



Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 12 Nomor 1 Tahun 2023, hal 75-87

ANALISIS POTENSI BAHAYA BENCANA SEISMIK DAN KERENTANAN WILAYAH NTB DAN NTT

¹⁾Asri Zakiyah Al-Fakhrioh, ²⁾Tjipto Prastowo

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: asri.19004@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

Abstrak

Upaya pengurangan risiko bencana seismik bisa dilakukan melalui analisis potensi bahaya dan kerentanan wilayah terhadap bencana seismik berbasis perhitungan parameter a dan b yang mendeskripsikan level seismisitas dan akumulasi stres batuan bawah permukaan. Studi kasus dalam penelitian ini adalah Provinsi NTB dan NTT dengan data gempa dari katalog USGS antara 1970-2021 dan magnitudo $3,1 \leq M_w \leq 8,3$ serta kedalaman sumber mencapai 640 km. Kedua parameter diperoleh dari hukum Gutenberg-Richter dan pendekatan *maximum likelihood* dengan bantuan distribusi frekuensi-magnitudo (FMD) untuk 4 zona seismik yang merepresentasikan kedua provinsi dan kedua sumber pemicu gempa, yaitu Flores Backarc di utara dan zona *megathrust* di selatan kedua provinsi. Kurva FMD menunjukkan bahwa nilai a antara 8-9 dengan a (*annual*) rata-rata 6,6 refleksi dari level seismisitas yang tinggi sedangkan nilai b antara 1,01-1,21 indikator mayoritas kejadian gempa adalah *moderate magnitudes* ($4,5 \leq M_w \leq 7,0$). Meski gempa besar jarang terjadi, namun jalur sesar Flores Backarc berada di Laut Flores yang memanjang dari ujung barat sampai timur wilayah perairan utara NTB dan NTT sehingga potensi pembangkitan gelombang tsunami akibat aktivitas Flores Backarc tetap ada seperti saat gempa $M_w 7,8$ memicu tsunami Flores 1992. Demikian pula, gempa kuat $M_w 8,3$ berpusat di perairan selatan NTB memicu tsunami Sumba 1977. Histogram gempa terhadap kedalaman menunjukkan bahwa mayoritas kejadian adalah *shallow events* dengan rata-rata kedalaman sumber 35-40 km. Dengan level seismisitas tinggi, mayoritas sumber dangkal dan beberapa kali diguncang gempa bawah laut baik di utara maupun selatan, maka kerentanan wilayah NTB dan NTT terhadap bencana seismik perlu diwaspadai.

Kata Kunci: seismisitas, kerentanan wilayah, NTB dan NTT, a -value, b -value

Abstract

Seismic risk reduction can be performed by analyzing hazard potential and vulnerability to seismic disasters by calculating parameters a and b , which describe seismicity and stress in subsurface structure. This study examines NTB and NTT vulnerability with the data from USGS between 1970-2021, magnitudes $3,1 \leq M_w \leq 8,3$ and the depth of up to 640 km. The parameters were derived from the Gutenberg-Richter law and a maximum likelihood approach by utilizing magnitude-frequency distribution (FMD) for 4 seismic zones to accommodate the provinces and two earthquake sources: Flores Backarc to the north and a megathrust zone to the south of the provinces. The FMD curves for all zones showed that a -value ranges from 8-9 with a (*annual*) average 6.6 reflecting a high level of seismicity while b -value varies between 1.01-1.21 indicating the majority of events with moderate sizes ($4,5 \leq M_w \leq 7,0$). Although large earthquakes rarely occur, Flores Backarc extends from the western to the eastern tip of the provinces' northern waters so that tsunami generation due to Flores Backarc activity remains possible, as it occurred when the $M_w 7,8$

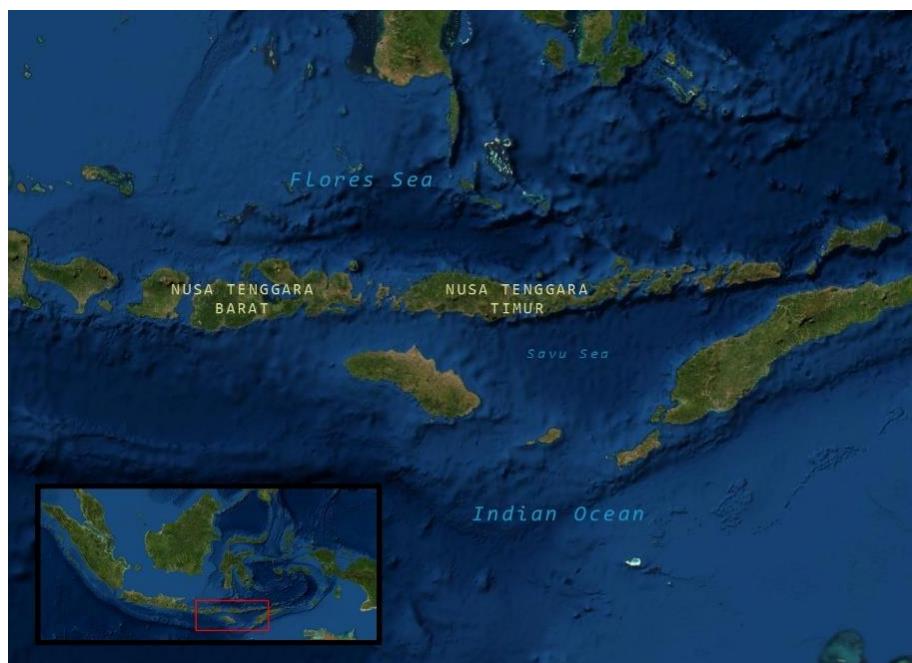
earthquake triggered the 1992 Flores tsunami. Likewise, a strong M_w 8.3 earthquake centered in the southern water of NTB triggered the 1977 Sumba tsunami. The histogram against depth showed that most events occur at shallow sources with an average depth of 35-40 km. With high seismicity, many sources are shallow and several times hit by earthquakes on the sea in the northern and southern waters, the vulnerability of NTB and NTT needs to be evaluated.

Keywords: seismicity, area vulnerability, NTB and NTT, *a*-value, *b*-value

I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki wilayah teritorial yang rentan terhadap bencana seismik (Hamilton, 1979; Cummins, 2017; Irsyam dkk., 2017; Hutchings and Mooney, 2021). Sepanjang batas wilayah teritorial Indonesia, konvergensi tektonik terjadi di mana Lempeng Indo-Australia bergerak ke utara menunjam Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik bergerak ke arah barat menekan wilayah timur Indonesia, termasuk Provinsi NTB dan NTT serta kepulauan Maluku (Watkinson and Hall, 2017; Irsyam *et al.*, 2020). Pertemuan ketiga lempeng tersebut menghasilkan jalur zona subduksi, dimana proses geologi yang menyertai memicu banyak gempa dan membangkitkan gelombang tsunami jika kondisi terpenuhi (Nugraha *et al.*, 2015; Nugraha *et al.*, 2018; Felix *et al.*, 2021).

Salah satu kawasan teritorial Indonesia yang memiliki aktivitas seismik tinggi adalah Nusa Tenggara (NTB dan NTT) yang terbentuk oleh kepulauan gunung api (Hidayati *et al.*, 2018). Secara tektonik, Nusa Tenggara adalah wilayah Sunda Kecil yang membentang dari Selat Sunda hingga Sumba (Puspito and Shimazaki, 1995; Koulali *et al.*, 2016; Irsyam dkk., 2017; Hutchings and Mooney, 2021). Sumber utama pemicu aktivitas seismik di NTB dan NTT adalah zona subduksi di selatan dan sesar aktif Flores Backarc Thrust di utara kedua provinsi tersebut (Sunardi dkk., 2017; Supendi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020). Gambaran posisi geografis, kondisi tektonik dan batimetri lautan yang membatasi Nusa Tenggara sebagai area penelitian bisa dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Nusa Tenggara (NTB dan NTT) berbatasan dengan Flores Backarc Thrust di utara dan zona subduksi *megathrust* di selatan sampai ujung timur. Gambar sisipan menunjukkan posisi geografis Nusa Tenggara (kotak merah) diantara kepulauan Indonesia (Gambar ini dibuat dengan bantuan ArcGIS 8.10 via ArcGIS Online Basemaps di <https://arcgis.com/home/group.html>).

