zona seismik, yaitu Zona 1 (wilayah utara Maluku), Zona 2 (wilayah selatan Maluku) dan Zona 3 (wilayah barat Papua). Analisis kurva FMD bisa memberikan gambaran level seismisitas dan stres batuan bawah permukaan. Variasi spasial b -value memberikan gambaran potensi bencana gempa sedangkan histogram kedalaman sumber memberikan gambaran lokasi terbesar gempa.

A. Kurva FMD

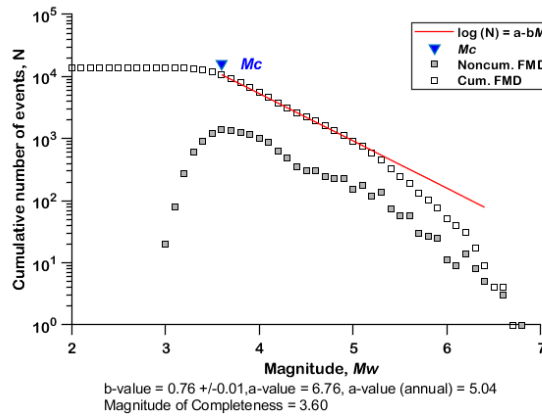
Setelah homogenisasi magnitudo dengan konversi magnitudo Irsyam dkk. (2017), pemurnian data dilakukan dengan filter Uhrhammer (1986) menghasilkan *mainshocks* (dan *background*). Langkah berikutnya adalah menghitung M_c , b dan a -values dengan ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) yang menghasilkan kurva FMD. Gambar 3 memberikan kurva FMD berisi hasil perhitungan a -value yang mendiskripsikan seismisitas *study area* (Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) dan b -value yang menunjukkan stres batuan bawah permukaan *study area* (Scholz, 2015). Selain itu, kurva FMD juga berisi hasil perhitungan M_c untuk setiap kategori kedalaman sumber sebagai akibat dari perbedaan karakteristik data gempa dan a (*annual*) yang memberikan level seismisitas per tahun selama kurun waktu 1970-2023.



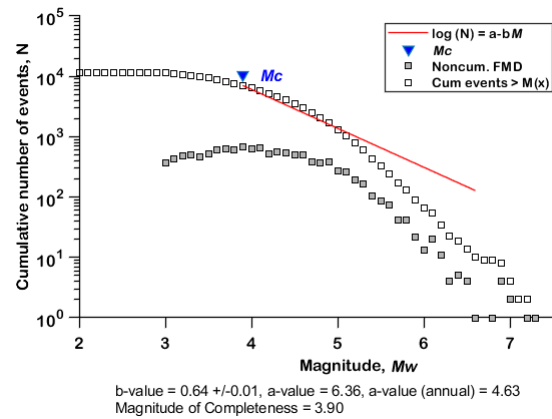
(a)



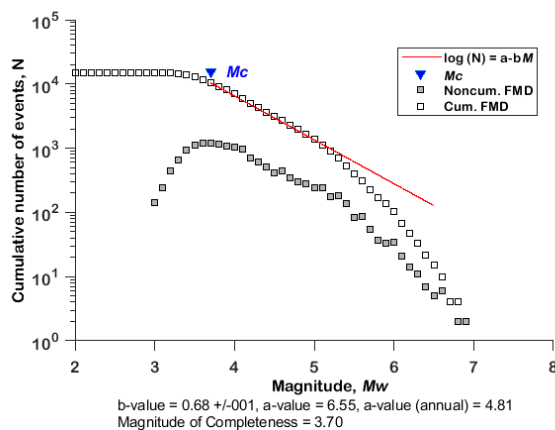
(b)



