

ANALISIS SEISMISITAS DAN POTENSI BAHAYA BENCANA SEISMIK DI WILAYAH SELATAN PULAU SUMATERA

Intan Novia Sari, Tjipto Prastowo

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

Email: intannovia.18002@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Potensi bencana gempa di wilayah selatan Sumatera dapat dipelajari melalui studi seismisitas wilayah dengan menghitung a -value untuk mendiskripsikan level seismisitas dan b -value untuk mendiskripsikan stres batuan geologi bawah permukaan. Data penelitian ini adalah statistik magnitudo antara $3,5 \leq M_w \leq 8,4$ selama tahun 1970-2021 dengan kedalaman gempa mencapai 640 km yang bisa diakses melalui laman <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Perhitungan a -value dan b -value dilakukan dengan membagi wilayah selatan Sumatera menjadi Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 dengan hasil-hasil untuk Zona 1: $a = 6,40$ dan $b = 0,83$; Zona 2: $a = 6,78$ dan $b = 0,91$; dan Zona 3: $a = 6,15$ dan $b = 1,05$. Berbeda dengan nilai a dan b , anomali b tidak dinyatakan sebagai angka melainkan dalam bentuk peta variasi spasial b -value. Analisis hasil-hasil perhitungan a dan b untuk ketiga zona seismik menunjukkan bahwa seismisitas Zona 2 paling tinggi karena aktivitas seismo-tektonik sepanjang transisi zona subduksi Sumatera menuju zona subduksi Jawa. Seismisitas Zona 1 juga relatif tinggi dipicu oleh aktivitas serupa sepanjang zona subduksi dekat Palung Sumatera dan Sesar Besar Sumatera. Hal ini berarti wilayah barat Sumatera bagian selatan lebih rentan terhadap potensi bencana gempa tektonik. Analisis variasi spasial b -value menemukan wilayah selatan Sumatera dengan b -value yang rendah bertepatan dengan saat gempa besar yang memicu gelombang tsunami pada tanggal 12 September 2007. Hasil-hasil penelitian ini sama dengan temuan terdahulu yang relevan dengan studi seismisitas Pulau Sumatera.

Kata Kunci: seismisitas wilayah selatan Sumatera, a -value, b -value, anomali b -value

Abstract

The potency for earthquakes hazards in southern Sumatera can be examined by calculating a -value used to describe seismicity and b -value used to describe subsurface rock stress. The data for this study are earthquake moment magnitudes between $3,5 \leq M_w \leq 8,4$ during the years of 1970-2021 with depths reaching to 640 km accessed at <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Calculation was performed by dividing the southern Sumatera into Zone 1, Zone 2, and Zone 3 with the results were for Zone 1: $a = 6.40$ and $b = 0.83$; Zona 2: $a = 6.78$ and $b = 0.91$; and Zona 3: $a = 6.15$ and $b = 1.05$. Different from a -value and b -value, the b anomaly was not represented in numbers but it was given in the spatial variation of b -value. Analysis showed that seismicity in Zone 2 is the highest due to seismo-tectonic activity along transition from Sumatera to Java subduction zone. Seismicity in Zone 1 is also relatively high triggered by similar activity along the subduction zone near the Sumatran Trench and the Great Sumatran Fault. It means that the western part of the southern Sumatera is more vulnerable to tectonic earthquake potential. The analysis of spatial variations of the b -value found that regions of low b -value corresponded to a large earthquake that generated tsunami on September 12, 2007. The current results are consistent with previous finding for Sumatera seismicity.

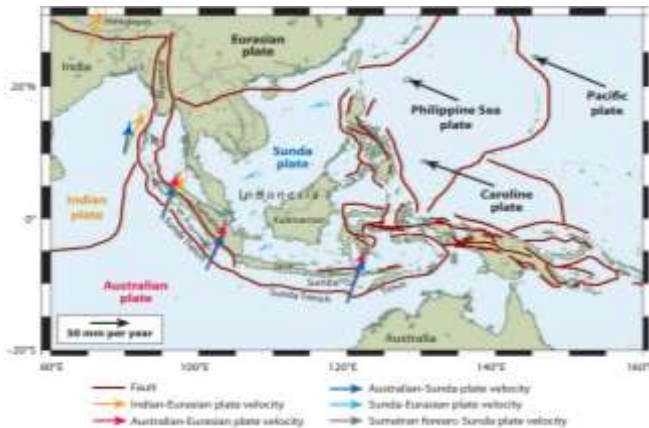
Keywords: southern Sumatera seismicity, a -value, b -value, b -value anomaly

