

## SEISMISITAS JAWA TIMUR DAN POTENSI BAHAYA BENCANA SEISMİK TERKAIT

Muslimatul Fitria, Tjipto Prastowo

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

Email: muslimatul.18067@mhs.unesa.ac.id

### Abstrak

Seismisitas Jawa Timur dan potensi bencana gempa tektonik terkait dapat dipelajari melalui analisis parameter seismik:  $a$ -value,  $b$ -value, dan anomali  $b$ -value. Nilai  $a$  merefleksikan level seismisitas, nilai  $b$  menunjukkan level stres batuan bawah permukaan, dan anomali nilai  $b$  menjadi prekursor gempa besar. Ketiga parameter tersebut secara akurat diperoleh dengan memanfaatkan data frekuensi-magnitudo (FMD) dari katalog USGS antara 1973-2020. Kurva FMD menjadi basis penerapan hukum Gutenberg-Richter melalui pendekatan *maximum likelihood* untuk data gempa tektonik dengan magnitudo antara  $3,1 \leq M_w \leq 7,8$  dan kedalaman mencapai 574 km di bawah permukaan. Perhitungan ketiga parameter dilakukan dengan membagi wilayah Jawa Timur menjadi Zona Utara, Zona Selatan, dan Zona Ulu dengan hasil-hasil untuk Zona Utara:  $a = 5,77$  dan  $b = 0,96$ ; Zona Selatan:  $a = 6,49$  dan  $b = 0,81$ ; dan Zona Ulu:  $a = 6,80$  dan  $b = 0,87$ . Berbeda dengan nilai  $a$  dan  $b$ , anomali nilai  $b$  tidak dinyatakan dalam bentuk angka melainkan dalam bentuk peta variasi spasio-temporal  $b$ -value. Analisis hasil-hasil perhitungan  $a$  dan  $b$  untuk ketiga zona seismik menunjukkan bahwa seismisitas wilayah selatan Jawa Timur lebih tinggi daripada seismisitas wilayah utara karena stres tinggi batuan yang dipicu aktivitas seismo-tektonik sepanjang zona subduksi dekat Palung Jawa. Dengan demikian, wilayah selatan Jawa Timur lebih rentan terhadap potensi bencana gempa seismik. Analisis variasi spasio-temporal  $b$ -value menemukan wilayah selatan Jawa Timur dengan nilai  $b$  yang rendah, bertepatan dengan saat gempa besar (*tsunami earthquake*) terjadi pada bulan Juni 1994. Hasil-hasil penelitian ini sama dengan temuan penelitian terdahulu yang relevan dengan studi seismisitas Pulau Jawa.

**Kata Kunci:** seismisitas Jawa Timur,  $a$ -value,  $b$ -value, anomali  $b$ -value, hukum Gutenberg-Richter

### Abstract

Seismicity in East Java and its potency for earthquakes can be examined using parameters:  $a$ -value,  $b$ -value, and  $b$ -value anomaly. Parameter  $a$ -value reflects seismicity level,  $b$ -value indicates stress level of subsurface structure, and  $b$ -value anomaly is a precursor for a large event. The parameters were accurately obtained from frequency-magnitude distribution (FMD) in the region of interest between 1973-2020 based on USGS catalogue. The FMD serves as a basis for the Gutenberg-Richter (GR) law through maximum likelihood for data with varying magnitudes of  $3.1 \leq M_w \leq 7.8$  and depths reaching 574 km below the surface. Determination of the parameters was performed by dividing East Java into Northern Zone, Southern Zone, the whole Zone. The results were for Northern Zone:  $a = 5,77$  and  $b = 0,96$ ; Southern Zone:  $a = 6,49$  and  $b = 0,81$ ; and the whole Zone:  $a = 6,80$  and  $b = 0,87$ , respectively. Different from  $a$ -value and  $b$ -value, the anomaly in  $b$ -value was not represented in numbers but it was given in the spatio-temporal  $b$ -value. Analysis of the results for each zone showed that seismicity in the southern region of East Java is relatively higher than in the north, due to a high-stress region induced by tectonic activities along the subduction zone near the Java Trench. Therefore, the southern region is vulnerable to geohazards. Analysis of spatio-temporal  $b$ -value found a low  $b$ -value off the south coast, associated with a location of tsunami earthquake in June 1994. The current results are consistent with previous findings for Java seismicity.