Pada tahun 2018, dua gempa yang merusak terjadi di Pulau Lombok (Supendi *et al.*, 2020). Gempa pertama (28 Juli 2018) terjadi dengan M_w 6,4 yang diikuti serangkaian gempa susulan dan mencapai puncak (5 Agustus 2018) dengan M_w 7,0. Secara terpisah, gempa kedua (19 Agustus 2018) terjadi dengan M_w 6,9.

Episenter kedua gempa berada di jalur Flores Backarc Thrust, merupakan struktur geologi bawah permukaan Pulau Lombok yang diduga bergeser ke arah utara akibat desakan tektonik Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia (Koulali *et al.*, 2016). Kedua gempa tersebut bisa memicu tsunami, namun dengan peluang yang relatif kecil karena episenter kedua gempa berada di daratan Lombok dan agak jauh dari tepi pantai (Felix *et al.*, 2021).

Zona subduksi di wilayah selatan Nusa Tenggara menjadi salah satu dari dua sumber potensial pemicu gempa tektonik. Selain itu, wilayah utara Nusa Tenggara terdapat Flores Backarc Thrust yang membentang dari timur Pulau Lombok hingga Pulau Flores sepanjang 450 km (Silver *et al.*, 1983; Koulali *et al.*, 2016; Sunardi dkk., 2017; Supendy *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2021). Ancaman bahaya seismik dari Flores Backarc (Supendy *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021) dan gempa kuat dengan magnitudo M_w 7,3 berpusat di Laut Flores (Supendy *et al.*, 2022) yang memicu gelombang tsunami skala kecil jelas menunjukkan bahwa wilayah Nusa Tenggara merupakan kawasan dengan aktivitas seismik yang tinggi dan rentan terhadap potensi bahaya bencana gempa tektonik dan tsunami. Oleh karena itu, pengetahuan tentang level seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik di wilayah Nusa Tenggara sangat diperlukan untuk kebutuhan mitigasi bencana.

Secara teknis, pengetahuan tentang level seismisitas dan kerentanan wilayah Nusa Tenggara dapat diperoleh melalui penentuan parameter a -value, b -value dan anomali b -value memanfaatkan data statistik gempa di wilayah NTB dan NTT. Data gempa bisa diperoleh dari katalog *United States Geological Survey* (USGS) selama tahun 1970-2021 dengan bantuan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001).

Hukum Gutenberg-Richter

Statistik gempa dalam bentuk *frequency-magnitude distribution* (FMD) dapat digunakan untuk mengetahui level seismisitas suatu wilayah. Secara matematis, FMD dituliskan sebagai Hukum Gutenberg-Richter (1944) sebagai berikut,

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

di mana N adalah jumlah kejadian di suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu dengan kekuatan $M \geq M_c$ (*magnitude of completeness*) yang didefinisikan sebagai nilai magnitudo terkecil di mana Hukum Gutenberg-Richter masih berlaku. Dengan kata lain, gempa dengan magnitudo yang lebih kecil dari M_c tidak akan digunakan sebagai data penelitian (Woessner and Wiemer, 2005; Mignan, 2012; Mignan and Woessner, 2012). Nilai a dan b merupakan parameter seismik yang relevan dengan potensi bahaya bencana seismik dan kerentanan wilayah.

Secara matematis, hukum Gutenberg-Richter (1944) merupakan persamaan garis lurus, di mana $\log N$ sebagai sumbu vertikal dan M sebagai sumbu horizontal. Dalam hal ini, arti fisis parameter a adalah level seismisitas wilayah yang sedang diamati yang besarnya bergantung pada luas wilayah, panjang periode pengamatan, dan magnitudo terbesar tercatat (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sedangkan nilai b merepresentasikan rasio gempa kecil terhadap gempa besar yang menunjukkan level stres batuan bawah permukaan (Godano *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017).

Penerapan persamaan (1) bergantung pada akurasi estimasi M_c . Apabila estimasi M_c terlalu tinggi, maka menyebabkan berkurangnya sampel data gempa. Sebaliknya, apabila M_c terlalu rendah dapat menghasilkan parameter seismik a dan b yang menyimpang (Mignan, 2012; Mignan and Woessner 2012). Dalam konteks ini, peneliti menggunakan *Entire Magnitude Range* (EMR) (Mignan and Woessner, 2012) untuk estimasi nilai M_c . Hasil estimasi M_c dengan menggunakan EMR menurut Mignan and Woessner (2012) tidak berbeda jauh dari estimasi yang dihasilkan oleh metode lain.

II. METODE

Metode Maximum Likelihood

Pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) merupakan salah satu metode statistik yang biasa digunakan untuk menyelesaikan masalah seismo-tektonik, di mana estimasi a dan b dilakukan berdasarkan probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Pendekatan tersebut tidak memperhitungkan variabel yang saling bergantung sehingga ketidakpastian hasil akhir perhitungan nilai a dan b dapat direduksi menjadi sekecil mungkin. Dengan demikian, level akurasi hasil akhir perhitungan yang diperoleh untuk kedua parameter adalah tinggi (Nava *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Pendekatan ini mengasumsikan data statistik gempa terdistribusi eksponensial (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017) dengan estimasi b ditentukan melalui persamaan Utsu (1966) berikut,

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

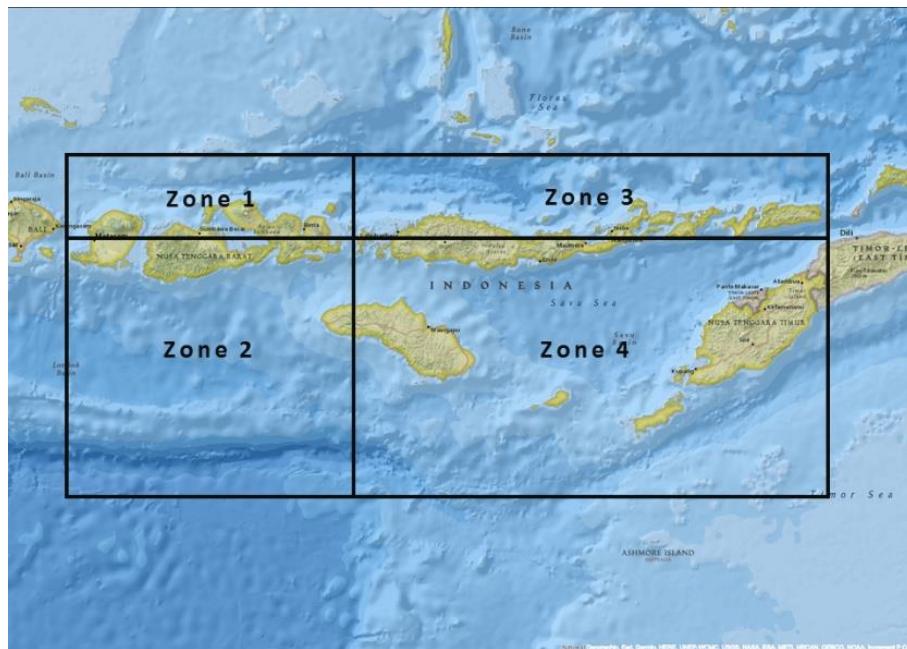
dimana \bar{M} adalah magnitudo rata-rata untuk gempa $M \geq M_c$ dan $\Delta M = 0,1$ adalah *binning interval* pada skala magnitudo tersebut (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Nilai $b \approx 1,0$ berarti batuan geologi bawah permukaan memiliki stres yang tinggi (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Variasi spasial b bisa digunakan sebagai prekursor untuk gempa besar (Nuannin *et al.*, 2012). Sedangkan estimasi a ditentukan menggunakan persamaan berikut,