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara rawan bencana geologi dengan kondisi tektonik yang kompleks dan aktivitas seismik yang tinggi (Cummins, 2017; Hutchings and Mooney, 2021). Hal ini karena wilayah teritorial Indonesia berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Tumbukan ketiga lempeng tektonik besar tersebut membentuk zona subduksi yang meliputi lepas pantai barat Pulau Sumatera (McCaffrey, 2009; Lange *et al.*, 2018), lepas pantai selatan Pulau Jawa (Widiyantoro *et al.*, 2020) hingga Laut Banda

(Irsyam *et al.*, 2017; Watkinson and Hall, 2017). Kehadiran zona subduksi tersebut menjadi salah satu dari tiga sumber gempa tektonik di Indonesia, khususnya Pulau Sumatera. Selain zona subduksi, kehadiran jalur sesar aktif di daratan Pulau Sumatera yang dikenal dengan Sesar Besar Sumatera (Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2002; McCaffrey, 2009; Weller *et al.*, 2012; Gui *et al.*, 2019) dan jalur busur muka Sumatera yang diakomodasi dalam wujud Sesar Mentawai (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012) juga menjadi sumber pemicu gempa. Dengan demikian, Pulau Sumatera adalah wilayah teritorial

Indonesia yang rawan terhadap bahaya bencana seismik dari tiga sumber gempa. Kondisi tektonik Pulau Sumatera dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi tektonik wilayah territorial Indonesia dari barat sampai timur di mana Pulau Sumatera merupakan perpotongan dari Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia (sumber: McCaffrey, 2009).

Proses konvergensi geologi dalam rentang waktu jutaan tahun membentuk Sesar Besar Sumatera yang berorientasi paralel terhadap geometri Pulau Sumatera, membentang dari ujung utara Pulau Sumatera sampai Teluk Semangko di ujung selatan Pulau Sumatera (Ito *et al.*, 2012; Natawidjaja *et al.*, 2017; Nugraha *et al.*, 2018). Selain itu, Sesar Mentawai sebagai bagian dari jalur seismik aktif busur muka Sumatera dekat Palung Sumatera memanjang dari kepulauan Nias sampai dekat Selat Sunda (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012). Dengan mempertimbangkan ancaman seismik bagi populasi di wilayah ujung utara sampai selatan Pulau Sumatera dan sekitarnya (Gunawan *et al.*, 2018; Ratnasari *et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020; Triyoso *et al.*, 2020), maka penelitian seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik di wilayah selatan Sumatera adalah penting. Alasan utama pemilihan wilayah selatan Sumatera sebagai target penelitian adalah karena jumlah penelitian di wilayah tersebut masih sedikit. Wilayah selatan Sumatera meliputi Bengkulu, Lampung, dan Sumatera Selatan.

Sebagai salah satu upaya mengurangi risiko bencana di wilayah selatan Sumatera, studi seismisitas dan potensi bencana seismik dilakukan melalui penentuan *b-value* dan *a-value* dengan bantuan statistik frekuensi dan magnitudo gempa di wilayah selatan Sumatera. Analisis data statistik gempa yang diperoleh bisa dilakukan melalui penerapan hukum Gutenberg-Richter (Gutenberg and Richter, 1944; Godano *et al.*, 2014; Amaro-Mellado *et al.*, 2017).

Hukum Gutenberg-Richter

Seismisitas bisa dipelajari melalui distribusi statistik frekuensi-magnitudo (FMD) gempa yang terjadi selama kurun waktu tertentu. Secara matematis, hal ini dipelajari melalui hukum Gutenberg-Richter (1944) sebagai berikut,

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

di mana N adalah frekuensi gempa dengan $M \geq M_c$ yang terjadi pada suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dalam hal ini, M_c adalah *magnitude of completeness*, batas bawah jangkauan magnitudo, sedangkan a dan b adalah konstanta penting dalam studi potensi bencana seismik (Godano *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016).

Parameter Seismik

Salah satu parameter yang dihitung secara akurat dalam penelitian ini adalah M_c untuk menjamin validitas hukum Gutenberg-Richter (Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012; van Stiphout *et al.*, 2012; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Secara teknis, penentuan M_c dilakukan dengan bantuan metode *maximum curvature* untuk memperoleh hasil yang lebih cepat (Woessner and Wiemer, 2005).

Selain M_c , studi seismisitas wilayah bisa ditentukan melalui parameter *a-value* dan *b-value* (Marzocchi *et al.*, 2016; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Parameter *a-value* mendiskripsikan seismisitas wilayah (Amaro-Mellado *et al.*, 2017) sedangkan parameter *b-value* mendiskripsikan heterogenitas batuan bawah permukaan yang mengisi lapisan kerak Bumi (Godano *et al.*, 2014). Parameter *b-value* bisa pula berfungsi sebagai indikator kegempaan bila didefinisikan sebagai frekuensi kejadian gempa kecil relatif terhadap gempa besar (Kijko and Smit, 2012; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dengan demikian, *b-value* bisa digunakan sebagai ukuran potensi gempa besar sehingga anomali *b-value* berfungsi sebagai prekursor gempa besar (Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and Singh, 2015).

