

## ANALISIS SEISMISITAS DAN POTENSI BAHAYA BENCANA SEISMIK PULAU SUMATERA BERDASARKAN DATA GEMPA 1970-2020

Nur Ika Dwi Lestari, Madlazim

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: [nur.18047@mhs.unesa.ac.id](mailto:nur.18047@mhs.unesa.ac.id)

### Abstrak

Seismisitas Sumatera dan potensi bencana gempa tektonik dapat dipelajari melalui analisis parameter *a-value*, *b-value*, dan anomali *b-value*. Nilai *a* merefleksikan level seismisitas, nilai *b* menunjukkan level stres batuan geologi bawah permukaan, dan anomali nilai *b* bisa menjadi prekursor gempa besar. Ketiga parameter tersebut secara akurat diperoleh dengan memanfaatkan statistik frekuensi-magnitudo (FMD) gempa dari katalog USGS antara 1970-2020 dengan magnitudo antara  $4,0 \leq M_w \leq 9,5$  dan kedalaman mencapai 640 km. Kurva FMD menjadi basis penerapan hukum Gutenberg-Richter melalui pendekatan *maximum likelihood*. Perhitungan ketiga parameter dilakukan dengan membagi wilayah Sumatera menjadi Zona 1, Zona 2, dan Zona 3. Hasil-hasil perhitungan untuk Zona 1:  $a = 6,02$  dan  $b = 0,76$ ; Zona 2:  $a = 6,50$  dan  $b = 0,84$ ; dan Zona 3:  $a = 6,86$  dan  $b = 0,88$ . Anomali nilai *b* untuk ketiga zona seismik dinyatakan sebagai peta variasi spasio-temporal *b-value*. Berdasarkan definisi *a-value* dan *b-value*, maka seismisitas Zona 3 (selatan Sumatera) paling tinggi dibandingkan dengan zona lain sedangkan struktur batuan bawah permukaan Zona 1 (utara Sumatera) memiliki stres paling tinggi yang relevan dengan peristiwa gempa besar yang sering terjadi. Analisis variasi spasio-temporal *b-value* menemukan kesesuaian lokasi episenter gempa besar dengan daerah-daerah yang memiliki nilai *b* yang rendah baik pada Zona 1, Zona 2 maupun Zona 3. Hal ini menunjukkan bahwa *b-drop* dapat digunakan sebagai indikator gempa besar, sama seperti temuan terdahulu yang relevan dengan seismisitas Sumatera. Analisis histogram kedalaman sumber menunjukkan bahwa mayoritas gempa Sumatera adalah gempa dangkal dengan kedalaman rata-rata dalam rentang 30-40 km. Dengan demikian, seluruh wilayah Pulau Sumatera adalah rentan terhadap potensi bahaya bencana gempa tektonik.

**Kata Kunci:** seismisitas Sumatera, *a-value*, *b-value*, anomali *b-value*, hukum Gutenberg-Richter

### Abstract

Seismicity in Sumatera and the potency for tectonic earthquakes can be examined using seismic parameters: *a-value*, *b-value*, and *b-value* anomaly. Parameter *a-value* reflects seismicity level, *b-value* indicates the level of stress on subsurface structure, and *b-value* anomaly is a precursor for a large event. The parameters were accurately calculated from USGS earthquake catalogue for frequency-magnitude distribution (FMD) in Sumatera between 1970-2020 with magnitudes  $4.0 \leq M_w \leq 9.5$  and the depths reaching 640 km beneath the surface. The FMD is a basis for the application of Gutenberg-Richter law through a maximum likelihood approach. Parameter calculation was performed by dividing Sumatera into Zone 1, Zone 2, and Zone 3. The results were for Zone 1:  $a = 6.02$  and  $b = 0.76$ ; Zone 2:  $a = 6.50$  and  $b = 0.84$ ; and Zone 3:  $a = 6.86$  and  $b = 0.88$ . The *b* anomaly was given as maps of spatio-temporal *b-value* variations. Based on *a-value* and *b-value* definitions, seismicity in Zone 3 is the highest while subsurface structure in Zone 1 shows the highest stress, relevant to frequent large occurrences in this zone. Analysis of spatial and temporal *b-value* anomalies found correlation between locations of large earthquake epicentres and regions of low-lying *b-value* in all seismic zones. This suggests that *b-drop* is a good indicator for a large event, in good agreement with previous findings relevant to Sumatera seismicity. Analysis of earthquake source reveals that shallow sources are dominant with the average depth lies between 30-40 km. Thus, the whole island is vulnerable to seismic hazards.

**Keywords:** Sumatera seismicity, *a-value*, *b-value*, *b-value* anomaly, Gutenberg-Richter law

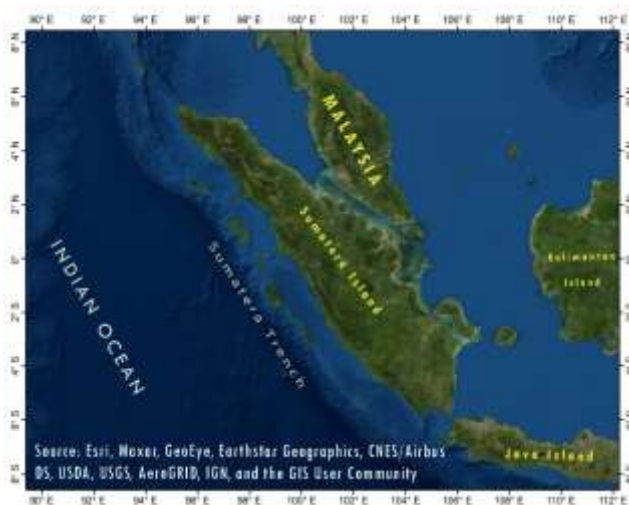
### PENDAHULUAN

Wilayah teritorial Indonesia dari barat sampai timur dikelilingi oleh beberapa lempeng tektonik aktif yang saling bertumbukan (Cummins, 2017). Implikasi tektonik pertemuan antar lempeng tersebut adalah pembentukan zona subduksi aktif sepanjang wilayah lepas pantai barat Sumatera (McCaffrey, 2009; Irsyam *et al.*, 2017; Lange *et*

*al.*, 2018) dan lepas pantai selatan Jawa (Irsyam *et al.*, 2017; Widiyantoro *et al.*, 2020), zona aktif busur belakang Flores sepanjang wilayah lepas pantai utara Bali, NTB dan NTT (Koulali *et al.*, 2016; Irsyam *et al.*, 2017), zona mikro subduksi dan busur belakang yang aktif di wilayah Papua, Maluku dan Sulawesi (Irsyam *et al.*, 2017; Watkinson and Hall, 2017).

Sebagai bagian dari Busur Sunda yang membentuk tatanan geologi dan tektonik Indonesia, Pulau Sumatera berada di dekat perbatasan antara Lempeng Indo-Australia (lempeng samudera) dan Lempeng Eurasia (lempeng benua). Dengan densitas yang lebih tinggi, Lempeng Indo-Australia bergerak menunjam miring ke arah bagian bawah Lempeng Eurasia (McCaffrey, 2009; Bradley *et al.*, 2017; Lange *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019) dengan kecepatan bisa mencapai kisaran 50-60 mm/tahun (Sieh and Natawidjaja, 2000).

Sebagai akibat penunjaman miring tersebut di atas, struktur geologi dan tektonik Sumatera didominasi oleh zona subduksi aktif dekat Palung Sumatera di lepas pantai barat Sumatera, jalur busur muka Sumatera yang melintasi beberapa pulau kecil di lepas pantai barat Sumatera, dan jalur sesar aktif di daratan Pulau Sumatera yang dikenal sebagai Sesar Besar Sumatera (Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2002; McCaffrey, 2009; Weller *et al.*, 2012; Haridhi *et al.*, 2018; Hutchings and Mooney, 2021). Jalur Sesar Besar Sumatera ini memanjang dari wilayah utara (Ito *et al.*, 2012; Muzli *et al.*, 2018; Rafie *et al.*, 2019) melewati wilayah tengah (Sahara *et al.*, 2018) sampai wilayah selatan Pulau Sumatera (Natawidjaja *et al.*, 2017). Gambaran tatanan tektonik Pulau Sumatera dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Ilustrasi Pulau Sumatera dengan tatanan tektonik didominasi oleh zona subduksi (ditandai dengan keberadaan Palung Sumatera dekat pantai barat Sumatera), busur muka dan Sesar Besar Sumatera (gambar ini dibuat dengan aplikasi ArcMap 10.8).