**Keywords:** East Java seismicity,  $a$ -value,  $b$ -value,  $b$ -value anomaly, Gutenberg-Richter law

### PENDAHULUAN

Negara Indonesia memiliki wilayah teritorial yang berada pada pertemuan Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Hamilton, 1979; Cummins, 2017, Irsyam *et al.*, 2017; Hutchings and Mooney, 2021). Jejak pertemuan tersebut membentuk zona subduksi yang memanjang dari pantai barat Pulau Sumatera, pantai selatan Pulau Jawa, wilayah Pulau Bali, NTB dan NTT, serta Laut Banda (Irsyam *et al.*, 2017; Watkinson and Hall, 2017; Dokht *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020; Hutchings and Mooney, 2021). Selain zona subduksi, beberapa wilayah nusantara misalnya Pulau Jawa juga dilintasi oleh jalur sesar aktif yang memicu deformasi fisis lapisan kerak (Koulali *et al.*, 2017;

Gunawan and Widiyantoro, 2019). Aktivitas seismik sepanjang zona subduksi dan jalur sesar aktif tersebut dapat menjadi sumber potensial pemicu gempa tektonik. Gambaran kondisi tektonik Pulau Jawa bisa dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Pulau Jawa, wilayah utara berbatasan dengan Laut Jawa sedangkan wilayah selatan berbatasan dengan Samudera Hindia. Palung Jawa menandai lokasi zona subduksi Jawa (gambar ini dibuat dengan bantuan ArcGIS Online Basemaps di <https://arcgis.com/home/group.html>)

Jawa Timur merupakan salah satu provinsi di Jawa dengan aktivitas seismo-vulkanik tinggi (Soeria-Atmadja *et al.*, 1994; Špičák *et al.*, 2007; Susilo and Adnan, 2013; Susilo *et al.*, 2018). Struktur batuan geologi Jawa Timur didominasi oleh deretan pegunungan selatan, memanjang dari barat sampai ke timur sepanjang wilayah selatan Jawa (Soeria-Atmadja *et al.*, 1994; Setijadji *et al.*, 2006; Smyth *et al.*, 2008; van Gorsel, 2018), zona subduksi aktif dekat Palung Jawa di Samudera Hindia (Špičák *et al.*, 2007) dan sesar aktif daratan, terutama di wilayah utara Jawa Timur (Koulaliet *et al.*, 2016; Koulaliet *et al.*, 2017) yang juga bisa menjadi sumber potensial pemicu gempa di Jawa Timur.

Zona subduksi terbentuk sebagai akibat penunjaman Lempeng Indo-Australia ke arah bagian bawah Lempeng Eurasia (Natawidjaja, 2021). Selama proses penunjaman, stres tektonik terakumulasi dan menghasilkan sesar daratan yang diasosiasikan sebagai deformasi fisis struktur batuan bawah permukaan (Fahrudin *et al.*, 2019; Gunawan and Widiyantoro, 2019). Sesar aktif daratan yang mendominasi wilayah utara Jawa Timur adalah Sesar Kendeng (Koulali *et al.*, 2016; Koulali *et al.*, 2017), Sesar Pasuruan (Marliyani *et al.*, 2019) dan Sesar Probolinggo. Sedangkan Sesar Grindulu (Irsyam *et al.*, 2017; Cholifah *et al.*, 2020) mendominasi wilayah selatan Jawa Timur.

Dengan kehadiran sesar aktif baik di wilayah utara dan selatan Jawa Timur serta kehadiran Palung Jawa sebagai struktur geologi menandai zona subduksi aktif, maka Jawa Timur termasuk daerah yang rawan terhadap bahaya bencana geologi. Oleh karena itu, pengetahuan tentang level seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik sangat diperlukan untuk mitigasi bencana geologi dalam upaya pengurangan risiko bencana di Jawa Timur.