METODE

Metode Maximum Likelihood

Metode *maximum likelihood* (Aki, 1965) adalah metode yang digunakan untuk estimasi *b-value* dan *a-value* dalam relasi Gutenberg-Richter berdasarkan probabilitas yang paling mungkin (Mignan and Woessner, 2012). Metode ini mengasumsikan distribusi data statistik gempa bersifat eksponensial (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Parameter *b-value* dihitung terlebih dahulu menurut persamaan Aki-Utsu,

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

di mana \bar{M} adalah magnitudo rata-rata untuk data gempa $M \geq M_c$ dan $\Delta M = 0,1$ adalah nilai *binning interval* pada magnitudo tersebut (Nava *et al.*, 2017). Kemudian, *a-value* dapat ditentukan dari inversi persamaan (1).

Data dan Variabel Operasional Penelitian

Data penelitian adalah 3893 data kejadian gempa di wilayah selatan Sumatera antara tahun 1970-2021 dengan magnitudo antara $3,5 \leq M_w \leq 8,4$ dan kedalaman gempa

mencapai 640 km yang diperoleh dari katalog *United States Geological Survey* (USGS) bisa diakses gratis dari laman <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Pemfilteran data gempa (van Stiphout *et al.*, 2012; Amaro-Mellado and Bui, 2020) dilakukan dengan membuang data *foreshocks* dan *aftershocks* untuk meningkatkan akurasi hasil perhitungan nilai M_c , b -value, dan a -value di wilayah selatan Sumatera. Teknik penapisan yang dipilih adalah teknik Gardner and Knopoff (1974).

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Variabel manipulasi adalah zona penelitian dan magnitudo momen M_w . Variabel kontrol adalah *maximum likelihood* (Aki, 1965) yang digunakan untuk perhitungan a -value dan b -value melalui hukum Gutenberg-Richter (1944) dan persamaan Aki-Utsu. Variabel respons adalah distribusi frekuensi kejadian N atau nilai log N , variasi spasial b -value.

Dalam penelitian ini, wilayah selatan Sumatera dibagi menjadi tiga zona seismik, yaitu Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 (Gambar 2).



Gambar 2. Peta zonasi seismik wilayah selatan Sumatera.

Wilayah geografis Zona 1 adalah $2^{\circ}0' - 6^{\circ}0' \text{LS}$ dan $98^{\circ}0' - 102^{\circ}40' \text{BT}$ sedangkan Zona 2 adalah $4^{\circ}0' - 6^{\circ}0' \text{LS}$ dan $102^{\circ}40' - 108^{\circ}30' \text{BT}$ serta Zona 3 adalah $2^{\circ}0' - 4^{\circ}0' \text{LS}$ dan $102^{\circ}40' - 108^{\circ}30' \text{BT}$. Seluruh prosedur perhitungan ketiga parameter seismik berlaku untuk semua pembagian wilayah zona seismik tersebut.

Seluruh data gempa 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). Data statistik gempa tersebut kemudian disesuaikan dengan format penulisan yang ditentukan oleh ZMAP6.0 yaitu *longitude, latitude, year, month, day, magnitude, depth, hour, minute*. Setelah tahap penyesuaian ini, data disimpan dalam format file.dat sebagai *input* dalam program ZMAP6.0 dengan bantuan Matlab.

Data diolah dengan teknik penapisan Gardner and Knopoff (1974) dan *maximum curvature* (Mignan and Woessner, 2012). Sebelum proses penapisan data, terdapat 2377 kejadian gempa di Zona 1, 1407 kejadian di Zona 2,

dan 109 kejadian di Zona 3. Sesudah proses penapisan data, tercatat hanya 278 kejadian untuk Zona 1, 327 kejadian untuk Zona 2, dan 88 kejadian untuk Zona 3. Data gempa setelah proses penapisan kemudian diolah kembali dalam ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) untuk mendapatkan *output* berupa histogram dan kurva FMD, estimasi parameter M_c , b -value dan a -value, variasi spasial b -value. *Output* yang didapatkan dari ketiga zona seismik dianalisis untuk memperoleh gambaran komprehensif tentang level seismisitas dan potensi bencana gempa tektonik di wilayah selatan Sumatera.