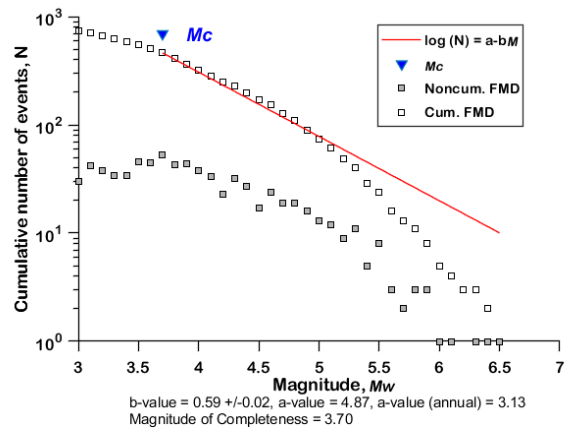
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 3. Plot kurva FMD berisi estimasi M_c , b -value, a -value dan a (annual) untuk (a) Zona 1: *shallow sources*; (b) Zona 1: *intermediate sources*; (c) Zona 2: *shallow sources*; (d) Zona 2: *intermediate sources*; (e) Zona 3: *shallow sources*; dan (f) Zona 3: *intermediate sources* dengan merujuk pada kedalaman 0-70 km sebagai *shallow sources* dan kedalaman 70-350 km sebagai *intermediate sources* (Hutchings and Mooney, 2021).

Untuk memudahkan analisis kurva FMD, berikut ini adalah tabulasi jumlah data dan hasil perhitungan parameter seismik pada ketiga zona seismik seperti ditunjukkan oleh Tabel 1 sampai Tabel 6. *Raw data* adalah jumlah data yang diunduh langsung dari ISC-GEM. *Converted data* adalah jumlah data sesudah proses homogenisasi. *Filtered data* adalah jumlah data sesudah penerapan filter Uhrhammer (1986).

Tabel 1. Distribusi data gempa pada Zona 1 (wilayah utara Maluku).

No	Type Data	Zona Seismik 1	
		<i>shallow sources</i>	<i>intermediate sources</i>
1	<i>Raw Data</i>	21670	4083
2	<i>Converted Data</i>	21602	2985
3	<i>Filtered Data</i>	14717	3761

Tabel 2. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 1 (wilayah utara Maluku).

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,60	0,68	6,17
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-350 km)	4,10	0,75	6,46

Tabel 3. Distribusi data gempa pada Zona 2 (wilayah selatan Maluku).

No	Type Data	Zona Seismik 2	
		<i>shallow sources</i>	<i>intermediate sources</i>
1	<i>Raw Data</i>	15608	14581
2	<i>Converted Data</i>	15603	13976
3	<i>Filtered Data</i>	13842	11661

Tabel 4. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 2 (wilayah selatan Maluku).

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,60	0,76	6,76
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-350 km)	3,90	0,64	6,36

Tabel 5. Distribusi data gempa pada Zona 3 (wilayah barat Papua).

No	Type Data	Zona Seismik 3	
		<i>shallow sources</i>	<i>intermediate sources</i>
1	<i>Raw Data</i>	20930	787

No	Type Data	Zona Seismik 3	
		<i>shallow sources</i>	<i>intermediate sources</i>
2	<i>Converted Data</i>	20501	748
3	<i>Filtered Data</i>	15164	731

Tabel 6. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 3 (wilayah barat Papua).

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources (0-70 km)</i>	3,70	0,68	6,55
2	<i>Intermediate Sources (70-350 km)</i>	3,70	0,59	4,87

Tabel 1–6 memberikan nilai $b \approx 0,6$ – $0,8$ untuk ketiga zona seismik baik kategori *shallow sources* maupun *intermediate sources*. Rentang nilai b tersebut lebih kecil dari nilai normal $b = 1$ (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014) yang berlaku untuk pemerataan nilai b untuk rentang wilayah spasial yang sangat luas. Nilai $b < 1$ (relatif rendah) itu menunjukkan struktur batuan bawah permukaan Maluku dan barat Papua mengalami stres tektonik relatif tinggi (Scholz, 2015; Yeken, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui 2020). Hal ini dapat dipahami karena wilayah Maluku dan barat Papua berada pada daerah konvergensi (pertemuan) Lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik dan mikro Philipina (Bock *et al.*, 2003; Widiwijayanti *et al.*, 2004; Watkinson and Hall, 2017; Irsyam *et al.*, 2020).