Studi seismisitas dan potensi bahaya bencana gempa tektonik di suatu wilayah dapat diamati dengan penentuan  $a$ -value dan  $b$ -value (Ashadi *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Variasi spasial dan temporal  $b$ -value (Hong *et al.*, 2020; Zhu, 2021) merupakan parameter yang sering digunakan sebagai prekursor gempa tektonik (Nuannin *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and Singh, 2015; Hui *et al.*,

2021). Oleh karena belum ada penelitian yang mempelajari level seismisitas dan potensi bencana gempa tektonik melalui analisis  $a$ -value,  $b$ -value, dan anomali  $b$ -value di wilayah Jawa Timur, maka penelitian ini dilaksanakan untuk menutup celah tersebut.

### Hukum Gutenberg-Richter

Seismisitas suatu wilayah dapat dipelajari melalui distribusi frekuensi-magnitudo gempa (FMD) yang terjadi di wilayah tersebut selama kurun waktu tertentu (*e.g.*, Ray *et al.*, 2019; Amaro-Mellado and Bui, 2020; Yamagishi *et al.*, 2021). Secara matematis, hal ini biasa dituliskan dalam bentuk hukum Gutenberg-Richter (1944),

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

di mana  $N$  menunjukkan frekuensi kejadian gempa dengan magnitudo  $M \geq M_c$ . Dalam hal ini,  $M_c$  adalah *magnitude of completeness* yaitu magnitudo terkecil di mana hukum Gutenberg-Richter masih berlaku valid, sedangkan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta dengan arti fisis tertentu yang relevan dengan seismisitas wilayah yang dipelajari. Akurasi hasil perhitungan  $M_c$ ,  $b$ -value, dan  $a$ -value dipenuhi apabila jumlah data gempa yang digunakan minimal 200 kejadian (Woessner and Wiemer, 2005).

Nilai  $a$  pada persamaan (1) di atas mendeskripsikan level seismisitas suatu wilayah (Amaro-Mellado and Bui, 2020) sedangkan nilai  $b$  merupakan ukuran stres yang terakumulasi dalam batuan bawah permukaan, di mana  $b$  yang tinggi (rendah) berhubungan dengan wilayah dengan sistem batuan dengan stres yang rendah (tinggi) (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Definisi lain dari  $b$  adalah rasio statistik gempa kecil relatif terhadap gempa besar (Kijko and Smit, 2012; Han *et al.*, 2015; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dengan demikian, studi tentang variabilitas  $b$  bisa digunakan sebagai basis untuk analisis potensi bahaya bencana seismik (Ray *et al.*, 2019; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

Studi seismisitas wilayah dengan fokus pengamatan pada penurunan nilai  $b$  memberikan interpretasi bahwa terjadi peningkatan level stres batuan bawah permukaan sebelum energi seismik dilepaskan dalam bentuk kejadian gempa besar. Dengan demikian, variabilitas nilai  $b$  dapat dipandang sebagai prekursor gempa (Nuannin *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2012; Godano *et al.*, 2014; Yamagishi *et al.*, 2021). Nilai normal untuk  $b$  adalah mendekati 1,0 dengan variasi atau fluktuasi yang bergantung pada data gempa, metode estimasi, dan kisaran magnitudo gempa (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014).

Dengan mempertimbangkan nilai  $b$  bervariasi dalam ruang dan waktu, maka anomali nilai  $b$  dapat diasosiasikan sebagai variasi spasial (Singh, 2016; Yeken, 2016; Rigo *et al.*, 2018; Arroyo-Solórzano and Linkimer, 2021), variasi temporal (Nuannin *et al.*, 2005; El-Isa, 2013;), variasi spasio-temporal (Hong *et al.*, 2020; Zhu, 2021), dan prekursor gempa besar (Nuannin *et al.*, 2012; Prasad and



Singh, 2015; Hui *et al.*, 2021). Beberapa studi terdahulu yang membahas anomali nilai  $b$  tersebut membuktikan bahwa nilai  $b$  mengalami penurunan signifikan ( $b$ -drop) sebelum gempa besar terjadi. Dalam konteks ini, analisis variabilitas nilai  $b$  (baik spasial maupun temporal) perlu dilakukan untuk mengetahui level seismisitas dan potensi bahaya bencana gempa tektonik di wilayah Jawa Timur.