HASIL DAN PEMBAHASAN

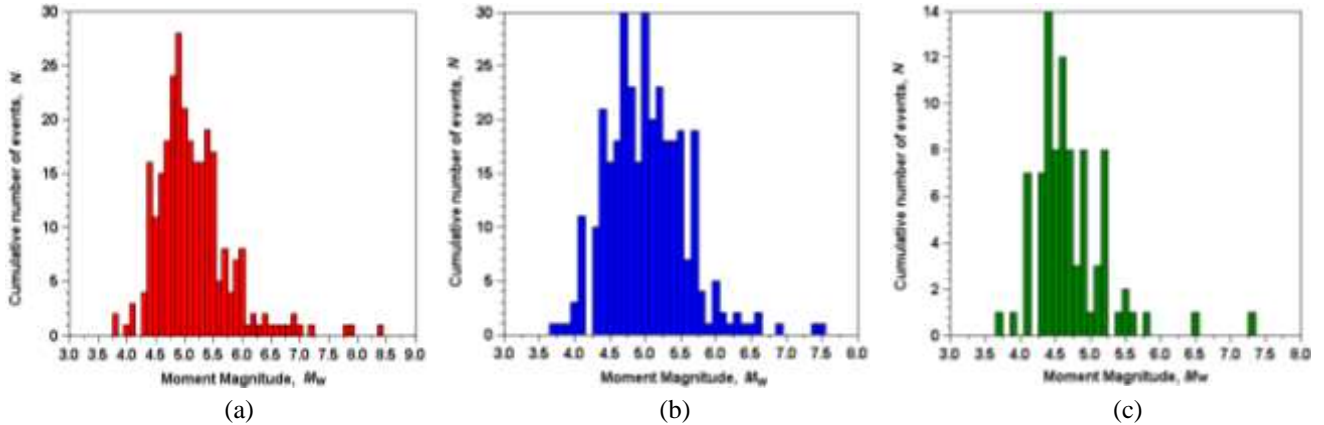
Pembahasan hasil penelitian disajikan berdasarkan gambar yang dihasilkan dengan menggunakan ZMAP6.0, yaitu (1) histogram statistik gempa terhadap magnitudo, (2) kurva FMD, (3) distribusi spasial b -value. Analisis setiap gambar yang dihasilkan dibedakan berdasarkan pembagian zona seismik, yaitu Zona 1, Zona 2, dan Zona 3. Analisis histogram magnitudo gempa dan kurva FMD bisa memberikan gambaran level seismisitas di wilayah selatan Pulau Sumatera. Analisis distribusi spasial b -value memberikan gambaran potensi bahaya bencana gempa di wilayah selatan Pulau Sumatera.

Histogram Magnitudo Gempa

Data awal gempa masing-masing zona seismik berupa *mixed events* (*foreshocks, mainshocks, aftershocks*) diolah melalui penapisan Gardner and Knopoff (1974) menjadi *mainshocks* saja yang diolah dengan aplikasi ZMAP6.0. Data *mainshocks* tersebut kemudian diolah menjadi kelas-kelas magnitudo gempa melalui *spreadsheet* dengan lebar kelas masing-masing adalah 0,10 untuk mendapatkan *optimum solution* (Gambar 3). Histogram magnitudo memaparkan hubungan distribusi magnitudo dan frekuensi kejadian (Singh, 2016; Yeken, 2016).

Gambar 3 mendeskripsikan plot jumlah kumulatif kejadian gempa terhadap magnitudo M_w , di mana seluruh plot menunjukkan penurunan frekuensi secara eksponensial setelah kelas magnitudo berfrekuensi paling tinggi sesuai ramalan hukum Gutenberg-Richter (Naylor *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2015; Singh, 2016; Hong *et al.*, 2020). Frekuensi tertinggi berkorelasi dengan interval kelas $4,4 \leq M_w \leq 5,0$ dengan 28 kejadian di Zona 1, 30 kejadian di Zona 2, dan 14 kejadian di Zona 3. Magnitudo terbesar selama rentang tahun pengamatan di Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 berturut-turut M_w 8,4, M_w 7,5 dan M_w 7,3 merefleksikan Zona 1 dan Zona 2 yang memiliki wilayah sepanjang wilayah barat Sumatera bagian selatan sebagai zona yang rentan terhadap potensi bencana gempa. Struktur batuan bawah permukaan di kedua zona memiliki stres yang relatif tinggi. Hal ini bisa dipahami karena kedua zona tersebut berbatasan langsung dengan Sesar Besar Sumatera yang aktif dan dekat dengan zona *megathrust* di perbatasan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia (McCaffrey, 2009; Weller

et al., 2012; Lange et al., 2018).