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

di mana akurasi perhitungan nilai b dan M_c dapat mempengaruhi keakuratan hasil perhitungan nilai a (Mignan and Woessner, 2012; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

Data Penelitian, Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

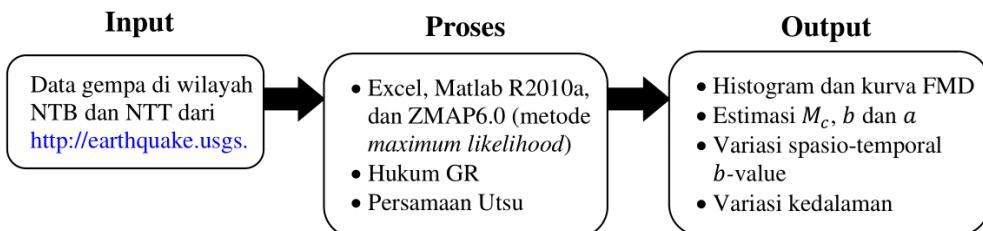
Penelitian ini menggunakan data sekunder berjumlah 5896 kejadian gempa di wilayah NTB dan NTT antara 1970-2021 dengan variasi magnitudo $3,1 \leq M_w \leq 8,3$ dan kedalaman sumber gempa mencapai 640 km yang diperoleh dari katalog gempa USGS di <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Data gempa tersebut belum melalui proses penapisan yang akan menghilangkan data *foreshocks* dan *aftershocks* (Teng and Baker, 2019) dengan tujuan untuk meningkatkan level akurasi hasil perhitungan M_c , b -value, dan a -value di wilayah NTB dan NTT. Dalam hal ini, M_c , b -value dan a -value di wilayah NTB dan NTT dihitung dengan membentuk 4 zona seismik, yaitu (1) Zona Utara NTB, (2) Zona Selatan NTB, (3) Zona Utara NTT dan (4) Zona Selatan NTT seperti yang terlihat pada Gambar 2. Batas wilayah Zona 1 adalah $7,53^\circ$ - $8,57^\circ$ LS dan $115,76^\circ$ - $119,35^\circ$ BT. Batas wilayah Zona 2 adalah $8,57^\circ$ - $11,7^\circ$ LS dan $115,76^\circ$ - $119,35^\circ$ BT. Batas wilayah Zona 3 adalah $7,53^\circ$ - $8,57^\circ$ LS dan $119,35^\circ$ - $125,22^\circ$ BT. Batas wilayah Zona 4 adalah $8,57^\circ$ - $11,7^\circ$ LS dan $119,35^\circ$ - $125,22^\circ$ BT. Seluruh prosedur dan teknik pengumpulan data berlaku untuk semua wilayah zona seismik.



Gambar 2. Peta zona seismik area penelitian: wilayah NTB (Zona 1 dan 2) dan NTT (Zona 3 dan 4) (gambar dibuat dengan bantuan aplikasi yang diakses bebas di <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>).

Seluruh data gempa yang dijadikan sampel diunduh dari katalog USGS dan disimpan dalam format file.csv. Kemudian, data gempa diolah dengan bantuan *spreadsheet* untuk konversi magnitudo gempa selain magnitudo momen menjadi M_w menurut teknik konversi Kadirioğlu and Kartal (2016) dan penyesuaian format penulisan yang ditentukan ZMAP6.0 yaitu *longitude*, *latitude*, *year*, *month*, *day*, *magnitude*, *depth*, *hour*, *minute*. Sesudah tahap penyesuaian ini, data disimpan dalam format file.dat sebagai *input* dalam program ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) dengan bantuan Matlab R2010a. Proses *filtering* menggunakan teknik Reasenberg (1985) dilakukan untuk menghilangkan *foreshocks* dan *aftershocks* sebagai tahap pemurnian data *mainshocks*. Teknik EMR (Mignan and Woessner, 2012) diterapkan untuk menjamin akurasi nilai M_c , b -value, dan a -value. Ketiga parameter seismik tersebut berguna untuk mengetahui potensi bahaya bencana seismik di wilayah NTB dan NTT.

Setelah penapisan, jumlah data pada Zona 1 adalah 781 kejadian, Zona 2 adalah 1545 kejadian, Zona 3 adalah 1208 kejadian dan Zona 4 adalah 1742 kejadian. Data tersebut kemudian kembali diolah menggunakan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) untuk mendapatkan *output* berupa histogram dan kurva FMD, estimasi parameter M_c , b -value, a -value, variasi spasial b -value, dan variasi kedalaman sumber. *Output* dari 4 zona seismik dianalisis untuk memperoleh gambaran komprehensif tentang level seismisitas dan potensi kerentanan wilayah NTB dan NTT. Rancangan penelitian bisa dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Skema penelitian seismisitas dan potensi bahaya seismik di wilayah NTB dan NTT.

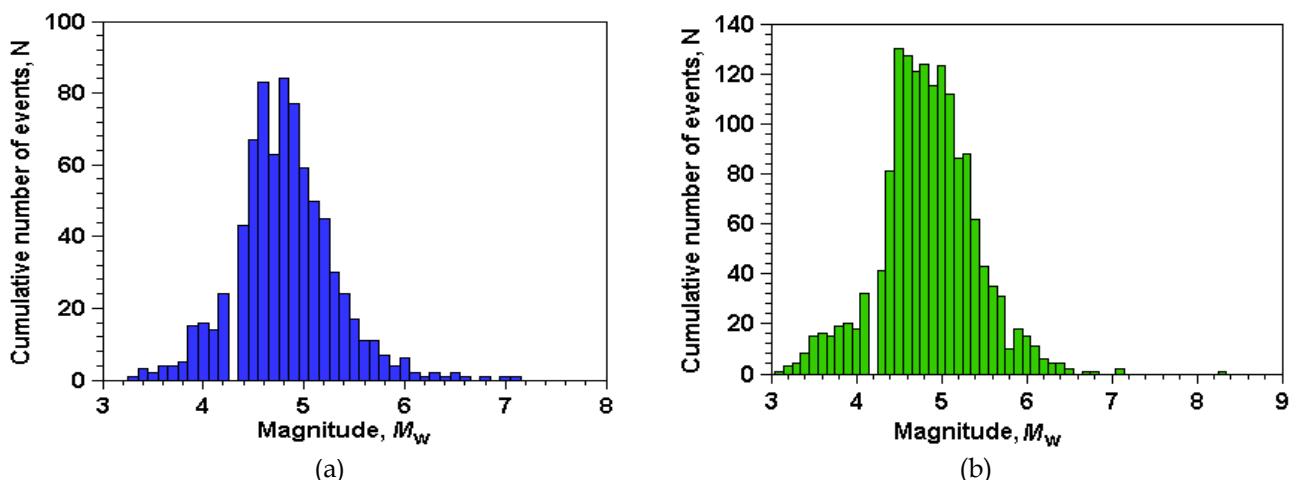
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