## METODE

### Magnitude of Completeness

Magnitude of completeness  $M_c$  menunjukkan batas magnitudo di mana data statistik gempa dengan magnitudo yang lebih kecil dari  $M_c$  akan menyimpang dari hukum Gutenberg-Richter (Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012). Dengan demikian, akurasi nilai  $M_c$  adalah penting karena menunjukkan validitas keberlakuan hukum Gutenberg-Richter (Diantari *et al.*, 2018). Nilai  $M_c$  yang terlalu tinggi memicu *under-sampling*, dimana jumlah data menjadi tereduksi. Sebaliknya, nilai  $M_c$  yang terlalu rendah dapat menyebabkan kesalahan hitung nilai  $a$  dan  $b$  yang berujung pada *biased analysis* (Mignan and Woessner, 2012). Dalam penelitian ini, nilai  $M_c$  dihitung dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) dan Matlab.

### Metode Maximum Likelihood

Pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) adalah metode yang digunakan untuk estimasi nilai  $b$  berdasarkan probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Metode ini dipilih karena tidak menyertakan *dependent variables* dalam perhitungan ketiga parameter seismik sehingga bisa mereduksi ketidakpastian dalam hasil akhir perhitungan (Kijko, 1988; Han *et al.*, 2015; Nava *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

Metode *maximum likelihood* mengeksplorasi data gempa yang terdistribusi dalam bentuk fungsi eksponensial atau fungsi Poisson (Luen and Stark, 2012; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Taroni and Akinci, 2021). Nilai  $b$  dihitung dengan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) dan Matlab menurut persamaan Utsu (1966),

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

di mana  $\bar{M}$  adalah magnitudo rata-rata untuk  $M \geq M_c$  dan  $\Delta M = 0,1$  adalah *the binning interval for instrumental magnitudes* (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Nilai  $a$  bisa dihitung dari inversi persamaan (1) dengan meninjau nilai  $M_c$  dan jumlah kejadian gempa sesudah penapisan. Hal ini menunjukkan kebergantungan nilai  $a$  pada akurasi hasil hitung  $M_c$  dan  $b$  (van Stiphout *et al.*, 2012; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

### Data dan Variabel Operasional Penelitian

Data penelitian adalah total 1377 kejadian gempa di Jawa Timur antara 1973-2020 dengan magnitudo antara  $3,1 \leq M_w \leq 7,8$  dan kedalaman gempa mencapai 574 km yang diperoleh dari katalog *the United States Geological Survey*

(USGS) di <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Data sejumlah itu belum diseleksi melalui *declustering* atau penapisan data. Proses penapisan dilakukan dengan menghapus *foreshocks*, *aftershocks*, *swarms* (jika ada) dan menyisakan *mainshocks* (Taroni and Akici, 2021) untuk meningkatkan level akurasi perhitungan  $M_c$ ,  $b$ -value dan  $a$ -value (van Stiphout *et al.*, 2012; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) di Jawa Timur. Teknik penapisan yang dipilih dalam penelitian ini adalah teknik yang dikembangkan oleh Reasenber (1985).

Dalam penelitian ini, variabel manipulasi adalah magnitudo momen  $M_w$  dan variabel respons adalah frekuensi kejadian  $N$ . Variabel kontrol adalah metode *maximum likelihood* untuk penentuan ketiga parameter seismik melalui pemberlakuan hukum Gutenberg-Richter (1944) dan persamaan Utsu (1966) di Jawa Timur.

Dalam penelitian ini, wilayah Jawa Timur dibagi menjadi tiga zona seismik, yaitu Zona Utara, Zona Selatan, dan Zona Utuh (Gambar 2).



(a)



(b)

**Gambar 2.** Peta zona seismik Jawa Timur: (a) Zona Utara dan Zona Selatan, (b) Zona Utuh (gambar ini dibuat dengan <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>).