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

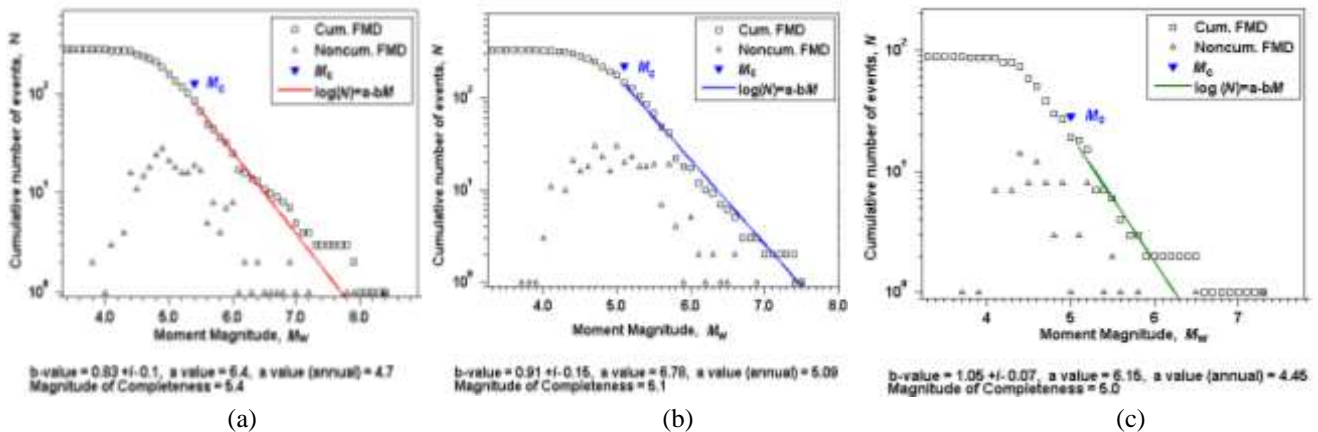
Gambar 3(a) dan 3(b) memiliki konsistensi di mana terjadi penurunan eksponensial sesudah nilai magnitudo dengan frekuensi tertinggi. Hal ini membuktikan kehadiran hukum Gutenberg-Richter sebagai faktor pengendali distribusi gempa di wilayah tersebut. Untuk Gambar 3(c) terjadi penyimpangan pola distribusi magnitudo dimana penurunan eksponensial tidak teramati dengan jelas. Hal ini dapat dipahami karena jumlah data gempa yang terkumpul pada Zona 3 hanya 88 kejadian setelah penapisan. Jumlah data ini tidak memenuhi syarat minimal 200 kejadian agar Hukum Gutenberg-Richter dapat berlaku valid (Woessner and Wiemer, 2005).

Estimasi M_c setiap zona diperoleh dari nilai median kelas magnitudo dengan frekuensi tertinggi sehingga pada Gambar 3(a) dan 3(b) memiliki nilai $M_c = 4,9$ dan $M_c = 5,0$. Untuk memastikan kebenaran nilai M_c , maka plot distribusi kurva frekuensi-magnitudo (FMD) dibuat dengan bantuan

ZMAP6.0 (Wiemer, 2001).

Kurva FMD

Gambar 4 memberikan plot kurva FMD untuk ketiga zona seismik dan memuat hasil perhitungan a -value yang mendiskripsikan level seismisitas (Marzocchi et al., 2016; Amaro-Mellado et al., 2017; Rigo et al., 2018) dan b -value mendiskripsikan heterogenitas lapisan batuan bawah permukaan yang mengisi lapisan kerak (Kijko and Smit, 2012; Godano et al., 2014). Selain itu, kurva FMD juga memaparkan hasil-hasil perhitungan M_c dan a (annual). Penentuan M_c dilakukan dengan menggunakan teknik MAXC yang dibahas dalam Mignan and Woessner (2012), di mana teknik ini memiliki tingkat korelasi hingga 90%. Nilai M_c dalam teknik MAXC merupakan nilai terendah M_{co} atau *magnitude cut off* dari interval magnitudo di mana frekuensi kejadian gempa mulai menurun.



Gambar 4. Plot kurva FMD, di mana estimasi M_c , b -value, a -value dan a -value (annual) ditentukan oleh ZMAP6.0 untuk masing-masing (a) Zona 1, (b) Zona 2, dan (c) Zona 3.

Berdasarkan Gambar 4, hasil perhitungan nilai M_c , b -value, a -value, dan a (annual) untuk ketiga zona seismik menunjukkan hasil yang berbeda. Untuk Zona 1: $M_c = 5,4$; $b = 0,83$; $a = 6,40$; a (annual) = 4,70. Untuk Zona 2: $M_c = 5,1$; $b = 0,91$; $a = 6,78$; a (annual) = 5,09. Untuk Zona 3: $M_c = 5,0$; $b = 1,06$; $a = 6,15$; a (annual) = 4,45. Zona 1 dan Zona

2 mengisyaratkan adanya kemiripan seismisitas karena memiliki jumlah gempa yang memenuhi syarat (minimal 200 kejadian), pola histogram yang mirip, dan nilai M_c yang tidak berbeda secara signifikan. Meskipun Zona 3 memiliki $M_c = 5,0$ tetapi ada keraguan dalam hasil perhitungan M_c karena nilai tersebut diperoleh dari data yang relatif sedikit.