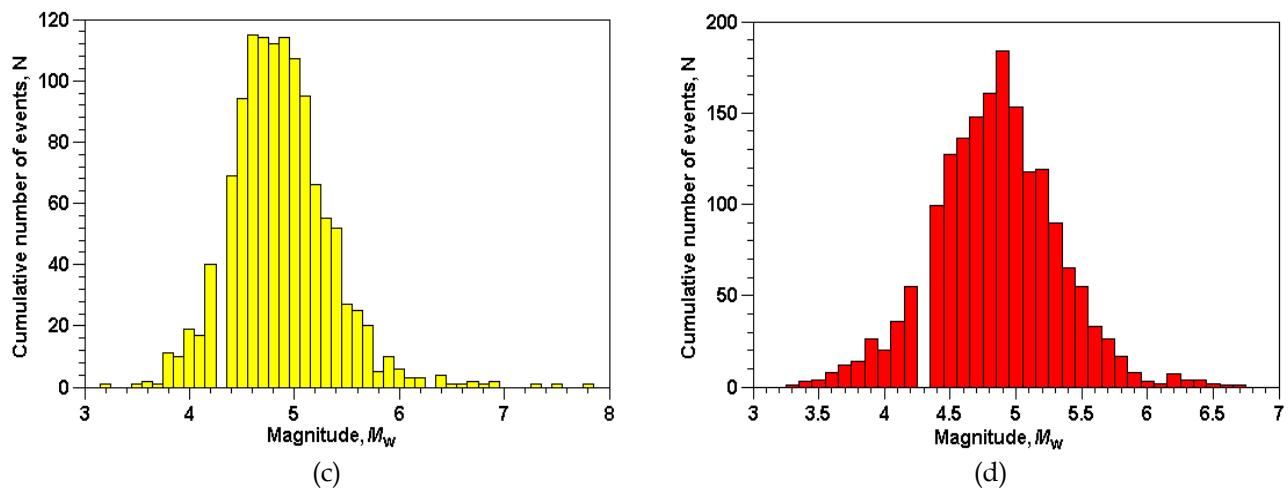
Hasil-hasil penelitian dibahas melalui gambar-gambar yang dibuat dengan bantuan ZMAP6.0 dan Matlab, yaitu: (1) histogram gempa terhadap magnitudo, (2) kurva FMD, (3) distribusi variasi spasial b -value dan (4) histogram gempa terhadap kedalaman. Analisis dibedakan berdasarkan zona seismik, yaitu Zona 1, Zona 2, Zona 3, dan Zona 4. Analisis histogram gempa terhadap magnitudo dan kurva FMD untuk semua zona seismik dapat memberikan gambaran level seismisitas dan stres batuan bawah permukaan di NTB dan NTT. Analisis variabilitas b -value serta histogram gempa terhadap kedalaman merefleksikan potensi bahaya bencana gempa tektonik di NTB dan NTT. Analisis histogram gempa terhadap kedalaman menceritakan tentang distribusi sumber gempa (lokasi hiposenter).

Histogram Gempa terhadap Magnitudo

Penapisan data statistik gempa dilakukan dengan mengikuti metode terdahulu (van Stiphout *et al.*, 2012; Amaro-Mellado and Bui, 2020; Risanti *et al.*, 2022) di mana data awal gempa berupa *mixed events* (*foreshocks*, *mainshocks*, *aftershocks*) diolah melalui penapisan Reasenberg (1985) menjadi *mainshocks* saja. Data *mainshocks* kemudian diolah dengan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) menjadi kelas magnitudo dengan lebar kelas 0,2 (Zona 1, Zona 2 dan Zona 3) dan 0,1 (Zona 4).

Berdasarkan plot magnitudo M_w terhadap jumlah kejadian N untuk semua zona seismik (Gambar 3), frekuensi gempa tertinggi berada pada interval kelas $4,5 \leq M_w \leq 4,8$ yang berkorelasi dengan 84 kejadian di Zona 1, 128 kejadian di Zona 2, 114 kejadian di Zona 3 dan 182 kejadian Zona 4. Magnitudo terbesar selama tahun 1970-2021 di Zona 1 adalah M_w 7,1; di Zona 2 adalah M_w 8,3; di Zona 3 adalah M_w 7,8 dan di Zona 4 adalah M_w 6,7. Plot histogram distribusi magnitudo pada keempat zona seismik di NTB dan NTT memiliki pola yang sama, di mana seluruh plot menunjukkan penurunan frekuensi kejadian kumulatif gempa secara eksponensial untuk jangkauan magnitudo $M_w \geq 5,0$ mengikuti hukum linier-log Gutenberg-Richter (1944) (Naylor *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2015; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017).



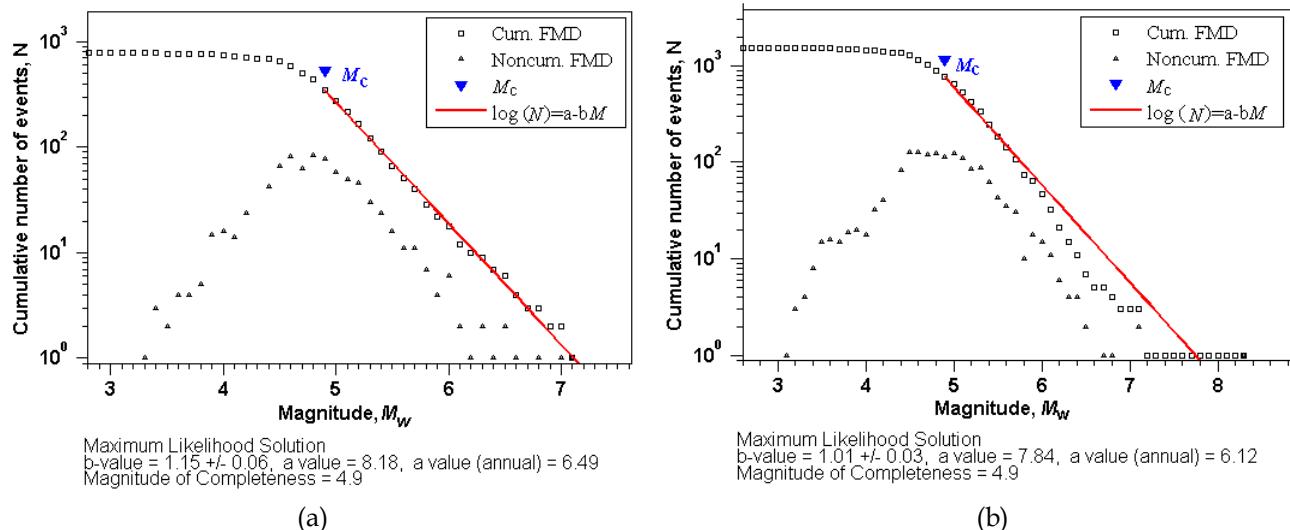


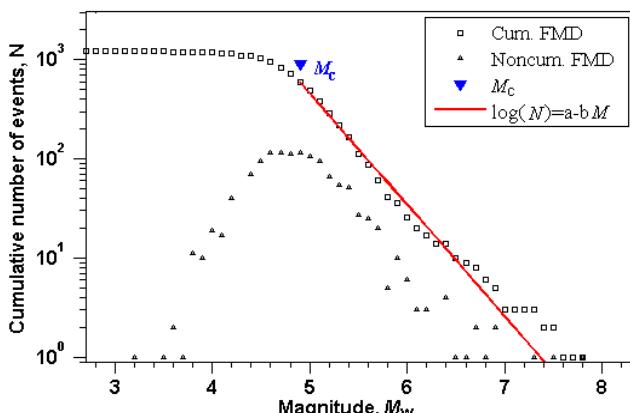
Gambar 4. Plot magnitudo M_w terhadap jumlah kejadian N untuk (a) Zona 1, (b) Zona 2, (c) Zona 3 dan (d) Zona 4.

Berdasarkan Gambar 4, nilai tengah atau median dari kelas magnitudo dengan frekuensi tertinggi diasosiasikan dengan estimasi M_c di Zona 1 yaitu 4,7; Zona 2 yaitu 4,5; Zona 3 yaitu 4,5 dan Zona 4 yaitu 4,8 yang dikategorikan sebagai *moderate magnitudes*. Untuk memastikan keakurasaan estimasi M_c sekaligus juga b -value dan a -value, maka diperlukan koreksi terhadap nilai M_c (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005) berupa kurva FMD, di mana plot M_w dibuat terhadap jumlah kumulatif kejadian N dan logaritma jumlah kejadian $\log N$ sekaligus.