Wilayah geografis Zona Utara adalah  $6^{\circ}40' - 7^{\circ}70'LS$  dan  $111^{\circ}50' - 114^{\circ}70'BT$ . Wilayah geografis Zona Selatan

adalah  $7^{\circ}70'-11^{\circ}50'LS$  dan  $111^{\circ}50'-114^{\circ}70'BT$ . Wilayah geografis Zona Utuh adalah  $6^{\circ}40'-11^{\circ}50'LS$  dan  $111^{\circ}50'-114^{\circ}70'BT$ . Detil prosedur perhitungan ketiga parameter seismik berlaku untuk seluruh zona seismik tersebut.

Seluruh data gempa diunduh dari katalog USGS dan disimpan dalam format file.csv. Kemudian, data gempa dengan skala magnitudo selain  $M_w$  diubah menjadi skala  $M_w$  melalui teknik konversi Kadirioglu and Kartal (2016). Data statistik gempa tersebut disesuaikan dengan format penulisan yang ditentukan oleh ZMAP6.0, yaitu *longitude, latitude, year, month, day, magnitude, depth, hour, minute*. Sesudah tahap penyesuaian, data disimpan dalam format file.dat sebagai input dalam program ZMAP6.0 dengan bantuan Matlab. Proses penapisan (Reasenber, 1985) dilakukan untuk menjaga pemurnian data *mainshocks*.

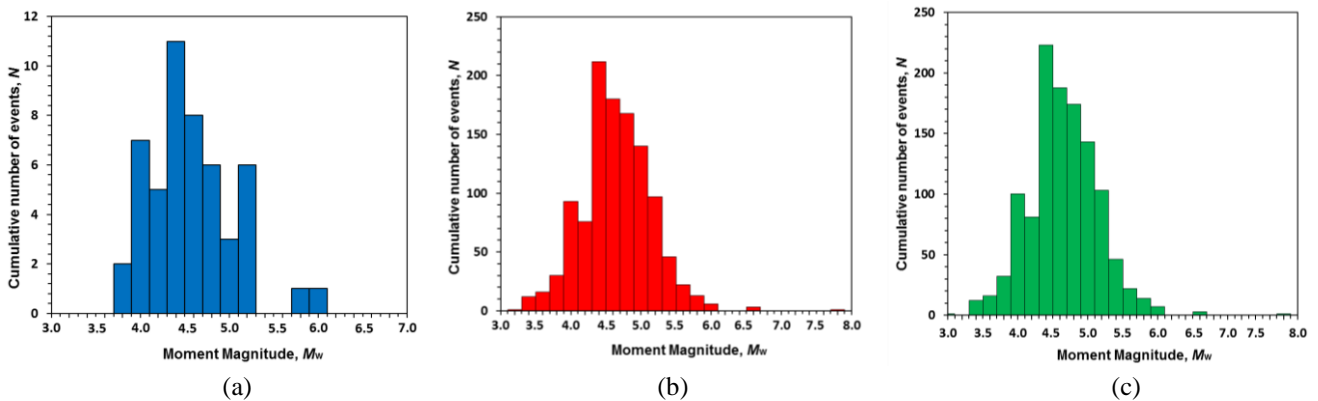
Data gempa sesudah penapisan adalah 50 kejadian untuk Zona Utara, 1116 kejadian untuk Zona Selatan, dan 1166 kejadian untuk Zona Utuh. Data gempa tersebut kemudian diolah kembali dalam ZMAP6.0 untuk mendapatkan *output* berupa histogram statistik gempa dan kurva FMD, estimasi parameter  $M_c$ ,  $b$ -value dan  $a$ -value, variasi spasio-temporal  $b$ -value, serta sebaran magnitudo terhadap variasi kedalaman. Penentuan nilai  $M_c$  dilakukan dengan teknik *maximum curvature* (MAXC) yang dibahas dalam Mignan and Woessner (2012). *Output* berupa nilai  $b$ -value dan  $a$ -value serta peta variasi spasial dan temporal  $b$ -value yang diperoleh untuk masing-masing zona seismik dianalisis untuk memperoleh gambaran komprehensif tentang level seismisitas dan potensi bahaya bencana gempa tektonik di Jawa Timur.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemaparan hasil-hasil penelitian disajikan menurut urutan produk gambar yang dihasilkan oleh ZMAP6.0, yaitu (1) histogram statistik gempa terhadap magnitudo, (2) kurva FMD, (3) distribusi spasial  $b$ -value, (4) variasi temporal  $b$ -value, (5) histogram statistik gempa terhadap kedalaman sumber. Dalam proses penyajian kelima butir, masing-masing produk gambar dibedakan berdasarkan pembagian zona seismik, yaitu Zona Utara, Zona Selatan dan Zona Utuh. Analisis setiap produk gambar yang dihasilkan kemudian diberikan untuk setiap zona seismik. Analisis histogram magnitudo gempa dan kurva FMD untuk semua zona seismik bisa memberikan gambaran level seismisitas di Jawa Timur. Analisis distribusi spasial  $b$ -value, variasi temporal  $b$ -value (anomali  $b$ -value), dan histogram kedalaman sumber bisa memberikan gambaran potensi bahaya bencana gempa tektonik di Jawa Timur.