Aktivitas seismo-tektonik zona subduksi *megathrust* menyebabkan tekanan tektonik *over geological time* yang diakomodasi oleh Sesar Mentawai sebagai bagian dari zona seismik aktif busur muka Sumatera (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012) dan Sesar Besar Sumatera (Ito *et al.*, 2012; Natawidjaja *et al.*, 2017; Nugraha *et al.*, 2018; Sahara *et al.*, 2018) yang sejajar dengan Palung Sumatera dan pegunungan Bukit Barisan. Ketiga struktur geologi itu (zona subduksi, busur muka, dan

Sesar Besar Sumatera) adalah sumber potensial pemicu bahaya bencana geologi (gempa tektonik dan tsunami) yang mengancam wilayah pesisir dan pedalaman sisi barat dari ujung utara sampai ujung selatan Pulau Sumatera (Natawidjaja *et al.*, 2017; Gunawan *et al.*, 2018; Rafie *et al.*, 2019; Ratnasari *et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020; Triyoso *et al.*, 2020). Dengan mempertimbangkan dampak dan risiko bencana, maka studi seismisitas dan potensi bahaya bencana geologi di Pulau Sumatera adalah penting dilakukan.

Studi kegempaan suatu wilayah dapat dilakukan melalui perhitungan *a-value* dan *b-value* (Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Dalam hal ini, variasi spasial dan temporal *b-value* (variasi spasio-temporal) sering digunakan sebagai indikator atau prekursor gempa besar (Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and Singh, 2015). Oleh karena belum ada yang mempelajari level seismisitas dan potensi bencana gempa di seluruh wilayah Sumatera melalui pemetaan dan analisis *a-value*, *b-value*, dan peta variasi spasio-temporal *b-value*, maka penelitian ini dilaksanakan untuk mengisi celah tersebut.

### Hukum Gutenberg-Richter

Hukum Gutenberg-Richter (1944) mendiskripsikan distribusi gempa berbagai magnitudo yang terjadi di suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu melalui distribusi frekuensi-magnitudo (FMD) gempa. Secara matematis, hukum Gutenberg-Richter dapat dituliskan sebagai

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

dengan  $N$  adalah frekuensi kejadian dengan magnitudo  $M \geq M_c$  di mana  $M_c$  adalah *magnitude of completeness* yang didefinisikan sebagai magnitudo terkecil untuk menjamin validitas keberlakuan hukum Gutenberg-Richter. Parameter *a-value* menunjukkan level seismisitas wilayah (Amaro-Mellado and Bui, 2020) sedangkan *b-value* adalah ukuran stres batuan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016).

Wilayah dengan *b-value* yang rendah (tinggi) adalah wilayah di mana batuan bawah permukaannya mengalami stres yang tinggi (rendah). Definisi lain *b-value* adalah rasio statistik gempa kecil relatif terhadap gempa besar (Kijko and Smit, 2012; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dengan demikian, variasi spasial *b-value* dari satu wilayah ke wilayah yang lain bisa digunakan untuk melihat potensi bahaya gempa besar yang mungkin saja terjadi di wilayah tertentu pada masa yang akan datang (Singh, 2016; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Oleh karena itu, akurasi tinggi hasil perhitungan  $M_c$ , *b-value*, dan *a-value* adalah penting yang hanya bisa dicapai jika jumlah data gempa yang digunakan adalah minimal 200 kejadian (Woessner and Wiemer, 2005). Nava *et al.* (2017) juga menegaskan bahwa ada kesesuaian informasi seismik yang baik antara histogram magnitudo gempa dan kurva FMD jika dipenuhi  $N \geq 100$  kejadian.

Selain variasi spasial, pengamatan level stres batuan bawah permukaan di suatu wilayah tertentu bisa juga dilakukan dengan mengamati perubahan *b-value* untuk wilayah tersebut dari waktu ke waktu (variasi temporal). Dengan kata lain, perubahan *b-value* sebagai fungsi waktu bisa juga digunakan untuk mengamati perubahan level stres yang dialami oleh batuan bawah permukaan zona subduksi, sesar daratan, busur muka atau busur belakang. Apabila dalam kurun waktu tertentu terdapat penurunan signifikan *b-value*, maka potensi pelepasan energi seismik dalam bentuk kejadian gempa besar adalah tinggi (Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and Singh, 2015).

Dengan demikian, kombinasi pengetahuan tentang variasi spasial dan temporal *b-value* secara efektif dapat digunakan sebagai prekursor gempa (Nuannin *et al.*, 2012; Godano *et al.*, 2014; Hong *et al.*, 2020). 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 kurun waktu yang relatif singkat, *b-value* biasanya bervariasi di sekitar nilai normal  $b \approx 1$  (bisa lebih kecil atau lebih besar dari 1), bergantung pada faktor dominan dalam aktivitas seismik di sekitar wilayah yang dipelajari. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, maka penelitian ini selain menghitung *a-value* dan *b-value* juga membuat plot variasi spasio-temporal *b-value* untuk analisis seismisitas dan potensi bahaya bencana geologi di Pulau Sumatera dan sekitarnya.

## METODE

### Magnitude of Completeness

Besaran  $M_c$  adalah parameter penting (Mignan and Woessner, 2012; Diantari *et al.*, 2018) karena menjamin validitas keberlakuan relasi linier-logaritmik antara  $\log N$  dan  $M$  (hukum Gutenberg-Richter) pada persamaan (1). Dalam hal ini, estimasi akurat  $M_c$  adalah penting karena  $M_c$  yang terlalu tinggi akan mereduksi jumlah data sedangkan  $M_c$  yang terlalu rendah akan menghasilkan  $a$  dan  $b$  yang menyimpang dari nilai semestinya (Mignan and Woessner, 2012). Dalam penelitian ini,  $M_c$  dihitung dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) dan Matlab.

### Metode Maximum Likelihood

Pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) adalah metode yang banyak digunakan untuk estimasi *a-value* dan *b-value* karena tidak memperhitungkan interdependensi variabel sehingga ketidakpastian hasil akhir perhitungan  $a$  dan  $b$  dapat direduksi (Nava *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dengan demikian, hasil perhitungan  $a$  dan  $b$  bisa diperoleh dengan akurasi tinggi. Pendekatan ini mempersyaratkan distribusi statistik gempa berupa fungsi Poisson (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017).

Dalam praktek, parameter  $b$  dihitung terlebih dahulu (Mignan and Woessner, 2012) dengan menggunakan

persamaan yang dibahas oleh Aki (1965) dan diterapkan oleh Utsu (1966) untuk uji statistik perbedaan *b-value* antara dua kelompok gempa. Persamaan tersebut sering disebut sebagai persamaan Aki-Utsu,

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - (M_c - \Delta M/2)} \quad (2)$$

di mana  $\bar{M}$  adalah magnitudo rata-rata yang lebih besar atau sama dengan  $M_c$  dan  $\Delta M$  adalah *the binning interval* yang bernilai 0,1 (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Kemudian, parameter  $a$  diperoleh dari inversi persamaan (1) dengan meninjau akurasi  $M_c$  dari FMD dan *b-value* yang telah diperoleh dari persamaan (2). Hal ini secara eksplisit menunjukkan ketergantungan *a-value* pada akurasi  $M_c$  dan *b-value* (Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

### Data dan Variabel Operasional Penelitian

Data penelitian ini adalah total 11933 kejadian gempa (sebelum penapisan) di Sumatera dan sekitarnya antara 1970-2020 dengan magnitudo  $4,0 \leq M_w \leq 9,5$  dan kedalaman sumber mencapai 640 km. Data gempa tersebut diakses di <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Data tersebut diolah dengan metode *maximum likelihood* (Aki, 1965) untuk memperoleh  $M_c$ , *b-value* dan *a-value*. Teknik penapisan Gardner and Knopoff (1974) diterapkan untuk memperoleh *mainshocks* saja (1518 kejadian) dan teknik *Maximum Curvature* (Woessner and Wiemer, 2005) diterapkan untuk menjamin akurasi hasil perhitungan  $M_c$ , *b-value* dan *a-value*.