Kurva FMD

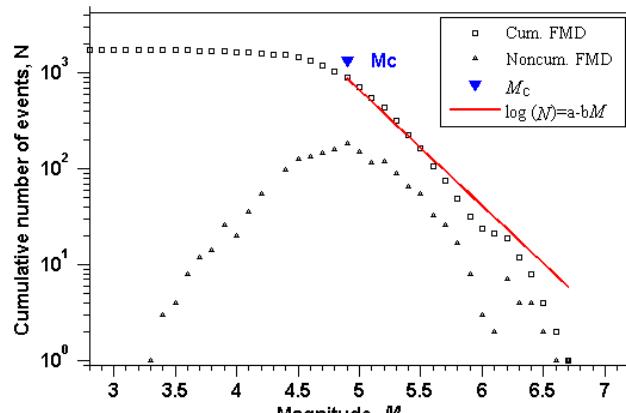
Gambar 5 menyajikan kurva FMD untuk setiap zona seismik yang dibuat dengan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005) menggunakan teknik EMR (Mignan and Woessner, 2012). Kurva FMD memberikan hasil hitung M_c dan a -value yang menunjukkan level seismisitas (Mazrocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) dan b -value yang merepresentasikan level stres batuan bawah permukaan (Godano *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Selain itu, kurva FMD menyajikan hasil perhitungan a (*annual*) yang digunakan untuk menjelaskan *seismicity rate* selama periode pengamatan antara 1970-2021.





Maximum Likelihood Solution
b-value = 1.12 ± 0.04 , a value = 8.29, a value (annual) = 6.57
Magnitude of Completeness = 4.9

(c)



Maximum Likelihood Solution
b-value = 1.21 ± 0.03 , a value = 8.87, a value (annual) = 7.15
Magnitude of Completeness = 4.9

(d)

Gambar 5. Kurva FMD dengan estimasi M_c , b-value, a-value dan a (annual) diperoleh dari ZMAP6.0 untuk (a) Zona 1, (b) Zona 2, (c) Zona 3, dan (d) Zona 4.

Berdasarkan Gambar 5, hasil hitung M_c , b-value, a-value dan a (annual) untuk keempat zona seismik ternyata bervariasi. Untuk Zona 1: $M_c = 4,9$; $b = 1,15$ (ketidakpastian ukur 0,06); $a = 8,18$; a (annual) = 6,49 dan untuk Zona 2: $M_c = 4,9$; $b = 1,01$ (ketidakpastian ukur 0,03); $a = 7,84$; a (annual) = 6,12. Kemudian, untuk Zona 3: $M_c = 4,9$; $b = 1,12$ (ketidakpastian ukur 0,04); $a = 8,29$; a (annual) = 6,57 dan Zona 4: $M_c = 4,9$; $b = 1,21$ (ketidakpastian ukur 0,03); $a = 8,87$; a (annual) = 7,15. Meskipun nilai b dan a untuk keempat zona seismik bervariasi, namun dengan pola histogram yang mirip dan nilai M_c yang sama, diperoleh berbasis kesamaan syarat minimal 200 kejadian (Woessner dan Wiemer, 2005), maka dapat dikatakan terdapat kemiripan pola seismisitas dan *seismicity rate* pada keempat zona seismik di wilayah NTB dan NTT. Paragraf sesudah ini memuat analisis rinci hasil hitung masing-masing parameter seismik (b dan a) untuk semua zona seismik.

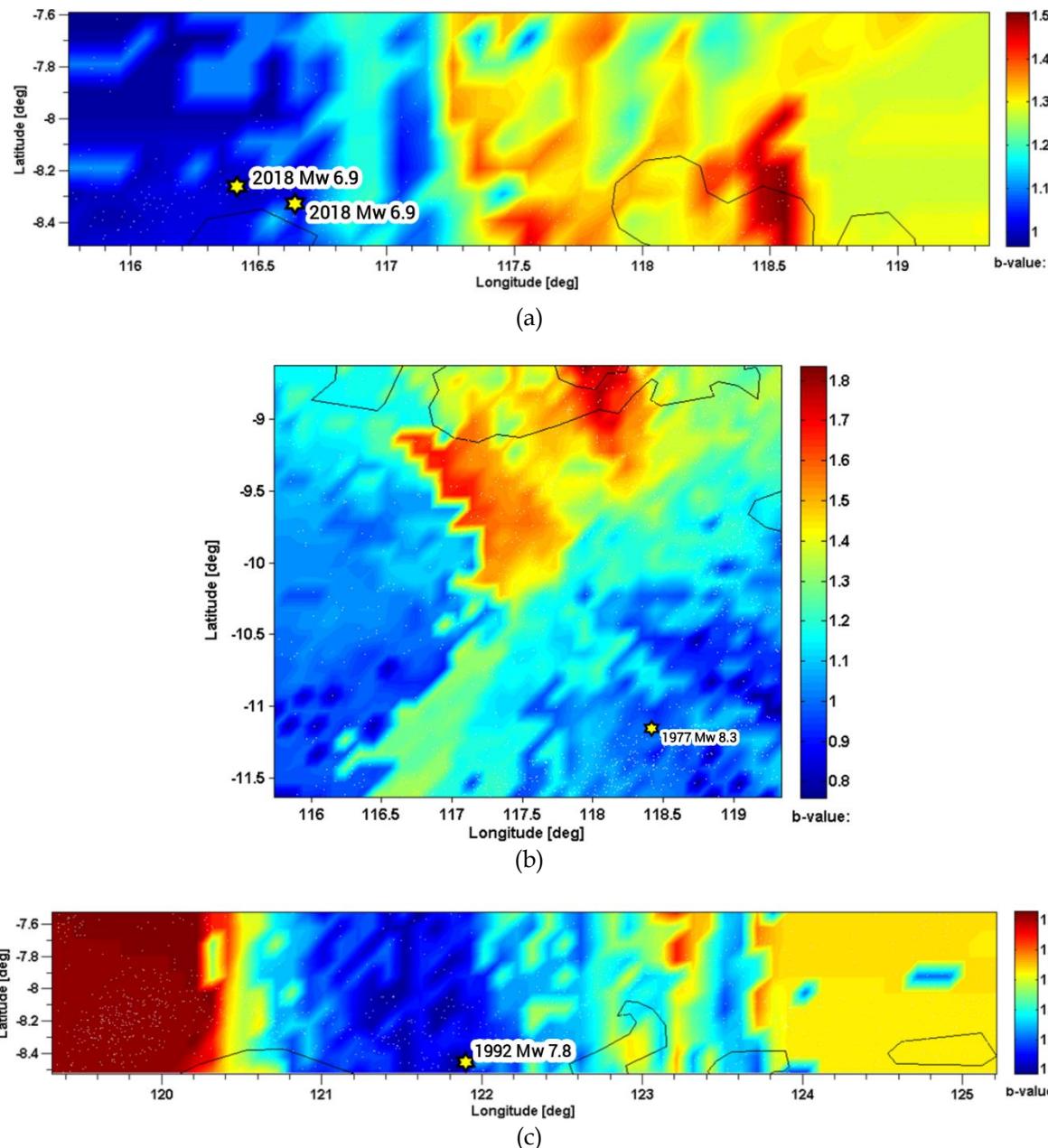
Secara umum, $b \approx 1$ untuk cakupan wilayah yang luas atau pengamatan dalam kurun waktu yang lama (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014). Namun untuk wilayah yang tidak terlalu luas atau pengamatan dalam waktu yang relatif singkat, b-value biasanya bervariasi di sekitar nilai normal $b \approx 1$ (bisa lebih kecil atau besar dari 1) bergantung pada faktor dominan dalam aktivitas seismik di sekitar wilayah yang dipelajari. Nilai b pada empat zona seismik adalah $b > 1,0$ yang menunjukkan akumulasi stres bawah permukaan adalah relatif rendah dengan *mean b-value* adalah 1,13 tidak berbeda jauh dari $b = 1,20$ untuk wilayah NTB dan NTT (Irsyam dkk., 2017) dan berada dalam jangkauan $0,6 \leq b \leq 1,5$ (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Meski $b \approx 1$ untuk wilayah NTB dan NTT, namun gempa bermagnitudo besar dengan akibat fatal bisa terjadi di wilayah kedua provinsi (Lynnes and Lay, 1988; Immamura *et al.*, 1995; Tsuji *et al.*, 1995; Gusman *et al.*, 2009; Pradjoko *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2021).