### Histogram Magnitudo Gempa

Data awal gempa dari masing-masing zona seismik berupa *mixed events* (*foreshocks, mainshocks, aftershocks*) dilakukan teknik penapisan Reasenber (1985) 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 0,2 (Gambar 3). Histogram magnitudo gempa di bawah merupakan cara umum untuk menunjukkan distribusi magnitudo gempa dan frekuensi kejadian (Singh, 2016; Yeken, 2016; Arroyo-Solórzano and Linkimer, 2021).



**Gambar 3.** Plot magnitudo  $M_w$  terhadap jumlah kejadian  $N$  pada (a) Zona Utara, (b) Zona Selatan, dan (c) Zona Utuh.

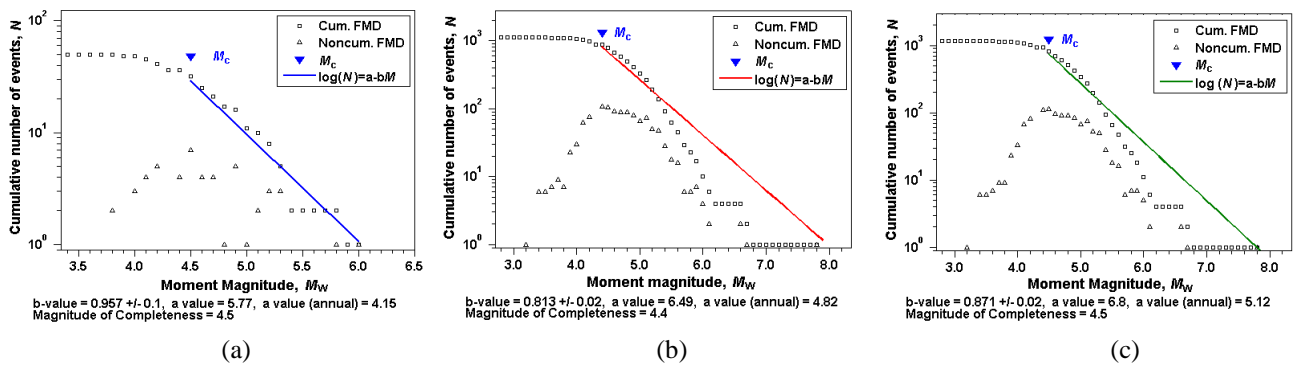
Berdasarkan plot  $N$  terhadap  $M_w$  untuk semua zona seismik, frekuensi tertinggi gempa berada pada interval magnitudo  $4,4 \leq M_w < 4,6$ . Interval tersebut berkorelasi dengan 11 kejadian gempa di Zona Utara, 212 kejadian gempa di Zona Selatan dan 223 kejadian gempa di Zona Utuh. Magnitudo terbesar yang terekam selama tahun pengamatan di Zona Utara adalah  $M_w$  6,0 sedangkan magnitudo terbesar di Zona Selatan dan Zona Utuh adalah  $M_w$  7,8. Gambar 3(b) konsisten dengan Gambar 3(c) tidak saja karena nilai magnitudo terbesar yang sama melainkan

juga terlihat dari pola histogram magnitudonya. Distribusi magnitudo pada kedua gambar tersebut menunjukkan data statistik gempa pasca frekuensi tertinggi gempa mengikuti laju penurunan fungsi eksponensial (Luen and Stark, 2012; Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Taroni and Akinci, 2021).