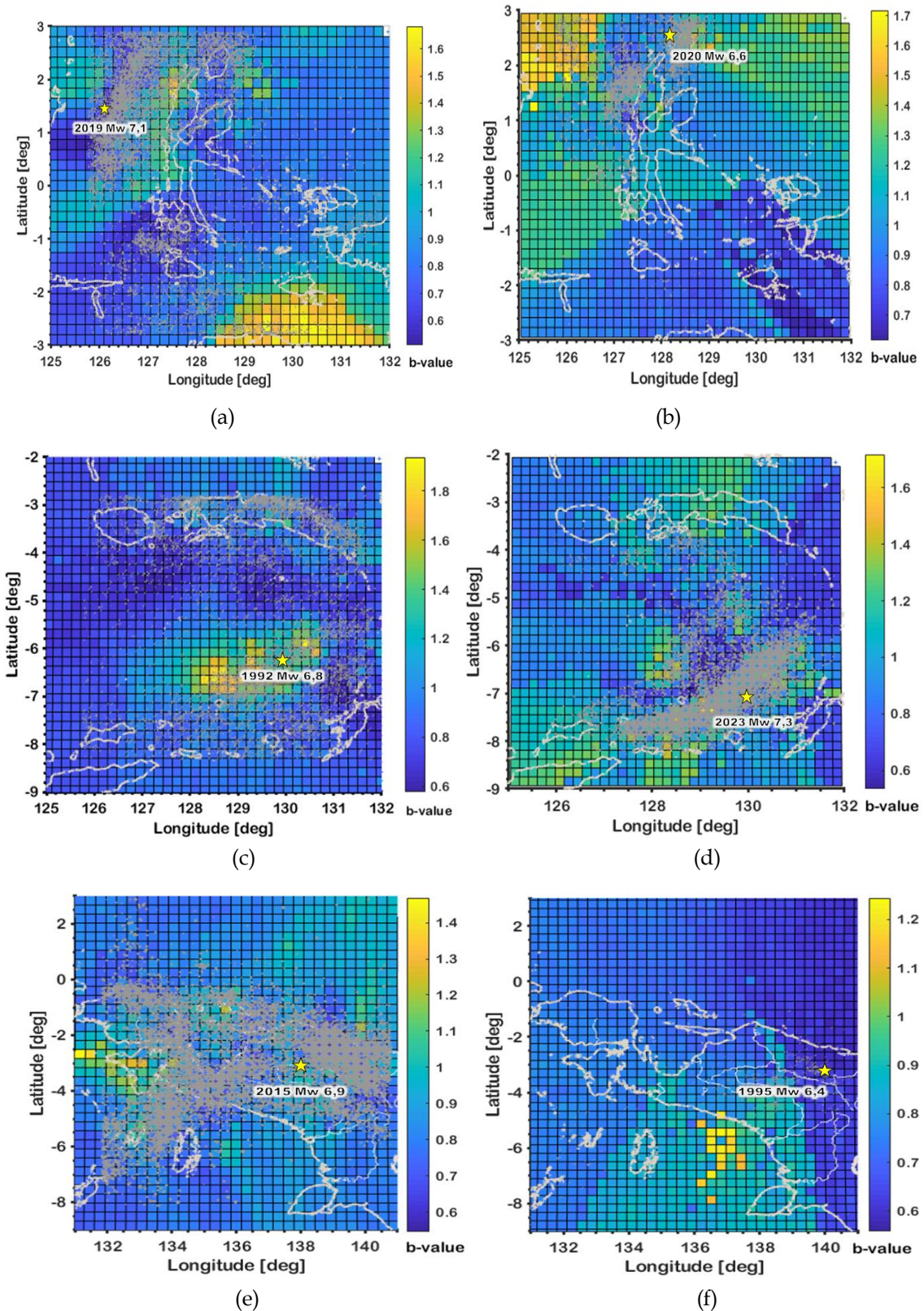
Level seismisitas untuk ketiga zona seismik dapat dilihat dari nilai a atau a (*annual*). Dengan mempertimbangkan ketidakpastian ukur $b = \pm 0,02$ yang diambil dari Gambar 3(f) dan mempertimbangkan hasil ukur a ditentukan oleh ketidakpastian nilai b (seperti terlihat pada persamaan (3)), sedangkan hasil ukur nilai b ditentukan oleh ketidakpastian M_c (seperti terlihat pada persamaan (2)), maka wajar jika estimasi ketidakpastian hasil ukur $a = \pm 0,06$ (estimasi terbesar). Berdasarkan ketidakpastian hasil ukur a tersebut, maka seismisitas wilayah utara Maluku lebih dipengaruhi oleh sumber relatif dalam (*intermediate sources*) sedangkan seismisitas wilayah selatan Maluku dan barat Papua lebih dipengaruhi oleh sumber dangkal (*shallow sources*).