Akurasi penentuan M_c menentukan akurasi b -value dan a -value (Mignan and Woessner, 2012; Godano *et al.*, 2014).

Zona 1 dan Zona 2 memiliki b -value kisaran 0,8-0,9 sedikit di bawah harga normal $b = 1$ yang menandakan bahwa b -value relatif rendah (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014; Prasad and Singh, 2015). Interpretasi hasil ini adalah wilayah tersebut menyimpan akumulasi stres yang tinggi (Tormann *et al.*, 2014; Prasad and Singh, 2015; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Hal ini dapat terjadi karena wilayah Zona 1 dan Zona 2 dilalui oleh zona subduksi aktif dan Sesar Besar Sumatera di daratan sebagai sumber potensial pemicu gempa tektonik (Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2002; McCaffrey, 2009; Weller *et al.*, 2012; Lange *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019) serta keberadaan Sesar Mentawai sebagai jalur busur muka Sumatera (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012).

Zona 3 memiliki $b = 1,05$, sedikit di atas nilai normal untuk b -value yang menunjukkan akumulasi stres mekanik yang dialami batuan bawah permukaan di Zona 3 adalah relatif rendah, akumulasi energi seismik juga rendah. Hal ini dapat dipahami karena letak Zona 3 relatif jauh dari sumber gempa seperti zona subduksi maupun Sesar Besar Sumatera. Meskipun demikian, ada kemungkinan bisa terjadi gempa dengan magnitudo relatif besar, khususnya wilayah barat Zona 3.

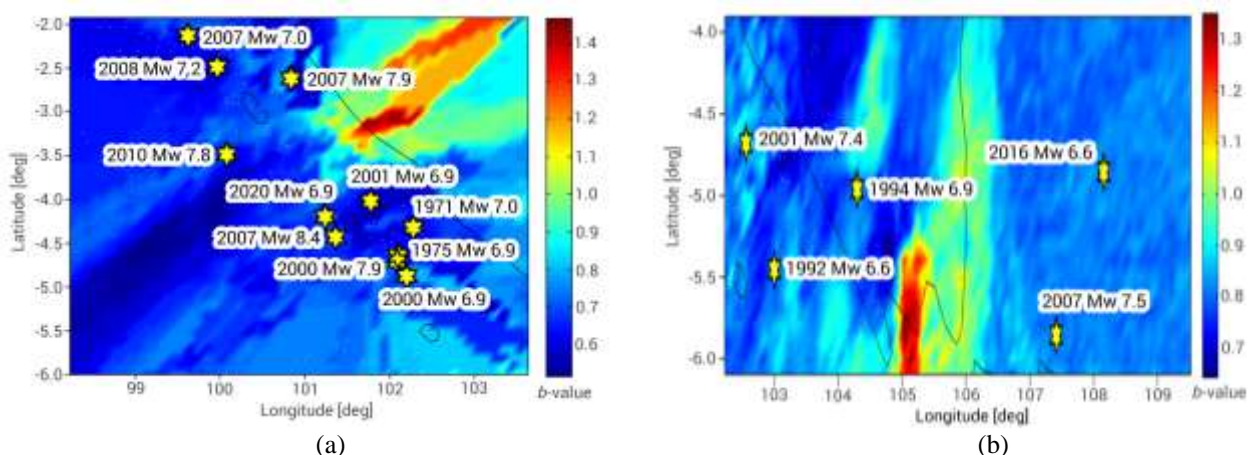
Jika dilihat dari batas wilayah geografis Zona 1 dan Zona 2 serta data gempa sebelum penapisan dapat dianalisis bahwa seismisitas Zona 1 harusnya lebih tinggi daripada seismisitas Zona 2. Namun demikian, plot pada Gambar 4 menunjukkan seismisitas Zona 2 lebih tinggi dari Zona 1. Hal ini karena setelah penapisan data awal, jumlah kejadian di Zona 2 relatif lebih banyak daripada jumlah kejadian di Zona 1. Perlu diketahui bahwa data gempa yang diolah oleh

ZMAP6.0 adalah data sesudah penapisan awal. Zona 3 memiliki a -value dan $a(annual)$ yang paling rendah dibandingkan dengan kedua zona yang lain. Hal ini menunjukkan seismisitas Zona 3 paling rendah.