Dalam penelitian ini, variabel operasional meliputi variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Variabel manipulasi adalah magnitudo momen gempa  $M_w$  sedangkan variabel respons adalah frekuensi kejadian  $N$ . Variabel kontrol adalah metode perhitungan  $M_c$ , *b-value* dan *a-value* berbasis *maximum likelihood* (Aki, 1965) melalui pemberlakuan relasi Gutenberg-Richter (1944) dan persamaan Aki-Utsu pada persamaan (2). Dalam hal ini, penentuan  $M_c$ , *b-value* dan *a-value* di Pulau Sumatera dilakukan dengan membuat tiga zona seismik, yaitu wilayah Zona 1 (Sumatera bagian utara), Zona 2 (Sumatera bagian tengah), dan Zona 3 (Sumatera bagian selatan) seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Wilayah Zona 1 dibatasi oleh koordinat geografis  $2,0^\circ$ – $6,0^\circ$ LU dan  $92,5^\circ$ – $100,1^\circ$ BT. Wilayah Zona 2 dibatasi oleh koordinat geografis  $2,0^\circ$ LU– $2,4^\circ$ LS dan  $95,1^\circ$ – $106,3^\circ$ BT. Wilayah Zona 3 dibatasi oleh koordinat geografis  $2,4^\circ$ – $6,0^\circ$ LS dan  $98,4^\circ$ – $108,3^\circ$ BT. Detil prosedur yang sama diberlakukan dalam perhitungan  $M_c$ , *b-value* dan *a-value* untuk ketiga zona seismik tersebut.

Semua data penelitian ini diunduh dari katalog USGS yang disimpan dalam format file.csv. Data gempa dengan skala magnitudo selain  $M_w$  diubah menjadi  $M_w$  melalui teknik konversi Kadirioglu and Kartal (2016). Setelah itu, data gempa diatur sesuai format yang



ditentukan oleh ZMAP6.0 yaitu *longitude, latitude, year, month, day, magnitude, depth, hour, minute*. Tahap selanjutnya adalah menyimpan data dalam format .dat sebagai *input* dalam program aplikasi hitung ZMAP6.0 dan Matlab. Kemudian penapisan Gardner and Knopoff (1974) dilakukan untuk menghapus data *foreshocks, aftershocks* dan *swarms*.



**Gambar 2.** Peta zona seismik wilayah Pulau Sumatera (gambar ini dibuat dengan aplikasi ArcMap 10.8).

Setelah penapisan, jumlah data pada Zona 1 adalah 450 kejadian, Zona 2 adalah 518 kejadian dan Zona 3 adalah 552 kejadian. Data tersebut kemudian kembali diolah menggunakan ZMAP6.0 untuk mendapatkan *output* dalam bentuk histogram gempa, kurva FMD, estimasi  $M_c$ ,  $b$ -value dan  $a$ -value, variasi spasio-temporal  $b$ -value, dan variasi kedalaman sumber. *Output* masing-masing zona dianalisis untuk mendapatkan informasi kebencanaan yang

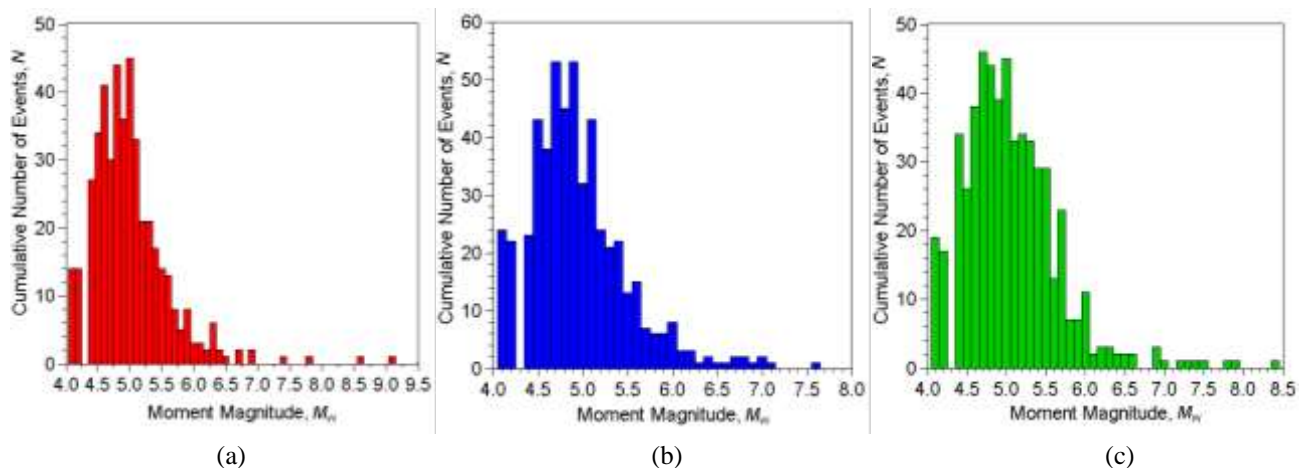
komprehensif tentang level seismisitas wilayah dan potensi bahaya bencana gempa tektonik di Sumatera.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil-hasil penelitian ini dibahas sesuai dengan urutan produk gambar yang dihasilkan oleh ZMAP6.0, yaitu (1) histogram gempa, (2) kurva FMD, (3) variasi spasial  $b$ -value, (4) variasi temporal  $b$ -value, (5) histogram kedalaman sumber. Masing-masing produk gambar dibedakan berdasarkan pembagian zona seismik, yaitu Zona 1, Zona 2 dan Zona 3 dengan analisis yang diberikan untuk setiap zona seismik. Analisis histogram gempa dan kurva FMD untuk semua zona seismik bisa memberikan gambaran level seismisitas dan level stres batuan bawah permukaan di Sumatera. Analisis variasi spasial dan temporal  $b$ -value ( $b$  anomaly) serta histogram kedalaman sumber memberikan gambaran potensi bahaya bencana gempa tektonik di Sumatera.

### Histogram Gempa

Data awal gempa berupa *mixed events (foreshocks, mainshocks, aftershocks)* diolah melalui penapisan Gardner and Knopoff (1974) menjadi *mainshocks* saja. Sesudah itu, data gempa pasca penapisan diolah dengan bantuan aplikasi ZMAP6.0 dan *spreadsheet* menjadi kelas-kelas magnitudo dengan lebar kelas masing-masing adalah 0,1 (Gambar 3). Histogram gempa adalah cara efektif untuk menunjukkan relasi distribusi magnitudo gempa dan frekuensi kejadian gempa (Singh, 2016; Yeken, 2016), di mana uji kesesuaian bentuk histogram terhadap fungsi penurunan eksponensial bisa dilakukan untuk akumulasi data gempa pasca frekuensi tertinggi.



**Gambar 3.** Plot magnitudo momen  $M_w$  terhadap jumlah kejadian gempa  $N$  pada (a) Zona 1, (b) Zona 2, dan (c) Zona 3.