Seismisitas sumber relatif dalam pada Zona 3 ditemukan paling rendah dibandingkan dengan seismisitas dengan kedalaman yang sama atau lebih dangkal pada kedua zona yang lain. Hal ini berarti kejadian gempa dengan lokasi episenter lebih dalam dari 70 km relatif jarang terjadi pada Zona 3. Namun frekuensi gempa relatif rendah tersebut memberikan jeda waktu antar kejadian gempa relatif lama, sehingga memicu stress tinggi pada struktur batuan bawah permukaan Zona 3, khususnya pada kedalaman *intermediate*. Untuk mengetahui lebih detil terkait area mana yang berpotensi mengalami bencana gempa besar, maka diperlukan kajian distribusi spasial b -value.

B. Variasi Spasial b -value

Peta variasi spasial b -value dibuat dengan ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) untuk ketiga zona seismik sebagai dasar penilaian potensi bencana seismik (Scholz 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui 2020). Syarat minimal 200 kejadian telah dipenuhi untuk menjamin resolusi peta kontur sekaligus kualitas akurasi prediksi kerentanan wilayah (Woessner and Wiemer, 2005). Gambar 4 menunjukkan variasi spasial b -value wilayah utara Maluku (Gambar 4a dan 4b), selatan Maluku (Gambar 4c dan 4d) dan barat Papua (Gambar 4e dan 4f).

Tanda bintang berwarna kuning pada Gambar 4 menunjukkan episenter gempa relatif besar. Pada Gambar 4(a), gempa M_w 7,1 berlokasi di area b rendah (kontur warna biru tua) dengan kedalaman dangkal pada tahun 2019 tercatat sebagai gempa tektonik yang memicu tsunami kecil (Heidarzadeh *et al.*, 2021). Gempa ini terjadi pada area konvergensi MSCZ yang dibentuk oleh tatanan tektonik kompleks antara Busur Halmahera di sebelah timur dan Busur Sangihe di sebelah barat yang saling bertumbukan (Nugraha *et al.*, 2017). Pada zona yang sama, gempa M_w 6,6 berpusat pada kedalaman *intermediate* satu tahun berikutnya, yaitu pada tahun 2020 terjadi pada area b rendah (Gambar 4b).



Gambar 4. Peta variasi spasial b -value untuk (a) Zona 1: *shallow sources*; (b) Zona 1: *intermediate sources*; (c) Zona 2: *shallow sources*; (d) Zona 2: *intermediate sources*; (e) Zona 3: *shallow sources*; dan (f) Zona 3: *intermediate sources* dengan merujuk pada rentang kedalaman 0-70 km sebagai *shallow sources* dan rentang kedalaman 70-350 km sebagai *intermediate sources* (Hutchings and Mooney, 2021; Zhang *et al.*, 2021).