Zona 1 dan Zona 2 memiliki aktivitas seismo-tektonik yang lebih tinggi daripada Zona 3. Kehadiran zona subduksi di lepas pantai barat Pulau Sumatera (McCaffrey, 2009; Lange *et al.*, 2018) dan Sesar Besar Sumatera yang membentang dari ujung utara Pulau Sumatera sampai Teluk Semangko di ujung selatan Pulau Sumatera (Ito *et al.*, 2012; Natawidjaja *et al.*, 2017; Nugraha *et al.*, 2018) menjadi sumber pemicu gempa tektonik. Untuk melihat lebih detail tentang area mana saja di wilayah selatan Sumatera yang berpotensi mengalami bencana gempa *megathrust*, maka diperlukan analisis distribusi spasial b -value.

Variasi spasial b -value

Kondisi seismo-tektonik wilayah selatan Sumatera antara 1970-2021 bisa dipelajari dengan memetakan distribusi spasial b -value. Peta variasi spasial b -value dapat digunakan untuk prediksi di mana lokasi gempa relatif besar akan terjadi. Pemetaan dilakukan dengan bantuan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012). Agar diperoleh peta dengan resolusi yang tinggi, syarat data gempa yang diolah minimal 200 kejadian agar variasi spasial b -value yang dihasilkan dapat dipercaya (Woessner and Wiemer, 2005). Oleh karena jumlah kejadian gempa untuk Zona 3 hanya 88 kejadian, maka ZMAP6.0 tidak dapat memberikan peta variasi spasial b -value. Dengan demikian, peta distribusi spasial b -value hanya diberikan untuk Zona 1 (Gambar 5a) dan Zona 2 (Gambar 5b), di mana episenter gempa dengan $M_w \geq 6,5$ (gempa relatif kuat) ditampilkan.



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

Rentang variasi b -value pada peta distribusi tersebut digambarkan dengan degradasi warna, di mana warna biru menunjukkan b -value yang relatif rendah, sedangkan warna merah menunjukkan b -value relatif tinggi (Wiemer and Benoit, 1996). Tanda bintang berwarna kuning pada kedua gambar tersebut menunjukkan lokasi episenter gempa.

Kedua plot variasi spasial b -value pada Gambar 5 tersebut menunjukkan bahwa episenter gempa relatif kuat dengan $M_w \geq 6,5$ yang terjadi baik pada Zona 1 maupun Zona 2 berada pada daerah dengan b -value yang relatif rendah antara 0,7-0,8. Hal ini sesuai dengan temuan penelitian terdahulu (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken,

2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020) yang melaporkan area dengan stres tektonik batuan geologi yang menyimpan akumulasi energi seismik tinggi berkorelasi dengan *b-value* yang relatif rendah.

Gambar 5(a) menunjukkan lokasi episenter gempa dengan kekuatan M_w 8,4 yang membangkitkan tsunami tanggal 12 September 2007 (Borrero *et al.*, 2009; Ratnasari *et al.*, 2020). Gempa ini terjadi mengingat kondisi geologi Zona 1 berada dekat Sesar Mentawai yang merupakan bagian busur muka Sumatera dekat Palung Sumatera (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012). Lokasi episenter tersebut berada di area warna biru tua yang berkorelasi dengan stres tinggi dari struktur batuan bawah permukaan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018). Jumlah episenter gempa relatif kuat dengan $M_w \geq 6,5$ pada Zona 1 ditemukan lebih banyak daripada Zona 2 karena stres batuan bawah permukaan pada Zona 1 lebih tinggi daripada Zona 2. Hal ini sesuai dengan temuan $b = 0,83$ untuk Zona 1 yang terlihat pada Gambar 4(a) dibandingkan dengan $b = 0,91$ untuk Zona 2 pada Gambar 4(b).

Gambar 5(b) menunjukkan beberapa lokasi episenter gempa dengan $M_w \geq 6,5$ pada Zona 2 yang jauh lebih sedikit daripada Zona 1. Hal ini dipahami karena batuan geologi bawah permukaan pada Zona 2 tidak terhubung langsung dengan Zona 1 yang dilalui oleh sistem sesar busur muka Sumatera dengan level stres batuan yang tinggi. Hal inilah yang diduga menjadi penyebab mengapa distribusi spasial *b-value* yang dihasilkan oleh Zona 2 pada Gambar 5(b) memiliki warna biru dominan yang lebih terang daripada Zona 1 pada Gambar 5(a). Implikasi temuan ini sesuai dengan temuan *b-value* pada Zona 2 yang sedikit lebih besar daripada *b-value* pada Zona 1.

Secara umum, posisi episenter gempa relatif kuat yang ditampilkan pada Gambar 5(a) dan 5(b) menunjukkan bahwa wilayah barat Sumatera bagian selatan lebih sering dan dominan mengalami guncangan gempa. Hal ini bisa dipahami karena wilayah barat relatif lebih dekat dengan zona subduksi dekat Palung Sumatera (Lange *et al.*, 2018; Hutchings and Mooney, 2021), jalur busur muka Sumatera (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012) dan kehadiran jalur Sesar Besar Sumatera (Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2002; McCaffrey, 2009; Weller *et al.*, 2012) yang berada di daratan Pulau Sumatera sehingga wilayah barat lebih rentan mengalami potensi bahaya bencana gempa tektonik (Hutchings and Mooney, 2021) dan bahaya tsunami sekaligus (Triyoso *et al.*, 2020).