Berdasarkan plot  $M_w$  terhadap  $N$  untuk semua zona seismik (Gambar 3), frekuensi tertinggi gempa berada pada interval  $4,7 \leq M_w \leq 5,0$  yang berkorelasi langsung dengan 45 kejadian gempa di Zona 1, 53 kejadian gempa di Zona 2 dan 46 kejadian gempa di Zona 3. Magnitudo terbesar selama pengamatan di Zona 1 adalah  $M_w$  9,1 sedangkan

magnitudo terbesar di Zona 2 adalah  $M_w$  7,6 dan magnitudo terbesar di Zona 3 adalah  $M_w$  8,4. Ketiga plot Gambar 3 konsisten satu sama lain karena memiliki pola histogram yang sama. Distribusi magnitudo pada ketiga plot gambar menunjukkan data statistik gempa pasca frekuensi tertinggi mengikuti penurunan eksponensial (Luen and Stark, 2012;

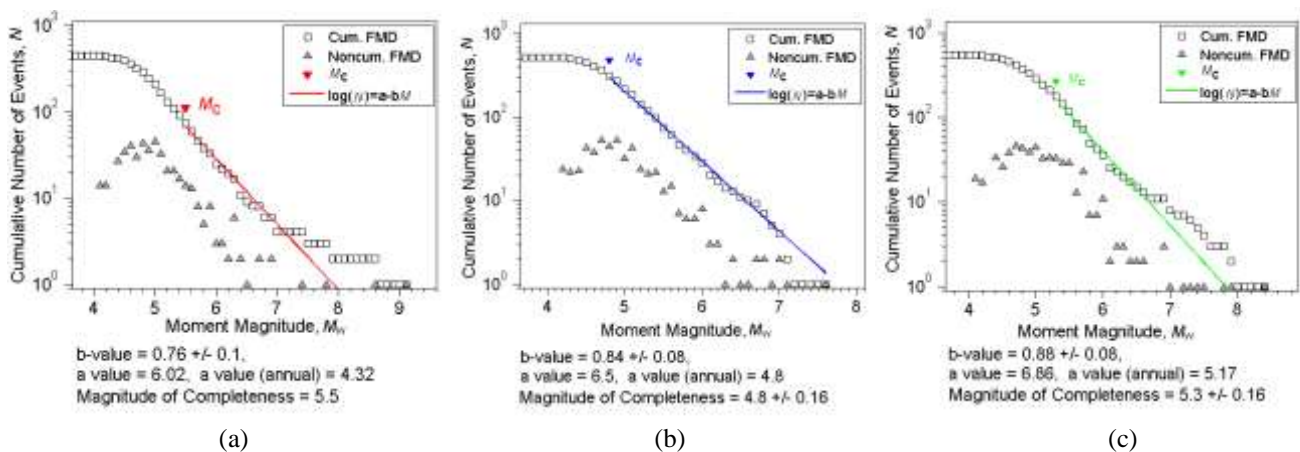
Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Penurunan eksponensial tersebut merupakan karakteristik statistik distribusi magnitudo yang memenuhi hukum Gutenberg-Richter (Nava *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Ray *et al.*, 2019; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

Estimasi  $M_c$  berdasarkan perhitungan ZMAP berbeda untuk ketiga zona mengingat karakteristik data gempa pada ketiga zona tersebut adalah berbeda. Tidak ada cara untuk memastikan bahwa nilai  $M_c$  yang diperoleh adalah benar absolut (Mignan and Woessner, 2012). Namun demikian, nilai  $M_c \approx 5,0$  untuk wilayah Indonesia masih bisa diterima (Diantari *et al.*, 2018). Oleh karena akurasi  $M_c$  menentukan akurasi  $b$  dan  $a$ , maka sensibilitas estimasi  $M_c$  bisa dilihat

dari apakah nilai  $b$  untuk masing-masing zona masuk akal atau tidak.

### Kurva FMD

Gambar 4 memberikan plot kurva FMD yang dibuat dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) dan berisi hasil perhitungan nilai  $a$  yang mendiskripsikan level seismisitas (Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) dan nilai  $b$  yang menunjukkan akumulasi stres batuan bawah permukaan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Selain itu, kurva FMD juga memberikan hasil perhitungan  $M_c$  dan  $a(\text{annual})$  yang memberikan gambaran level seismisitas per tahun selama masa pengamatan.



**Gambar 4.** Plot kurva FMD dengan estimasi  $M_c$ ,  $b\text{-value}$  dan  $a\text{-value}$  untuk (a) Zona 1, (b) Zona 2, dan (c) Zona 3.

Berdasarkan Gambar 4, hasil perhitungan nilai  $M_c$ ,  $b\text{-value}$ ,  $a\text{-value}$ , dan  $a\text{-value (annual)}$  (urutan penulisan disesuaikan dengan hasil yang diperoleh pada kurva FMD) untuk ketiga zona seismik adalah berbeda. Untuk Zona 1:  $M_c = 5,5$ ;  $b = 0,76$ ;  $a = 6,02$ ;  $a(\text{annual}) = 4,32$ ; Zona 2:  $M_c = 4,8$ ;  $b = 0,84$ ;  $a = 6,50$ ;  $a(\text{annual}) = 4,80$ ; Zona 3:  $M_c = 5,3$ ;  $b = 0,88$ ;  $a = 6,86$ ;  $a(\text{annual}) = 5,17$ . Dengan jumlah gempa yang hampir sama, pola histogram yang mirip dan nilai  $M_c$  yang tidak berbeda signifikan (dalam ketidakpastian  $\pm 0,2$ ) antara Zona 2 dan Zona 3, maka hal ini menunjukkan ada kemiripan seismisitas pada kedua zona seismik tersebut. Hal ini tidak berlaku untuk Zona 1 karena  $M_c$  diperoleh dari data yang relatif sedikit dibandingkan dengan Zona 2 dan Zona 3.

Nilai  $b \approx 0,8\text{-}0,9$  untuk ketiga zona seismik adalah lebih kecil dari nilai normal  $b = 1$  (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014). Nilai  $b$  yang relatif rendah tersebut berarti stres relatif tinggi dialami struktur batuan bawah permukaan di wilayah Sumatera (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Hal ini bisa dipahami karena wilayah Pulau Sumatera berada dekat dengan zona subduksi aktif dan busur muka Sumatera selain juga dipengaruhi oleh Sesar Besar Sumatera di daratan sebagai sumber potensial pemicu gempa tektonik (Irsyam *et al.*, 2017; Natawidjaja *et al.*, 2017; Gunawan *et al.*, 2018; Rafie *et al.*, 2019; Ratnasari

*et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020; Triyoso *et al.*, 2020).

Level seismisitas untuk ketiga zona seismik pada Gambar 4 bisa dilihat langsung dari nilai  $a$  dan  $a(\text{annual})$  atau dikenal *seismicity annual rate*. Oleh karena nilai  $a$  dan  $a(\text{annual})$  pada Zona 2 dan Zona 3 seperti ditunjukkan oleh Gambar 4(b) dan 4(c) tidak berbeda signifikan (ketidakpastian  $\pm 0,2$ ), maka ada indikasi koneksi aktivitas seismo-tektonik dan vulkano-tektonik antara kedua zona seismik tersebut (Natawidjaja *et al.*, 2017; Hutchings and Mooney, 2021).

Nilai  $a$  dan  $a(\text{annual})$  yang relatif kecil pada Zona 1 berarti level seismisitas Zona 1 adalah paling rendah. Hal ini berarti kejadian gempa relatif jarang terjadi di Zona 1 dibandingkan dengan kedua zona seismik yang lain, sesuai dengan data gempa terkumpul paling sedikit pada Zona 1. Namun, frekuensi rendah kejadian gempa memberikan waktu jeda antar gempa yang relatif lama dan hal ini bisa memicu stress tinggi pada struktur batuan bawah permukaan di Zona 1. Bukti geologi pelepasan energi seismik yang sangat besar pada Zona 1 adalah kejadian gempa Sumatra-Andaman Desember 2004 yang memicu tsunami menerjang sepanjang wilayah pantai barat Aceh (Lay *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2012; Suppasri *et al.*, 2015).