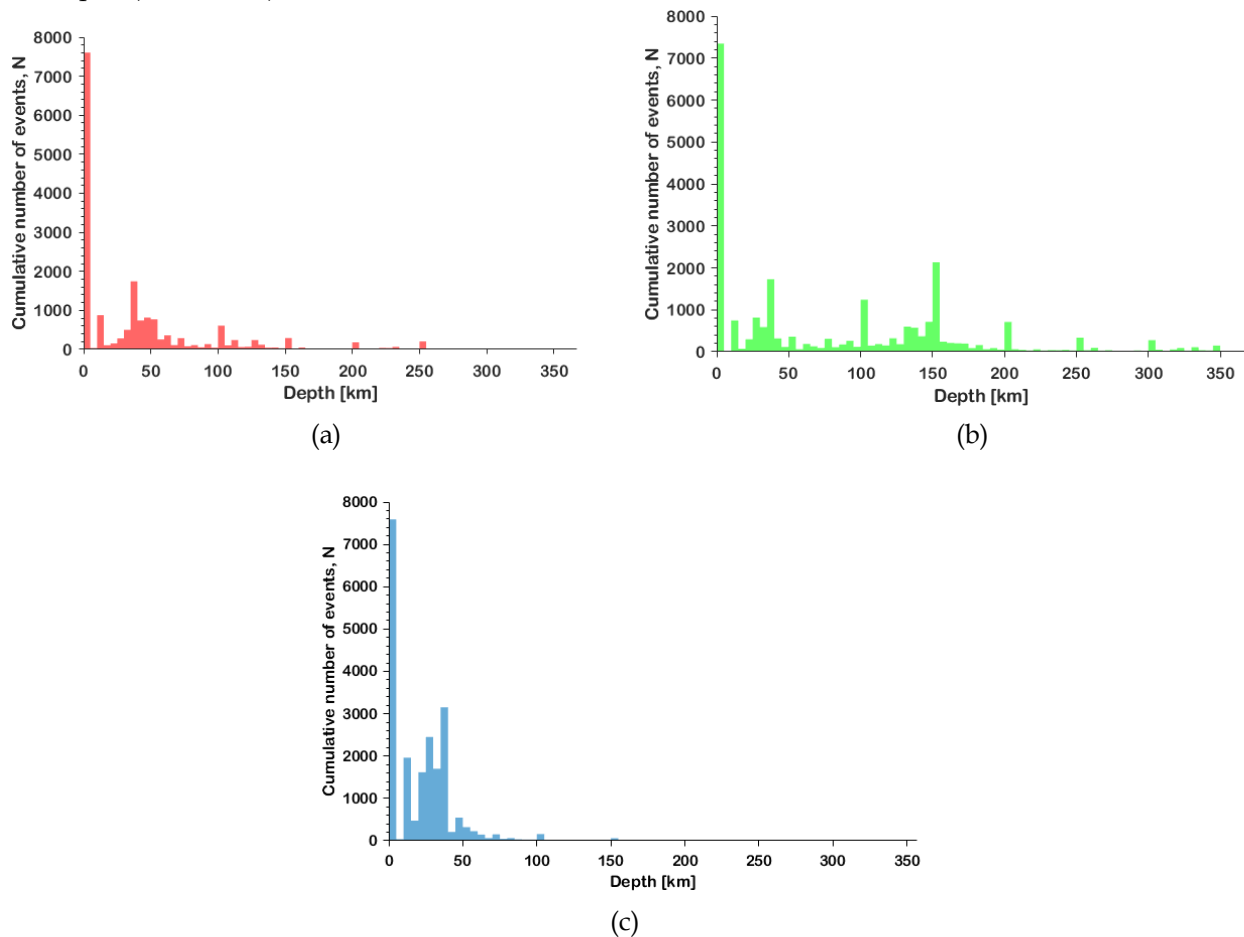
Gempa dangkal dengan M_w 6,8 pada Zona 2 terjadi tahun 1992 (Gambar 4c) di area dengan b relatif lebih tinggi. Gempa kuat M_w 7,3 pada tahun 2023 terjadi pada zona yang sama namun berpusat di

kedalaman *intermediate* di Laut Banda (Gambar 4d), Gempa kuat ini akibat aktivitas busur subduksi di wilayah tersebut (Hutchings and Mooney, 2021). Banyak kejadian gempa kuat di wilayah perairan Laut Banda didominasi oleh gempa dengan kedalaman *intermediate* sampai *deep sources* (Hutchings and Mooney, 2021). Pada tahun 1995 dan 2015, gempa dengan $M_w \geq 6,0$ terjadi di Zona 3 akibat aktivitas patahan aktif di wilayah barat Papua (Hutchings and Mooney, 2021). Kedua gempa berpusat di area dengan b relatif rendah dengan level stres batuan bawah permukaan yang relatif tinggi.