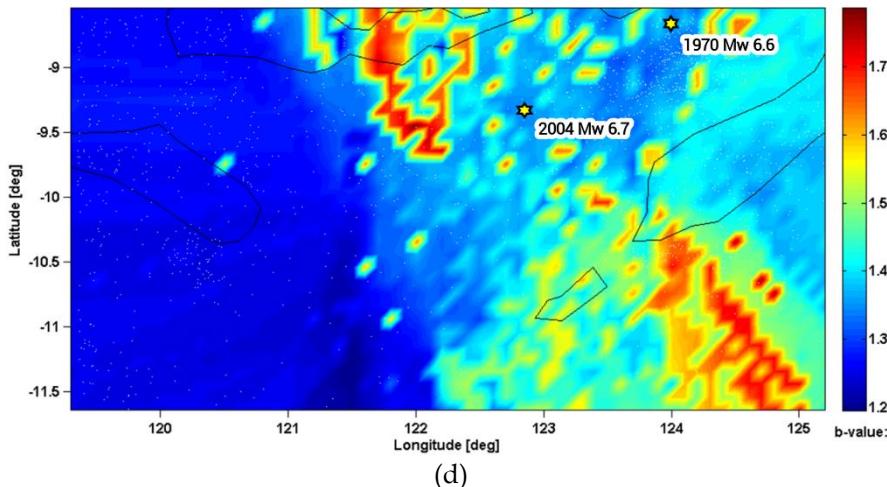
Level seismisitas dan *seismicity rates* wilayah NTB dan NTT bisa dilihat dari nilai a dan a (annual) pada Gambar 5, di mana Zona 4 memiliki seismisitas dan *seismicity rate* yang paling tinggi. Hal ini berarti Zona 4 lebih sering mengalami guncangan tanah akibat aktivitas tektonik di sekitar wilayah tersebut. Namun ketiga zona yang lain juga rentan terhadap potensi bahaya bencana seismik yang dipicu oleh aktivitas zona subduksi di selatan dan Flores Backarc di utara (Nugraha *et al.*, 2015; Koulali *et al.*, 2016; Hidayati dkk., 2018; Yang *et al.*, 2020). Untuk mengetahui lebih detil mengenai area mana saja yang berpotensi mengalami bencana gempa dengan skala *megathrust*, maka diperlukan kajian distribusi spasial nilai b untuk keempat zona seismik.

Distribusi Variasi Spasial b-value

Analisis perilaku b -value dan kondisi tektonik wilayah NTB dan NTT antara tahun 1970-2021 dapat dilakukan dengan memetakan distribusi spasial b -value. Variasi spasial b -value merupakan salah satu dari dua cara yang dapat digunakan untuk mempelajari potensi terjadinya gempa besar di suatu wilayah tertentu. Pemetaan dilakukan menggunakan ZMAP6.0 dan MatlabR2010a (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005). Untuk mendapatkan gambar dengan resolusi tinggi, ZMAP6.0 membutuhkan minimal 200 kejadian (Woessner dan Wiemer, 2005). Oleh karena syarat data minimal 200 kejadian gempa untuk setiap zona seismik sudah terpenuhi dalam penelitian ini, maka peta distribusi spasial b -value untuk keempat zona seismik dapat diperoleh dengan resolusi tinggi dan dapat dipercaya (Mignan and Woessner, 2012).

Gambar 6 adalah peta distribusi spasial b -value untuk wilayah NTB dan NTT antara 1970-2021. Variasi b -value pada peta tersebut digambarkan melalui perbedaan warna, di mana warna biru menunjukkan b -value yang relatif rendah, sedangkan merah menunjukkan b -value yang relatif tinggi. Keempat plot variasi spasial b -value menunjukkan episenter gempa yang relatif kuat berada di daerah dengan b -value yang rendah. Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian terdahulu (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) yang mengatakan bahwa area dengan akumulasi energi seismik tinggi berkorelasi dengan b -value yang rendah.





Gambar 6. Peta variasi spasial b -value untuk wilayah NTB dan NTT: (a) Zona 1, (b) Zona 2, (c) Zona 3, dan (d) Zona 4.

Gambar 6a menunjukkan variasi spasial b -value pada Zona 1, di mana terlihat dua episenter gempa *moderate* dengan M_w 6,9 (5 Agustus 2018) dan M_w 6,9 (19 Agustus 2018) terjadi terpisah di utara Pulau Lombok. Gempa 5 Agustus 2018 tersebut dilaporkan oleh Supendi *et al.* (2020) sebagai gempa M_w 7,0 (tidak berbeda signifikan karena perbedaan sampai $\pm 0,2$ masih bisa diterima). Kedua gempa ini dipicu oleh aktivitas Flores Backarc Thrusting Fault (Supendi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2022) menyusul hipotesis sumber pemicu gempa di wilayah NTB (Silver *et al.*, 1983; Koulali *et al.*, 2016). Kedua lokasi episenter berada pada area warna biru tua dan biru muda (b relatif rendah). Hal ini berarti struktur batuan bawah permukaan di daerah tersebut memiliki level stres yang cukup tinggi (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

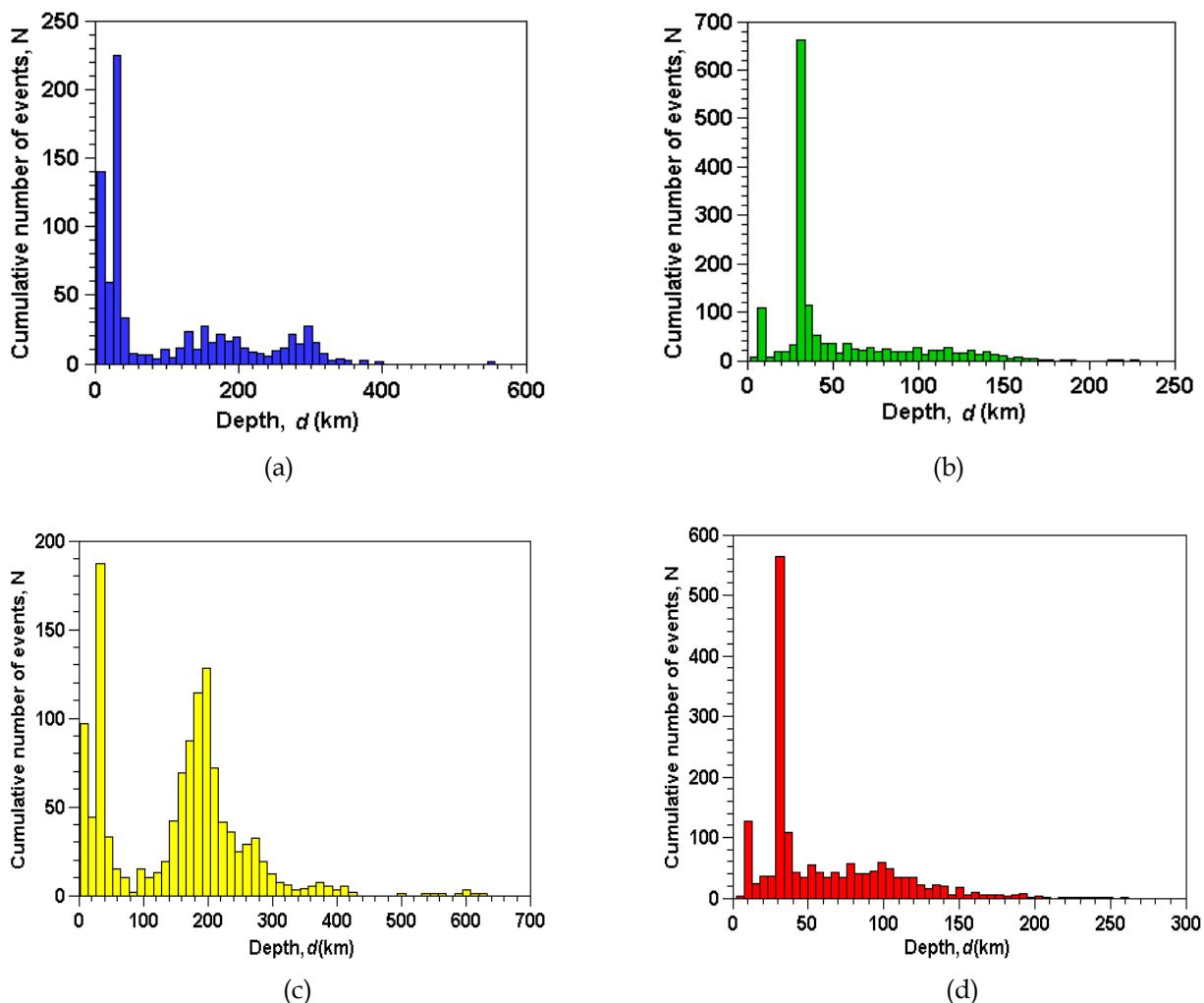
Gambar 6b menunjukkan satu lokasi episenter gempa besar dengan M_w 8,3 terjadi pada Zona 2. Gempa yang biasa dikenal dengan “The Great Sumba” ini berpusat di bawah lautan Samudera Hindia pada kedalaman 33 km dan memicu tsunami destruktif di beberapa pesisir Pulau Sumba, Sumbawa, Lombok, dan Bali (Lynnes and Lay, 1988; Gusman *et al.*, 2009). Hal ini karena kedalaman sumber gempa yang relatif dangkal dengan magnitudo yang relatif besar, berkorelasi positif dengan pelepasan energi dari zona *megathrust* subduksi di wilayah selatan NTB. Kerusakan yang diakibatkan oleh gempa ini sedikitnya memakan 161 korban jiwa dan 1125 korban luka serta kerugian material hingga 240 juta rupiah yang sebagian besar tersapu oleh gelombang tsunami yang terjadi beberapa saat setelah *ground shaking* pertama kali dirasakan (Gusman *et al.*, 2009; Pradjoko *et al.*, 2015). Episenter gempa Sumba 1977 juga berada di lokasi dengan b relatif rendah.