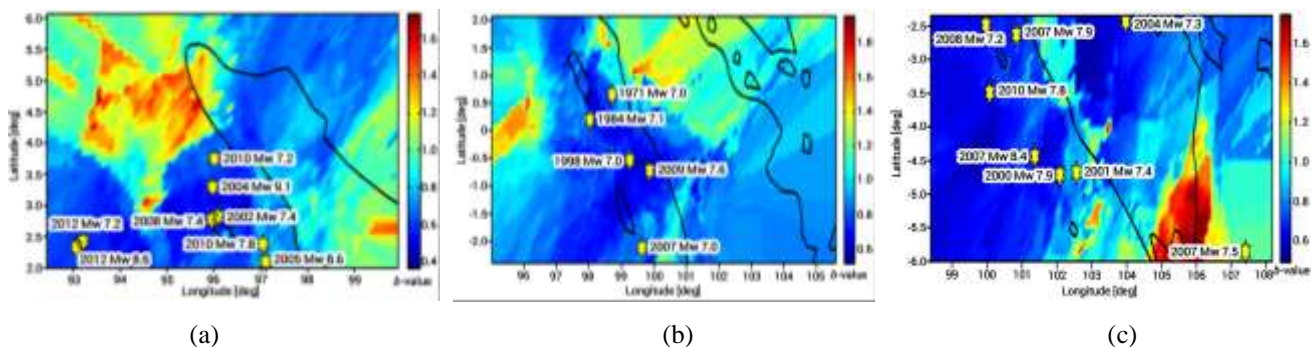
Meski Zona 2 dan Zona 3 belum pernah mengalami gempa sangat besar, namun kerentanan wilayah kedua zona terhadap bencana geologi adalah tinggi. Dengan demikian,

seluruh wilayah Sumatera dikategorikan rentan (McCaffrey, 2009; Hutchings and Mooney, 2021). Untuk melihat lebih detail area mana saja yang berpotensi mengalami bencana gempa dengan skala *megathrust*, maka diperlukan kajian distribusi spasial nilai *b*.

### Variasi Spasial *b-value*

Peta variasi spasial *b-value* dibuat dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005). Peta tersebut digunakan sebagai dasar studi potensi bahaya bencana seismik (Scholz 2015; Singh, 2016; Yeken, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Hong *et al.*,

2020; Zhu, 2021). ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) membutuhkan data minimal 200 kejadian agar resolusi gambar yang dihasilkan dapat dipercaya (Woessner and Wiemer, 2005). Oleh karena jumlah data gempa untuk Zona 1, Zona 2 dan Zona 3 lebih dari 200 kejadian, maka peta distribusi spasial *b-value* untuk ketiga zona seismik dapat diperoleh dengan resolusi tinggi dan dapat dipercaya. Berikut adalah variasi spasial *b-value* untuk Zona 1: wilayah utara Sumatera (Gambar 5a), untuk Zona 2: wilayah tengah Sumatera (Gambar 5b), dan untuk Zona 3: wilayah selatan Sumatera (Gambar 5c).



**Gambar 5.** Peta distribusi variasi spasial *b-value* untuk (a) Zona 1, (b) Zona 2, dan (c) Zona 3.

Tanda bintang berwarna kuning pada ketiga gambar menunjukkan lokasi episenter gempa dengan  $M_w \geq 7,0$ , di mana  $M_w = 9,1$  tercatat sebagai gempa *megathrust* pada Zona 1 yang memicu tsunami 26 Desember 2004 (Lay *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2012; Suppasri *et al.*, 2015; Bilek and Lay, 2018). Dua gempa sangat besar lain yang terekam pada Zona 1 adalah gempa Nias 28 Maret 2005 dengan  $M_w = 8,6$  dan gempa jauh di lepas pantai Provinsi Aceh 11 April 2012 dengan magnitudo yang sama. Ketiga gempa dikategorikan sebagai gempa *megathrust* dengan pelepasan energi seismik yang sangat besar. Hal ini bisa dipahami mengingat batuan bawah permukaan Zona 1 menyimpan akumulasi stres dalam jangka waktu yang lama ditandai dengan nilai *b* yang relatif rendah (Scholz, 2015; Rigo *et al.*, 2018).

Gempa sangat besar juga terjadi di Zona 3, yaitu gempa Bengkulu 12 September 2007 dengan  $M_w = 8,4$  yang membangkitkan gelombang tsunami (Borrero *et al.*, 2009; Ratnasari *et al.*, 2020). Gempa sangat besar pada Zona 3 bisa dipahami mengingat posisi geografis zona ini berada dekat busur muka Sumatera sepanjang kepulauan Mentawai dan persambungan Palung Sumatera-Jawa yang aktif (Hutchings and Mooney, 2021). Meskipun Zona 2 tidak/belum pernah mengalami gempa dengan  $M_w \geq 8,0$  namun beberapa kali wilayah zona ini diguncang gempa dengan lokasi episenter berada di laut yang relatif dekat dengan daratan. Hal ini karena Zona 2 berdekatan dengan busur muka Sumatera sebagai sumber pemicu gempa bawah laut (Ratnasari *et al.*, 2020; Triyoso *et al.*, 2020).

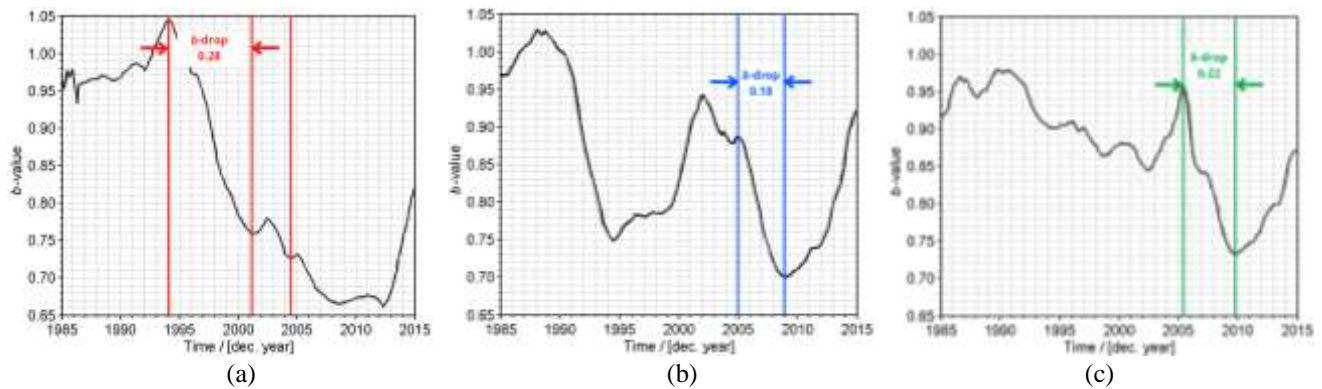
Semua gempa dengan  $M_w \geq 7,0$  dipicu oleh aktivitas tektonik zona subduksi dan busur muka Sumatera dengan

episenter di laut yang berarti bahwa wilayah pesisir barat Sumatera adalah sangat rentan mengalami bencana gempa dan tsunami (Wiseman *et al.*, 2011; Triyoso *et al.*, 2020). Gempa dengan kekuatan  $M_w < 7,0$  sering terjadi dengan lokasi episenter di daratan Pulau Sumatera yang dipicu oleh aktivitas seismik Sesar Besar Sumatera (Cummins, 2017; Irsyam *et al.*, 2017; Muzli *et al.*, 2017; Natawidjaja *et al.*, 2017; Gunawan *et al.*, 2018; Sahara *et al.*, 2018; Salman *et al.*, 2020). Pesan penting Gambar 5 adalah semua gempa besar yang terjadi di Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 berkorelasi dengan area nilai *b* yang rendah (warna biru tua dominan pada Gambar 5). Hal ini menunjukkan peran penting peta distribusi variasi spasial *b-value* dalam membantu asesmen potensi bahaya bencana seismik di suatu wilayah.

### Variasi Temporal *b-value*

Seperti halnya dengan peta variasi spasial *b-value*, maka plot variasi temporal *b-value* dibuat dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001). Plot tersebut digunakan untuk membuktikan deteksi *b-drop* yang signifikan sebelum gempa besar terjadi di suatu lokasi (Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and Singh, 2015; Zhu, 2021). Untuk hal ini, ZMAP6.0 membutuhkan minimal 200 kejadian agar level resolusi gambar yang dihasilkan dapat dipercaya (Woessner and Wiemer, 2005). Oleh karena semua zona memiliki data yang lebih banyak dari data minimal yang dibutuhkan, maka hasil plot variasi temporal *b-value* pada Gambar 6 untuk Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 dapat dipercaya. Dalam hal ini, nilai absolut *b-drop* tidak penting, nilai *b-drop* ditunjukkan hanya sekedar untuk prekursor (penanda) bahwa pelepasan energi seismik yang relatif besar akan terjadi.