KESIMPULAN

Potensi bencana gempa di selatan Sumatera dapat dipelajari dengan menghitung nilai *a* dan *b* serta anomali nilai *b* yang berlaku untuk wilayah tersebut. Dengan menggunakan statistik magnitudo antara $3,5 \leq M_w \leq 8,4$

selama 1970-2021 dengan kedalaman mencapai 640 km (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), maka wilayah selatan Pulau Sumatera dibagi menjadi Zona 1 (Bengkulu), Zona 2 (Lampung) dan Zona 3 (Sumatera Selatan). Hasil-hasil perhitungan untuk Zona 1: $a = 6,40$ dan $b = 0,83$; Zona 2: $a = 6,78$ dan $b = 0,91$; dan Zona 3: $a = 6,15$ dan $b = 1,05$. Anomali nilai *b* dinyatakan sebagai peta variasi spasial *b-value*, di mana lokasi gempa relatif besar ditemukan bersesuaian dengan area dengan nilai *b* rendah. Secara umum, seismisitas Zona 2 paling tinggi karena aktivitas seismo-tektonik sepanjang transisi zona subduksi Sumatera-Jawa. Aktivitas Zona 1 juga relatif tinggi karena aktivitas serupa sepanjang zona subduksi Sumatera dan Sesar Mentawai sebagai bagian dari jalur busur muka Sumatera. Hasil-hasil penelitian ini sama dengan temuan terdahulu yang relevan dengan studi seismisitas Pulau Sumatera.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada USGS yang telah mengelola katalog gempa tektonik yang digunakan dalam penelitian ini yang diakses bebas melalui <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Terimakasih juga ditujukan kepada dosen penguji sekaligus *reviewers* yang telah 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 Institute*, 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. *International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, No. 452, pp. 1-23.
- 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.
- 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.
- Gardner, J. K. and Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of Seismological Society of America*, 64, 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 the Seismological Society of America*, Vol. 34, 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 and Fractals*, Vol. 81, pp. 103-110.
- Hiemer, S., Woessner, J., Basili, R., Danciu, L., Giardini, D., Wiemer, S. 2014. A smoothed stochastic earthquake rate model considering seismicity and fault moment release for Europe. *Geophysical Journal International*, Vol. 198, Issue 2, 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. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, No. 3, pp. 3761-3774.
- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, Issue 9.
- 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., Agustan., 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 and 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.
- 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 network. *Solid Earth*, Vol. 9, No.4, pp. 1035-1049.
- 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
- McCaffrey, R. 2009. The tectonic framework of the sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 37, pp. 345-366.
- 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*, pp. 1-45.
- 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.
- 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., Quinteros, C. B. 2017. Gutenberg-Richter b -value maximum likelihood estimation and sample size. *Journal of Seismology*, Vol. 21, pp. 127-135.
- Naylor, M., Orfanogiannaki, K. and Harte, D. 2010. Exploratory data analysis: magnitude, space, and time. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, pp. 1-42.
- Nuannin, P., Kulhanek, 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., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Thurber, C. H., Pesicek, J. D., Zhang, H., Wiyono, S. H., Ramdhan, M., Wandono. and Irsyam, M. 2018. Hypocenter relocation along the Sunda Arc in Indonesia, using a 3D seismic-velocity model. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A.
- 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.

- 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.
- 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.
- Salman, R., Lindsey, E. O., Feng, L., Bradley, K., Wei, 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, pp. 1-19.
- 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.
- 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. *Geoscience Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-7.
- van Stiphout, T., Zhuang, J. and Marsan, D. 2012. Models and techniques for analyzing seismicity: Seismicity declustering. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, pp. 1-25.
- 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. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 15274.
- Wiemer, S. and Benoit, J. P. 1996. Mapping the *b*-value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones. *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 13, p. 1557-1560.
- 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.
- Woessner, J. and Wiemer, S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 2, pp. 684-698.
- Wu, Y. M., Chen, S. K. Huang, T. C., Huang, H. H., Chao, W. A. and Koulakov, I. 2018. Relationship between Earthquake *b*-values and crustal stresses in a young Orogenic belt. *Geophysical Research Letters*, Vol. 45, pp. 1832-1837.
- Yeken, T. 2016. Spatial Analysis of *b*-value variability in Armutlu Peninsula (NW Turkey). *Open Geoscience*, Vol. 8, pp. 548-555.