Secara keseluruhan, Gambar 4 menunjukkan distribusi variasi spasial b pada masing-masing zona seismik, di mana gempa kuat biasa ditemukan pada kedalaman tertentu (bisa dangkal bisa pula *intermediate*) di area dengan b rendah yang ditandai oleh kontur warna biru gelap/biru terang. Hal tersebut menunjukkan pentingnya peran peta variasi spasial b -value dalam menentukan area mana yang berpotensi mengalami bencana seismik.

C. Histogram Kedalaman Sumber

Histogram kedalaman sumber gempa diperlukan untuk memetakan distribusi frekuensi kejadian gempa berbasis variasi kedalaman sumber. Dalam penelitian ini, histogram kedalaman sumber dibuat dengan ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019). Gambar 5 di bawah ini menunjukkan distribusi kedalaman sumber gempa untuk wilayah utara Maluku (Gambar 5a), wilayah selatan Maluku (Gambar 5b) dan wilayah barat Papua (Gambar 5c).



Gambar 5. Histogram kedalaman sumber terhadap jumlah kejadian gempa N untuk (a) Zona 1; (b) Zona 2; dan (c) Zona 3.

Tiga histogram kedalaman sumber pada Gambar 5 jelas menunjukkan *shallow events* dengan kedalaman kurang dari 70 km mendominasi masing-masing zona seismik. Hal ini diperkuat temuan terkini (Hutchings and Mooney, 2021) yang melaporkan bahwa gempa dangkal mendominasi (~80%) kejadian gempa tektonik di Indonesia. Dominasi gempa dangkal pada wilayah Maluku dan barat Papua terjadi karena struktur area bawah permukaan (tapi dekat permukaan) yang dikenal sebagai *shallow seismogenic areas* cenderung labil dan berpotensi memicu gempa (Bilek and Lay, 2018). Gambar 5 sekaligus menceritakan bahwa gempa

tektonik dengan kedalaman *intermediate* jarang terjadi di wilayah Maluku dan barat Papua dibandingkan dengan gempa dangkal sebagaimana temuan terdahulu untuk wilayah Indonesia (Hutchings and Mooney, 2021) dan juga untuk belahan Bumi yang lain (Houston, 2015).