**Gambar 6.** Plot variasi temporal  $b$ -value untuk (a) Zona 1, (b) Zona 2, dan (c) Zona 3.

Gambar 6a menunjukkan variasi temporal  $b$ -value untuk Zona 1 di mana nilai maksimum  $b$  adalah 1,04 pada tahun 1994 dan nilai minimumnya 0,76 pada tahun 2001 sehingga  $b$ -drop = 0,28. Penurunan nilai  $b$  yang signifikan relatif dibandingkan dengan *area of time windows* yang lain berhubungan dengan pelepasan stres dalam bentuk radiasi energi seismik dari dua pusat gempa dengan  $M_w \geq 7,0$  pada bulan Oktober dan November 2002 (Nuannin *et al.*, 2012). Namun demikian, tidak seluruh energi tersimpan dilepaskan saat kedua gempa besar jelang akhir tahun 2002 itu terjadi. Dua tahun sesudahnya, yaitu Desember 2004 gempa yang jauh lebih besar dengan kekuatan energi berlipat ( $M_w$  9,1) meluluhlantakkan pesisir barat Provinsi Aceh (Lay *et al.*, 2005), kemudian diikuti oleh gempa sangat besar ( $M_w$  8,6) dengan episenter berada dekat Nias pada bulan Maret 2005 (Ratnasari *et al.*, 2020). Kejadian dua gempa sangat besar yang didahului oleh penurunan nilai  $b$  yang signifikan itulah yang menjadi dasar kesimpulan bahwa fenomena  $b$ -drop potensial menjadi prekursor gempa besar sampai beberapa bulan bahkan tahun sebelum kejadian gempa besar terjadi (Nuannin *et al.*, 2012).

Gambar 6b menunjukkan variasi temporal  $b$ -value untuk Zona 2, di mana nilai maksimum  $b$  mencapai 0,88 tahun 2005 dan nilai minimumnya adalah 0,70 tahun 2009 sehingga  $b$ -drop = 0,18. Fenomena  $b$ -drop ini berhubungan dengan peristiwa gempa besar  $M_w$  7,6 di lepas pantai dekat Padang pada bulan September 2009 yang membuktikan korespondensi kedua hal tersebut seperti yang dilaporkan oleh peneliti terdahulu (Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and Singh, 2015).

Gambar 6c menunjukkan variasi temporal  $b$ -value untuk Zona 3, di mana nilai maksimum  $b$  mencapai 0,96 tahun 2005/2006 dan nilai minimumnya adalah 0,74 tahun 2009/2010 sehingga  $b$ -drop = 0,22. Sekali lagi, fenomena  $b$ -drop ini memiliki kesesuaian waktu dengan dua peristiwa gempa besar yang memicu gelombang tsunami di wilayah pesisir barat Pulau Sumatera bagian tengah dan selatan (perbatasan antara Provinsi Sumatera Barat dan Bengkulu), yaitu gempa Bengkulu dengan kekuatan  $M_w$  8,4 pada bulan

September 2007 (Borrero *et al.*, 2009; Ratnasari *et al.*, 2020) dan gempa Mentawai dengan kekuatan  $M_w$  7,8 pada bulan Oktober 2010 (Ratnasari *et al.*, 2020). Ketiga plot variasi temporal  $b$ -value pada Gambar 6 tersebut menunjukkan bahwa fenomena  $b$ -drop bisa digunakan sebagai salah satu indikator yang baik untuk peristiwa gempa besar yang akan terjadi, sesuai dengan pengukuran  $b$ -value yang diperoleh dari berbagai belahan dunia (Nuannin *et al.*, 2012; Godano *et al.*, 2014; Prasad and Singh, 2015; Hong *et al.*, 2020; Zhu, 2021).

### Histogram Kedalaman Sumber

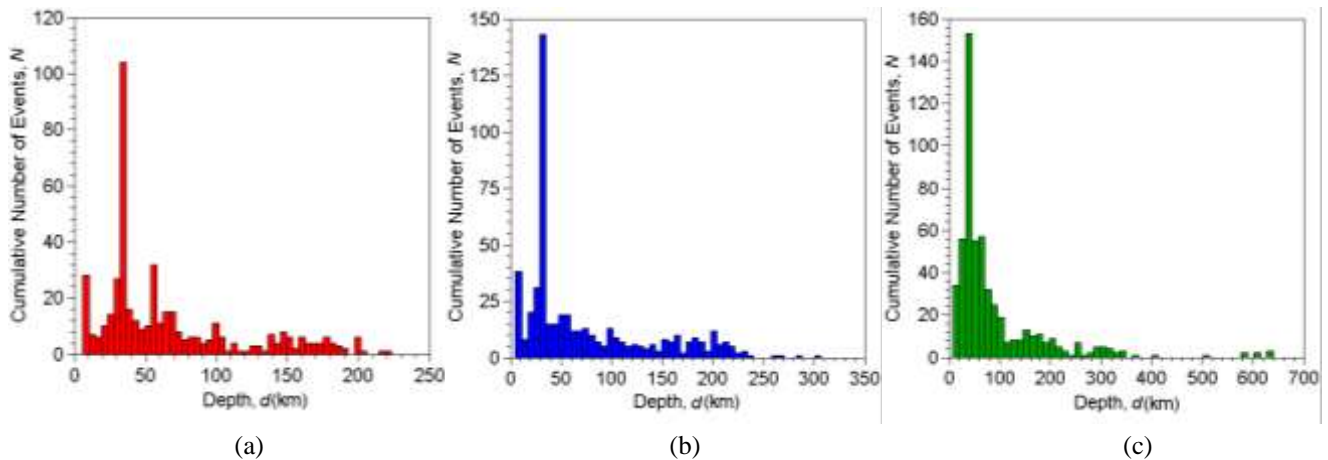
Histogram kedalaman sumber gempa perlu dibuat untuk memetakan distribusi frekuensi kejadian gempa yang terjadi pada wilayah tertentu. Untuk memudahkan analisis, maka penelitian ini mengacu pada klasifikasi gempa yang menurut penelitian terdahulu (Meng *et al.*, 2014; Warren *et al.*, 2015; Hutchings and Mooney, 2021; Zhang *et al.*, 2021) bahwa gempa dibagi menjadi tiga berdasarkan kedalaman, yaitu *shallow* (0-70 km), *intermediate* (70-300 km) dan *deep* (> 300 km) *sources*.

Untuk memastikan kedalaman sumber gempa yang terjadi di Sumatera (daratan pulau dan laut di sekitarnya), maka dibuat histogram kedalaman sumber dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001). Ketiga histogram kedalaman sumber pada Gambar 7a, 7b, dan 7c menunjukkan bahwa mayoritas gempa adalah *shallow events* dengan  $d < 70$  km. Sebagai contoh, 104 gempa dangkal frekuensi tertinggi terjadi di Zona 1 (Gambar 7a), 143 gempa dangkal frekuensi tertinggi terjadi di Zona 2 (Gambar 7b), dan 153 gempa dangkal frekuensi tertinggi terjadi di Zona 3 (Gambar 7c) dengan kedalaman rata-rata dalam rentang 30-40 km.