Gambar 6c menunjukkan lokasi episenter gempa kuat M_w 7,8 tahun 1992 yang berada di wilayah utara Pulau Flores pada kedalaman 35 km. Gempa ini dipicu aktivitas segmen timur Flores Backarc Thrust yang berada di utara wilayah NTT (Imamura *et al.*, 1995; Tsuji *et al.*, 1995; Koulali *et al.*, 2016; Felix *et al.*, 2022). Gempa Flores 1992 memang tidak sebesar gempa M_w 8,3 di perairan selatan Sumba tahun 1977 (Lynnes and Lay, 1988; Gusman *et al.*, 2009) yang terjadi di Zona 2, namun karena episenter berada dekat pesisir wilayah padat penduduk membuat gempa tersebut memakan banyak korban hingga 1713 jiwa dan 2126 korban luka (Imamura *et al.*, 1995; Tsuji *et al.*, 1995). Kajian terkini sumber gempa di utara NTT menemukan sesar aktif yang baru teridentifikasi pasca gempa M_w 7,3 di Laut Flores tanggal 14 Desember 2021 (Supendi *et al.*, 2022). Temuan terbaru tersebut membawa peringatan dini potensi bahaya bencana gempa sekaligus tsunami di wilayah NTB dan NTT. Seluruh episenter gempa yang terjadi pada Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 berada di area dengan b relatif rendah.

Gambar 6d menunjukkan dua kejadian gempa dengan magnitudo $M_w \geq 6,6$ dengan kedua lokasi episenter berada di area dengan b yang tidak terlalu rendah. Gempa pertama terjadi tanggal 28 Juni 1970 pada kedalaman 85,8 km dan berkekuatan M_w 6,6 dan gempa kedua terjadi pada tanggal 23 April 2004 pada kedalaman 75,8 km dan berkekuatan M_w 6,7. Kedua gempa tersebut berpusat di bawah Laut Sawu namun tidak membangkitkan gelombang tsunami karena beberapa faktor, dua diantaranya adalah magnitudonya *moderate* dan sumber gempanya relatif dalam. Gambar 6 cenderung menunjukkan bahwa gempa besar atau *moderate* berkorelasi dengan nilai b yang rendah. Hal ini membuktikan bahwa peta distribusi variasi spasial b -value bisa membantu proses evaluasi dan asesmen potensi bahaya bencana seismik suatu wilayah.

Histogram Gempa terhadap Kedalaman

Plot histogram gempa terhadap kedalaman sumber perlu dibuat dengan tujuan untuk memetakan distribusi kejadian gempa di wilayah Provinsi NTB dan NTT dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001). Analisis yang dilakukan mengacu pada penelitian Hutchings and Mooney (2021) yang membagi jenis gempa berdasarkan kedalaman, yaitu gempa bumi dalam (*deep sources*) dengan hiposenter > 300 km, gempa bumi menengah (*intermediate sources*) dengan hiposenter antara 70-300 km dan gempa bumi dangkal (*shallow sources*) dengan hiposenter < 70 km. Beberapa referensi (Tocheport *et al.*, 2007; Kiser *et al.*, 2011) mengatakan bahwa jangkauan gempa dangkal bisa mencapai kedalaman 100 km. Gambar 7 mengilustrasikan distribusi gempa terhadap kedalaman untuk semua zona seismik.



Gambar 7. Plot kedalaman sumber d terhadap jumlah kejadian N pada (a) Zona 1, (b) Zona 2, (c) Zona 3 dan (d) Zona 4.

Gambar 7 menunjukkan bahwa mayoritas gempa pada seluruh zona seismik terjadi pada kedalaman kurang dari 70 km (*shallow events*). Gempa dangkal relatif sering terjadi daripada gempa pada *intermediate depths* ($70 \text{ km} < d < 300 \text{ km}$). Sebagai contoh, Zona 1 didominasi oleh gempa dangkal sebanyak 225 kejadian pada kedalaman sumber antara 20-40 km. Zona 2 didominasi 680 gempa dangkal dengan kedalaman sumber antara 30-35 km. Zona 3 didominasi 188 gempa dangkal dengan kedalaman antara 30-40 km. Zona 4 didominasi 562 gempa dangkal dengan kedalaman sumber antara 60-70 km.

Informasi seismik yang bisa diperoleh jika dikaitkan dengan parameter seismik b dan a serta a (*annual*) adalah wilayah Provinsi NTB dan NTT memiliki level seismisitas dan *seismicity rates* yang relatif tinggi dengan mayoritas gempa adalah bersumber dangkal, sesuai dengan temuan terdahulu (Popandopoulus and Chatzioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sebagai tambahan, Gambar 7 memberikan konfirmasi bahwa gempa dengan sumber dalam lebih dari 300 km sangat jarang terjadi di Indonesia (Hutchings and Mooney, 2021). Secara umum, wilayah NTB dan

NTT rentan terhadap potensi bahaya bencana seismik (gempa tektonik dan tsunami) meski kekuatan gempa tidak terlalu besar).