IV. KESIMPULAN

Seismisitas dan stres batuan bawah permukaan Maluku dan barat Papua dipelajari melalui analisis parameter seismik *a*-value dan *b*-value sebagai hasil hitung dari kurva FMD gempa yang dihasilkan oleh ZMAP7.0 dengan pendekatan *maximum likelihood*. Hasil hitung $b \approx 0,6-0,8$ pada ketiga zona seismik untuk kategori *shallow sources* maupun *intermediate sources* menunjukkan rentang nilai *b* yang lebih kecil daripada nilai normal $b = 1$ (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014). Hal ini menunjukkan struktur batuan bawah permukaan Maluku dan barat Papua mengalami stres tektonik relatif tinggi (Scholz, 2015; Yeken, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui 2020). Level seismisitas Maluku dan barat Papua dapat dilihat dari hasil ukur nilai *a* atau *a* (*annual*) yang menunjukkan bahwa seismisitas wilayah utara Maluku (Zona 1) lebih dipengaruhi oleh sumber relatif dalam sedangkan seismisitas wilayah selatan Maluku (Zona 2) dan barat Papua (Zona 3) dipengaruhi oleh sumber dangkal. Seismisitas rendah ditemukan di Zona 3 dengan sumber relatif dalam. Melalui analisis variasi spasial *b*-value, gempa kuat ditemukan pada kedalaman dangkal dan relatif dalam di daerah dengan nilai *b* rendah.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan terimakasih kepada pihak pengelola laman ArcGIS Online dengan Basemaps (<https://arcgis.com/home/group.html>) dan (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>) untuk proses pembuatan gambar area penelitian. Ucapan terimakasih kepada pihak ISC-GEM yang telah mengelola ketersediaan data sekunder penelitian ini yang diakses secara bebas melalui <http://www.isc.ac.uk/iscgem/>. Terimakasih juga ditujukan kepada dua *reviewers* sekaligus dosen penguji yang telah memberikan penilaian dan masukan bermanfaat terhadap artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K. 1965. Maximum likelihood estimate of *b* in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of Earthquake Research*, Vol. 43, pp.237-239.
- Amaro-Mellado, J. L. and Bui, D. T. 2020. GIS-Based mapping of seismic parameters for the Pyrenees. *International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, Issue 7.
- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A. and Martínez-Álvarez, F. 2017. Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system. *Central European Journal of Operations Research*, Vol. 26, Issue 3, pp. 739-758.
- Bilek, S. L. and Lay, T. 2018. Subduction zone megathrust earthquakes. *Geosphere*, Vol. 14, No. 4, pp. 1488-1500.
- Bock, Y., Prawirodirjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., Mc Caffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S. S. O. and Callais, E. 2003. Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 108, Issue B8.
- Cummins, P. R. 2017. Geohazards in Indonesia: earth science for disaster risk reduction-introduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, pp. 1-7.
- Felix, R. P., Hubbard, J. A., Bradley, K. E., Lythgoe, K. H., Li, L. and Switzer, A. D. 2022. Tsunami hazard in Lombok and Bali, Indonesia due to the Flores Back-arc Thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, Issue 5, pp. 1665-1682.
- Godano, C., Lippiello, E. and de Arcangelis, L. 2014. Variability of the *b* value in the Gutenberg-Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, Issue. 3, pp. 1765-1771.
- Gunawan, E., Khoil, M. and Meilano, I. 2016. Splay-fault rupture during the 2014 $M_w 7.1$ Molucca Sea, Indonesia, earthquake determined from GPS measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 259, pp. 29-33.

- Gutenberg, B. and Richter, C. F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34, Issue 4, pp. 185-188.
- Han, Q., Wang, L., Xu, J., Carpinteri, A. and Lacidogna, G. 2015. A robust method to estimate the b -value of the magnitude-frequency distribution of earthquakes. *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 81, Part A, pp. 103-110.
- Heidarzadeh, M., Ishibe, T., Harada, T., Natawidjaja, D. H., Pranantyo, I. R., Widyantoro, B. T. 2021. High potential for splay faulting in the Molucca Sea, Indonesia: November 2019 M_w 7,2 earthquake and tsunami. *Seismological Research Letters*, pp. 1-12.
- Hiemer, S., Woessner, J., Basili, R., Danciu, L., Giardini, D. and Wiemer, S. 2014. A smoothed stochastic earthquake rate model considering seismicity and fault moment release for Europe. *Geophysical Journal International*, Vol. 198, pp. 1159-1172.
- Houston, H. 2015. Deep earthquakes, in Treatise on Geophysics 2nd (eds.), Editor-in-chief G. Schubert, Oxford: Elsevier Publ., Vol. 4, pp. 329-354.
- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, Issue 9, pp. 1-42.
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Nuraini, Hanifa, R. and Syahbana, A. J. 2020. Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, Vol. 36, pp. 112-136.
- Irsyam, M., Widyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, R., Djarwadi, D. dan Faizal, L. 2017. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. pp 1-376. Bandung: Penerbit Pusat Studi Gempa Nasional dan Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian PUPR.
- Mignan, A. 2012. Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, Issue B8.
- Mignan, A. and Woessner, J. 2012. Understanding seismicity catalogs and their problems: Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis* (CORSSA).
- Nava, F. A., Ávila-Barrientos, L., Márquez-Ramírez, V. H., Torres, I. and Zúñiga, F. R. 2017. Sampling uncertainties and source b likelihood for the Gutenberg-Richter b value from the Aki-Utsu method. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 315-324.
- Nugraha, A. D., Kusnandar, R., Puspito, N. T., Sakti, A. P. and Yudistira, T. 2015. Preliminary result of local earthquake tomography around Bali, Lombok, and Sumbawa regions. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1658, No. 030019.
- Nugraha, A. D., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Puspito, N. T., Triyoso, W., Wiyono, S., Daryono, Wandono and Rosalia, S. 2017. Hypocenter relocation of earthquake swarm in West Halmahera, North Molucca region, Indonesia by using double-difference method and 3D seismic velocity structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 62, No. 012053.
- Nugraha, A. D., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Thurber, C. H., Pesicek, J. D., Zhang, H., Wiyono, S. H., Ramdhan, M., Wandono and Irsyam, M. 2018. Hypocenter relocation along the Sunda Arc in Indonesia using a 3D seismic-velocity model. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A, pp. 603-612.
- Rigo, A., Souriau, A. and Sylvander, M. 2018. Spatial variations of b -value and crustal stress in the Pyrenees. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 337-352.
- Reyes, C. and Wiemer, S. 2019. ZMAP7, a refreshed software package to analyze seismicity. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019-13153.
- Sahara, D. P., Nugraha, A. D., Muhari, A., Rusdin, A. A., Rosalia, S., Priyono, A., Zulfakriza, Z., Widiyantoro, S., Puspito, N. T., Rietbrock, A., Lesmana, A., Kusumawati, D., Ardianto, A., Baskara, A.