Gambar 7 menunjukkan sumber gempa dangkal yang mendominasi gempa di wilayah Sumatera, sesuai dengan laporan penelitian terkini (Hutchings and Mooney, 2021) yang merekam bahwa gempa dangkal mendominasi (~80%) frekuensi kejadian gempa di Indonesia. Hal ini wajar karena gempa di wilayah Sumatera biasanya dipicu oleh *interplate earthquake* (dengan sumber tektonik *megathrust* sepanjang zona subduksi Sumatera – perbatasan antara Lempeng Indo-

Australia dan Lempeng Eurasia), busur muka Sumatera atau Sesar Mentawai dan *intraplate earthquake* (dengan sumber tektonik sepanjang jalur Sesar Besar Sumatera di daratan). Temuan ketiga plot kedalaman sumber pada Gambar 7a, 7b,

dan 7c tersebut sesuai dengan klaim terdahulu (Bilek and Lay, 2018) yang menemukan area aktif di bawah permukaan yang cenderung bersifat labil dan berpotensi memicu gempa (*shallow seismogenic areas*).



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

Gempa tektonik *intermediate* ( $70 \text{ km} < d < 300 \text{ km}$ ) relatif jarang terjadi dibandingkan dengan gempa dangkal baik pada Zona 1, Zona 2 maupun Zona 3. Gempa tipe ini memiliki hiposenter sepanjang *subducting slab* yang masuk zona Wadati-Benioff untuk seismisitas Busur Sunda dekat Palung Sumatera-Java (Špičák *et al.*, 2007). Gempa tipe ini juga dikenal sebagai *intraslab earthquake* (Leyton *et al.*, 2009) sesudah mengamati perbedaan kedalaman sumber *interplate* dan *intraplate events* yang terjadi di Chili. Gempa *intraslab* bisa mencapai kekuatan  $M_w$  7,6 seperti terjadi di lepas pantai dekat kota Padang tanggal 30 September 2009 dengan kedalaman sumber  $\sim 80 \text{ km}$  (Wiseman *et al.*, 2012). Episenter gempa ini terlihat pada Gambar 5b (Zona 2).

Ketiga plot histogram pada Gambar 7 memberikan gambaran bahwa gempa dengan sumber dalam lebih dari 300 km amat sangat jarang terjadi di Indonesia (Hutchings and Mooney, 2021) bahkan di berbagai belahan dunia yang lain sekalipun (Houston, 2015). Gempa ini tidak tercatat pernah terjadi di Zona 1 (Gambar 7a), sangat jarang terjadi di Zona 2 (Gambar 7b), dan relatif sering terjadi di Zona 3 dibandingkan dengan Zona 1 dan Zona 2. Salah satu faktor pemicu gempa dalam relatif sering terjadi di Zona 3 adalah karena Zona 3 mencakup wilayah selatan Sumatera yang dekat dengan persambungan antara zona subduksi Sumatera dan zona subduksi Jawa (Špičák *et al.*, 2007; Nugraha *et al.*, 2018). Secara umum, wilayah Sumatera dan sekitarnya adalah rentan terhadap potensi bahaya bencana seismik karena mayoritas gempa adalah bersumber dangkal  $< 70 \text{ km}$  dengan kedalaman rata-rata dalam rentang 30-40 km yang cenderung merusak karena berada dekat permukaan.

## KESIMPULAN

Penelitian seismisitas dan potensi bencana seismik Pulau Sumatera dilakukan dengan analisis  $a$ -value,  $b$ -value, dan anomali  $b$ -value. Keakuratan hasil perhitungan dijamin

melalui penerapan Hukum Gutenberg-Richter dan metode *maximum likelihood* terhadap katalog USGS 1970-2020 dengan magnitudo  $4,0 \leq M_w \leq 9,5$  dan kedalaman sumber sampai 640 km. Ketiga parameter tersebut dihitung dengan membagi Sumatera menjadi Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 dengan hasil untuk Zona 1:  $a = 6,02$  dan  $b = 0,76$ ; Zona 2:  $a = 6,50$  dan  $b = 0,84$ ; dan Zona 3:  $a = 6,86$  dan  $b = 0,88$ . Anomali  $b$ -value identik dengan variasi spasio-temporal  $b$ -value. Hasil-hasil penelitian ini adalah sebagai berikut. Wilayah selatan Sumatera (Zona 3) memiliki seismisitas paling tinggi sedangkan wilayah utara Sumatera (Zona 1) memiliki tingkat stres batuan yang paling tinggi. Melalui analisis variasi spasio-temporal  $b$ -value dibuktikan bahwa  $b$ -drop dapat digunakan sebagai prekursor gempa besar. Mayoritas gempa tektonik yang terjadi di wilayah Sumatera dipicu oleh aktivitas sumber dangkal dengan pusat gempa rata-rata berada pada kedalaman 30-40 km yang relatif dekat dengan permukaan. Oleh karena itu, seluruh wilayah Sumatera rentan terhadap potensi bahaya bencana gempa yang dipicu oleh aktivitas seismo-tektonik zona subduksi dekat Palung Sumatera, busur muka Sumatera sepanjang Sesar Mentawai, dan Sesar Besar Sumatera di daratan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada USGS yang telah mengelola katalog gempa tektonik yang digunakan dalam penelitian ini yang dapat diakses bebas di <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Terimakasih juga ditujukan kepada *reviewers* yang memberikan penilaian 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., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G. and Martínez-Álvarez, F. 2017. Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, Vol. 717, pp. 449-472.
- Amaro-Mellado, J. L. and Bui, D. T. 2020. GIS-based mapping of seismic parameters for the Pyrenees. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 9(7), No. 452, pp. 1-21.
- Bilek, S. L. and Lay, T. 2018. Subduction zone megathrust earthquakes. *Geosphere*, Vol. 14, No. 4, pp. 1488-1500.
- Borrero, J. C., Weiss, R., Okal, E. A., Hidayat, R., Suranto., Arcas, D. and Titov, V. V. 2009. The tsunami of 2007 September 12, Bengkulu Province, Sumatra, Indonesia: post-tsunami field survey and numerical modelling. *Geophysical Journal International*, Vol. 178, No. 1, pp. 180-194.
- Bradley, K. E., Feng, L., Hill, E. M., Natawidjaja, D. H. and Sieh, K. 2017. Implications of the diffuse deformation of the Indian Ocean lithosphere for slip partitioning of oblique plate convergence in Sumatra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, No. 1, pp. 572-591.
- 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.
- Diantari, H. C., Suryanto, W., Anggraini, A., Irnaka, T. M., Susilanto, P. and Ngadmanto, D. 2018. Preliminary magnitude of completeness quantification of improved BMKG catalog (2008-2016) in Indonesian region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 132, No. 012026.
- Gardner, J. K. and Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks remove, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 64, No. 5, pp. 1363-1367.
- Godano, C., Lippiello, E. and de Arcangelis, L. 2014. Variability of the b value in the Gutenberg-Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, No. 3, pp. 1765-1771.
- Gui, Z., Bai, Y., Wang, Z. and Li, T. 2019. Seismic b-value anomalies in the Sumatran region: seismotectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 173, pp. 29-41.
- Gunawan, E., Widiyantoro, S., Rosalia, S., Daryono, M. R., Meilano, I., Supendi, P., Ito, T., Tabei, T., Kimata, F., Ohta, Y. and Ismail, N. 2018. Co-seismic slip distribution of the 2 July 2013 Mw 6.1 Aceh, Indonesia, earthquake and its tectonic implication. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 108, No. 4, pp. 1918-1928.
- Gutenberg, R. and Richter, C. F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 34, pp. 185-188.
- Haridhi, H. A., Huang, B. S., Wen, K. L., Denzena, D., Prasetyo, R. A. and Lee, C. S. 2018. A study of large earthquakes sequences in the Sumatra subduction zone and its possible implications. *Terrestrial Atmosphere and Oceanic Sciences*, Vol. 29, No. 6, pp. 635-652.
- 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.
- Hong, T. K., Park, S., Lee, J. and Kim, W. 2020. Spatiotemporal seismicity evolution and seismic hazard potentials in the western East Sea (Sea of Japan). *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, pp. 3761-3774.
- Houston, H. 2015. *Deep Earthquakes, in Treatise on Geophysics* 2nd Ed., 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. I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., 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.
- Ito, T., Gunawan, E., Kimata, F., Tabei, T., Simons, M., Meilano, I., Agustian., Ohta, Y., Nurdin, I. and Sugiyanto, D. 2012. Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117.
- 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.
- Kijko, A. and Smit, A. 2012. Extension of the Aki-Utsu b-value estimator for incomplete catalogs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 102, No. 3, pp. 1283-1287.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J. and Syafi'i, M. A. 2016. Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 1943-1949.
- Lange, D., Tilmann, F., Henstock, T., Rietbrock, A., Natawidjaja, D. and Kopp, H. 2018. Structure of the central Sumatran subduction zone revealed by local earthquake travel-time tomography using an amphibious. *Solid Earth*, Vol. 9, No. 4, pp. 1035-1049.
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Nettles, M., Ward, S.