IV. KESIMPULAN

Seismisitas dan potensi kerentanan wilayah NTB dan NTT terhadap bahaya bencana gempa tektonik dan tsunami dipelajari melalui analisis parameter a dan b . Kedua parameter dihitung melalui Hukum Gutenberg-Richter dan pendekatan *maximum likelihood* terhadap data gempa antara 1970-2021 dengan magnitudo momen $3,1 \leq M_w \leq 8,3$ dan kedalaman sampai 640 km. Secara teknis, wilayah NTB dan NTT dibagi menjadi 4 zona untuk mengakomodasi kedua sumber pemicu gempa, yaitu Flores Backarc Thrust di utara dan zona subduksi di selatan kedua provinsi. Penapisan Reasenberg dipilih untuk menyeleksi data gempa dan metode EMR digunakan untuk menentukan M_c . Hasil hitung statistik FMD menunjukkan bahwa nilai $a \sim 8-9$ dengan a (*annual*) rata-rata 6,6 merefleksikan level seismisitas yang tinggi dan nilai b bervariasi antara 1,01-1,21 menunjukkan mayoritas kejadian adalah *moderate events* ($4,5 \leq M_w \leq 7,0$). Meski gempa besar jarang terjadi, namun jalur Flores Backarc yang memanjang dari ujung barat sampai timur *off northern coasts of NTB and NTT* bisa menjadi pemicu tsunami. Dengan gempa dangkal mendominasi (rata-rata kedalaman sumber 35-40 km), maka kerentanan wilayah NTB dan NTT terhadap bahaya bencana seismik perlu diwaspadai.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan terimakasih kepada pihak USGS atas ketersediaan data sekunder gempa pada penelitian ini yang dapat diakses secara bebas melalui <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> dan pihak pengelola laman <https://arcgis.com/home/group.html> di mana ArcGIS Online Basemaps bisa diakses secara bebas pula. Terimakasih juga ditujukan kepada dua *reviewers* sekaligus dosen penguji yang telah memberikan 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 the Earthquake Research Institute*, Vol. 43, Issue. 2, 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. pp. 452-272.
- 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.
- 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. 2021. Tsunami hazard in Lombok and Bali, Indonesia due to the Flores Back-arc Thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 22, Issue. 05, 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.
- Gusman, A. R., Tanioka, Y., Matsumoto, H. and Iwasaki S. 2009. Analysis of the tsunami generated by the great 1977 Sumba earthquake that occurred in Indonesia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 4, pp. 2169-2179.
- 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.
- Hamilton, W. 1979. *Tectonics of the Indonesian Region*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1078, pp. 1-345.
- Hidayati, N., Trisnawati, Sativa, O., Wallansha, R., Sakti, A. P., Pramono, S. dan Permana, D. 2018. *Ulasan guncangan tanah akibat gempa bumi Lombok Timur*. Bidang Seismologi Teknik – BMKG.
- 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.

- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *AGU Advancing Earth and Space Science*, Vol. 22, Issue 9, pp. 1-42.
- Imamura, F., Gica, E., Takahashi, T. and Shuto, N. 1995. Numerical simulation of the 1992 Flores tsunami: Interpretation of tsunami phenomena in Northeastern Flores Island and Damage at Babi Island. *PAGEOPH*, Vol. 144, No. 3/4, pp. 555-568.
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R. and Syahbana, A. J. 2020. Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, Vol. 36, Issue S1, pp. 112-136.
- Irsyam, M. I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. 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 Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian PUPR.
- Kadirioğlu, F. T. and Kartal, R. F. 2016. The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012). *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 25, pp. 300-310.
- Kiser, E., Ishii, M., Langmuir, C. H., Shearer, P. M. and Hirose, H. 2011. Insights into the mechanism of intermediate-depth earthquakes from source properties as imaged by back projection of multiple seismic phases. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 116, B06310.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J. and Syaff'i, M. A. 2016. Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *American Geophysical Union*, Vol. 43, Issue. 5, pp. 1943-1949.
- Lynnes, C. S. and Lay, T. 1988. Source process of the great 1977 Sumba earthquake. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. B11, pp. 13407-13420.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Heuret, A. and Funiciello, F. 2016. Where giant earthquakes may come. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, No. 10, pp. 7322-7336.
- Mignan, A. 2012. Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, Issue. B08302.
- 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.
- Naylor, M., Orfanogiannaki, K. and Harte, D. 2010. Exploratory data analysis: magnitudo, space, and time. *Community Online Resource for Statistical seismicity Analysis (CORSSA)*, pp. 1-42.
- Nuannin, P., Kulhánek, O. and Persson, L. 2012. Variations of b-values preceding large earthquakes in the Andaman-Sumatra subduction zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 61, pp. 237-242.
- 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, Issue. 1, No. 030019, pp. 1-6.
- Nugraha, A. D., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Thurber, C. H., Pesicek, J. D., Zhang, H., Wiyono, S. H., Ramdhani, 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.
- Popandopoulos, G. A. and Chatzioannou, E. 2014. Gutenberg-Richter law parameters analysis using the Hellenic unified seismic network data through Fast-Bee technique. *Earth Science*, Vol. 3, No. 5, pp. 122-131.
- Pradjoko, E., Kusuma, T., Setyandito, O., Suroso, A. and Harianto, B. 2015. The tsunami run-up assessment of 1977 Sumba earthquake in Kuta, Center of Lombok, Indonesia. *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 14, pp. 9-16.
- Puspito, N. T. and Shimazaki, K. 1995. Mantle structure and seismo-tectonics of the Sunda and Banda arcs. *Tectonophysics*, Vol. 251, pp. 215-228.
- Reasenberg, P. 1985. Second-order moment of Central California seismicity. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, Issue. B7, pp. 5479-5495.

- Risanti, H., Realita, A., Fahmi, M. N., Prastowo, T., and Madlazim. 2022. A Preliminary report on seismicity declustering methods and completeness magnitude in eastern Sunda Arc. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP, Vol. 2377, 012033.
- Scholz, C. H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letter*, Vol. 42, pp. 1399-1402.
- Silver, E. A., Reed, D. and McCaffrey. 1983. Back arc thrusting in the eastern Sunda Arc, Indonesia: a consequence of arc-continent collision. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, No. B9, pp. 7429-7448.
- Sunardi, B., Istikomah, M. U., and Sulastri. 2017. Analisis seismotektonik dan periode ulang gempa bumi wilayah Nusa Tenggara Barat tahun 1973-2015. *Jurnal Riset Geofisika Indonesia*, Vol. 1, No. 1.
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., Thurber, C. H., Abdullah, C. I., Daryono, D., Wiyono, S. H., Shiddiqi, H. A. and Rosalia, S. 2020. Relocated aftershocks and background seismicity in eastern Indonesia shed light on the 2018 Lombok and Palu earthquake sequences. *Geophysical Journal International*, Vol. 221, Issue. 3, pp. 1845-1855.
- Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B. S., Widiyantoro, S., Simanjuntak, A., Palgunadi, K. H., Kurniawan, A., Marliyani, G. I., Nugraha, A. D., Daryono, Anugrah, S. D., Fatchurochman, I., Gunawan, M. T., Sadly, M., Adi, S. P., Karnawati, D. and Arimuko, A. 2022. The Kalaotoa Fault: a newly identified fault that generated the Mw 7.3 Flores Sea Earthquake. *The Seismic Record*, Vol. 2, No. 3, pp. 175-185.
- Teng, G. and Baker, J. W. 2019. Seismicity declustering and hazard analysis of the Oklahoma-Kansas region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, Issue. 6, pp. 2356-2366.
- Tocheport, A., Rivera, L. and Chevrot, S. 2007. A systematic study of source time functions and moment tensors of intermediate and deep earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B07311.
- Tsuji, Y., Matsutomi, H., Imamura, F., Takeo, M., Kawata, Y., Matsuyama, M., Takahashi, T., Sunarjo and Harjadi, P. 1995. Damage to coastal villages due to the 1992 Flores Island earthquake tsunami. *PAGEOPH*, Vol. 144, No. 3/4, pp. 481-524.
- 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, Issue. 2, pp. 37-40.
- Van Stiphout, T., Zhuang, J. and Marsan, D. 2012. Models and techniques for analyzing seismicity: Seismicity declustering. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis* (CORSSA), pp. 1-235.
- 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.
- Wiemer, S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol 72, Issue. 3, pp. 373-382.
- 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.
- Yang, X., Singh, S. C. and Tripathi, A. 2020. Did the Flores back-arc thrust rupture offshore during the 2018 Lombok earthquake sequence in Indonesia. *Geophysical Journal International*, Vol. 221, Issue. 2, pp. 758-768.