- W., Halauwet, Y., Shiddiqi, H. A., Rafie, M. T., Pradisti, R., Mozef, P. W., Tuakia, M. Z. and Elly, E. 2020. Source mechanism and triggered large aftershocks of the M_w 6.5 Ambon, Indonesia earthquake. *Tectonophysics*, Vol. 799, No. 228709.
- Scholz, C. H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letter*, Vol. 42, pp. 1399-1402.
- Shodiq, M. N., Barakbah, A. R. and Harsono, T. 2015. Spatial analysis of earthquake distribution with automatic clustering for prediction of earthquake seismicity in Indonesia. *The Fourth Indonesian-Japanese Conference on Knowledge Creation and Intelligent Computing (KCIC)*, pp. 47-55.
- Teng, G. and Baker, J. W. 2019. Seismicity declustering and hazard analysis of the Oklahoma- 347 Kansas region. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 6, pp. 2356-2366.
- Utsu, T. 1966. A statistical significance test of the difference in b -value between two earthquake groups. *Journal of Physics of The Earth*, Vol. 14, No. 2, pp. 37-40.
- Uhrhammer, R. 1986. Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes* Vol. 57, p. 21.
- Watkinson, I. M. and Hall, R. 2017. Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards. In: Cummins, P.R. & Meilano, I. (eds), *Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction. Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, pp. 71-120.
- Wattimanela, H. J., Passaribu, U. S., Puspito, N. T. and Indratno, S. W. 2014. Earthquake classification in Molucca Collision Zone using conventional statistical methods. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Marine Engineering*, Vol. 8, No. 12, pp. 721-725.
- Widiwijayanti, C., Tiberic, C., Deplusa, C., Diamenta, M., Mikhailov, V. and Louate, R. 2004. Geodynamic evolution of the northern Molucca Sea area (Eastern Indonesia) constrained by 3-D gravity field inversion. *Tectonophysics*, Vol. 386, pp. 203-222.
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D. and Putra, H. E. 2020. Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 15274.
- Woessner, J. and Wiemer, S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 95, Issue 2, pp. 684-698.
- Yeken, T. 2016. Spatial analysis of b -value variability in Armutlu Peninsula (NW Turkey). *Open Geoscience*, Vol. 8, pp. 548-555.
- Zhang H, van der Lee, S., Bina, C. R. and Ge, Z. 2021. Deep dehydration as a plausible mechanism of the 2013 M_w 8.3 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, No. 521220, pp. 1-13.