- N., Aster, R. C., Beck, S. L., Bilek, S. L., Brudzinski, M. R., Butler, R., DeShon, H. R., Ekström, G., Satake, K. and Sipkin, S. 2005. The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004. *Science*, Vol. 308.
- Leyton, F., Ruiz, J., Campos, J., and Kausel, E. 2009. Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: a theoretical and observational comparison. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 175, pp. 37-46.
- Luen, B and Stark, P. B. 2012. Poisson tests of declustered catalogues. *Geophysical Journal International*, Vol. 189, pp. 691-700.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Heuret, A. and Funiciello, F. 2016. Where giant earthquakes may come. *AGU Publications, Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, No. 10, pp. 7322-7336.
- McCaffrey, R. 2009. The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 37, pp. 345-366.
- Meng, L., Ampuero, J. P. and Bürgmann R. 2014. The 2013 Okhotsk deep-focus earthquake: rupture beyond the metastable olivine wedge and thermally controlled rise time near the edge of a slab. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, pp. 3779-3785.
- Mignan, A. and Woessner, J. 2012. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi: 10.5078/corssa-00180805.
- Mukti, M. M., Singh, S. C., Deighton, I., Hananto, N. D., Moeremans, R. and Permana, H. 2012. Structural evolution of backthrusting in the Mentawai fault zone, offshore Sumatran forearc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 13, No. 12.
- Muzli, M., Umar, M., Nugraha, A. D., Bradley, K. E., Widiyantoro, S., Erbas, K., Jousset, P., Rohadi, S., Nurdin, I. and Wei, S. 2018. The 2016 Mw 6.5 Pidie Jaya, Aceh, North Sumatra, earthquake: reactivation of an unidentified sinistral fault in a region of distributed deformation. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 5, pp. 1761-1772.
- Natawidjaja, D. H. 2002. *Neotectonics of the Sumatran Fault and Paleogeodesy of the Sumatran Subduction Zone*. Thesis. California: California Institute of Technology at Pasadena, pp. 1-289.
- Natawidjaja, D. H., Bradley, K., Daryono, M. R., Aribowo, S. and Herrin, J. 2017. Late quaternary eruption of the Ranau caldera and new geological slip rates of the Sumatran Fault Zone in the southern Sumatra, Indonesia. *Geoscience Letters*, Vol. 21, No. 4.
- Nava, F. A., Márquez-Ramírez, V. H., Zúñiga, F. R., Ávila-Barrientos, L. and Quintero, C. B. 2017. Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, Vol. 21, pp. 127-135.
- Nuannin, P., Kulhanek, O. and Persson L. 2012. Variations of b-values preceding large earthquake in Andaman-Sumatra subduction zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 61, pp. 237-242.
- 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 Arch in Indonesia, using a 3D seismic-velocity model. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A.
- Prasad, S. and Singh, C. 2015. Evolution of b-values before large earthquakes of  $m_b \geq 6.0$  in the Andaman region. *Geologica Acta*, Vol. 13, No. 3, pp. 205-210.
- Rafie, M. T., Sahara, D. P., Widiyantoro, S. and Nugraha, A. D. 2019. Impact on the 2004 Sumatra-Andaman earthquake to the stress heterogeneity and seismicity pattern in northern Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 318.
- Ratnasari, R. N., Tanioka, Y. and Gusman, A. R. 2020. Determination of source models appropriate for tsunami forecasting: application to tsunami earthquakes in central Sumatra, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, pp. 2551-2562.
- Ray, S., Alam, Md. J. B., Haque, M., Das, S. K., Tanmoy, B. B. and Hasan, Md. N. 2019. A study on b-value and investigation of seismic hazard in Sylhet seismic region, Bangladesh using Gumbel's extreme value distribution method. *SN Applied Sciences: A Springer Nature Journal*, Vol. 1, No. 435.
- 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.
- Sahara, D. P., Widiyantoro, S. and Irsyam, M. 2018. Stress heterogeneity and its impact on seismicity pattern along the equatorial bifurcation zone of the Great Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Asian Earth Science*, Vol. 164, pp. 1-8.
- Salman, R., Lindesey, E. O., Feng, L., Bradley, K., Wel, S., Wang, T., Daryono, M. R. and Hill, E. M. 2020. Structural controls on rupture extent of recent Sumatran Fault Zone earthquakes, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 125, No. 2.
- Scholz, C. H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b-value. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, pp. 1399-1402.
- Sieh, K. and Natawidjaja, D. 2000. Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B12, pp. 28295-28326.
- Singh, S. C., Hananto, N. D., Chauhan, A. P. S., Permana, H., Denolle, M., Hendriyana, A. and Natawidjaja, D. 2010. Evidence of active backthrusting at the NE margin of Mentawai Islands, SW Sumatra. *Geophysical Journal International*, Vol. 180, pp. 703-714.
- Singh, C. 2016. Spatial variation of seismic b-values across the NW Himalaya. *Geomatics, Natural Hazards and*

*Risk*, Vol. 7, No. 2, pp. 522-530.

- Špičák, A., Hanuš, V. and Vaněk, J. 2007. Earthquake occurrence along the Java trench in front of the onset of the Wadati-Benioff zone: Beginning of a new subduction cycle?. *Tectonics*, Vol. 26, pp. 1- 16.
- Suppasri, A., Goto, K., Muhari, A., Ranasinghe, P., Riyaz, M., Affan, M., Mas, E., Yasuda, M. and Imamura, F. 2015. A decade after the 2004 Indian Ocean tsunami: the progress in disaster preparedness and future challenges in Indonesia, Sri Lanka, Thailand and the Maldives. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, pp. 3313-3341.
- Tormann, T., Wiemer, S. and Mignan, A. 2014. Systematic survey of high-resolution *b* value imaging along Californian faults: inference on asperities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 119, pp. 2029-2054.
- Triyoso, W., Suwondo, A., Yudistira, T. and Sahara, D. P. 2020. Seismic hazard function (SHF) study of coastal sources of Sumatra Island: SHF evaluation of Padang and Bengkulu cities. *Geosciences Letters*, Vol. 7, No. 2.
- 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.
- Warren, L. M., Baluyut, E. C., Osburg, T., Lisac, K. and Kokkinen S. 2015. Fault plane orientations of intermediate-depth and deep-focus earthquakes in the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 120, Issue 12, pp. 8366–8382.
- 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.
- Weller, O., Lange, D., Tilmann, F., Natawidjaja, D., Rietbrock, A., Collings, R. and Gregory, L. 2012. The structure of the Sumatran Fault revealed by local seismicity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L01306.
- 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. *Nature: Scientific Reports*, Vol. 10, 15274.
- Wiemer, S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol. 72, No. 3, pp. 373-382.
- Wiseman, K., Banerjee, P., Sieh, K., Bürgmann, R. and Natawidjaja, D. H. 2011. Another potential source of destructive earthquake and tsunami offshore of Sumatra. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No.10.
- Wiseman, K., Banerjee, P., Bürgmann, R., Sieh, K., Dreger, D. S. and Hermawan, I. 2012. Source model of the 2009 Mw 7.6 Padang intraslab earthquake and its effect on the Sunda megathrust. *Geophysical Journal International*, Vol. 190, No. 3, pp. 1710-1722.
- 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, No. 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 Mw 8.3 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, No. 521220, pp. 1-13.
- Zhu, S. 2021. Estimation of seismic hazard around the Ordos block of China based on spatial and temporal variations of *b*-values. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 12, No. 1, pp. 2048-2069