Laju penurunan fungsi eksponensial pasca frekuensi tertinggi ini merupakan karakteristik distribusi magnitudo yang memenuhi Hukum Gutenberg-Richter (Nava *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Ray *et al.*, 2019; Amaro-Mellado

and Bui, 2020; Yamagishi *et al.*, 2021). Penyimpangan Gambar 3(a) dari pola distribusi magnitudo yang sesuai dengan Hukum Gutenberg-Richter tersebut karena jumlah data gempa yang bisa dikumpulkan untuk Zona Utara hanya 50 kejadian, lebih sedikit dari persyaratan minimal 200 kejadian agar Hukum Gutenberg-Richter berlaku valid (Woessner and Wiemer, 2005).

Untuk Gambar 3(b) dan 3(c), estimasi nilai  $M_c$  bisa dilakukan melalui pengambilan nilai tengah interval kelas dengan frekuensi tertinggi yaitu  $M_c = 4,5$ . Estimasi nilai  $M_c$  secara manual ini nanti bisa dibandingkan dengan yang diperoleh dari perhitungan dengan bantuan ZMAP6.0 dan Matlab melalui kurva FMD.



**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 Utara, (b) Zona Selatan, dan (c) Zona Utuh.

Estimasi  $M_c$  yang terlalu rendah akan menghasilkan kesalahan hitung  $a$  dan  $b$  yang relatif besar dan berujung pada *biased results* (Mignan and Woessner, 2012; Görgün, 2013; Spada *et al.*, 2013). Sedangkan estimasi  $M_c$  yang terlalu tinggi memicu *under sampling*. Oleh karena itu,  $M_c$  dihitung terlebih dahulu oleh ZMAP6.0 (*e.g.*, Rigo *et al.*, 2018). Berdasarkan plot kurva FMD, perhitungan nilai  $M_c$ ,  $b$ -value,  $a$ -value, dan  $a$ -value (*annual*) (urutan penulisan disesuaikan dengan hasil yang diperoleh pada kurva FMD) untuk ketiga zona seismik memberikan hasil yang berbeda. Untuk Zona Utara:  $M_c = 4,5$ ;  $b = 0,96$ ;  $a = 5,77$ ;  $a(\text{annual}) = 4,15$ . Untuk Zona Selatan:  $M_c = 4,4$ ;  $b = 0,81$ ;  $a = 6,49$ ;  $a(\text{annual}) = 4,82$ . Untuk Zona Utuh:  $M_c = 4,5$ ;  $b = 0,87$ ;  $a = 6,80$ ;  $a(\text{annual}) = 5,12$ .

Konsistensi  $M_c$  pada Gambar 3(c) dan Gambar 4(c) untuk Zona Utuh membuktikan bahwa Hukum Gutenberg-Richter dapat digunakan sebagai solusi masalah distribusi statistik gempa tektonik di Jawa Timur. Sedangkan  $M_c$  yang diperoleh dari Gambar 3(b) tidak berbeda signifikan dengan yang diberikan Gambar 4(b) untuk Zona Selatan. Dengan jumlah gempa yang hampir sama, pola histogram yang mirip dan nilai  $M_c$  yang tidak berbeda signifikan antara Zona Selatan dan Zona Utuh, maka hal ini menunjukkan ada kemiripan seismisitas pada kedua zona seismik tersebut. Hal ini tidak berlaku untuk Zona Utara meskipun  $M_c = 4,5$  pada zona ini karena nilai  $M_c$  tersebut diperoleh dari data gempa

## Kurva FMD

Plot kurva FMD dibuat dengan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012). Kurva FMD itu penting karena memuat hasil perhitungan  $a$  yang mendeskripsikan level seismisitas wilayah (Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) dan  $b$  yang menunjukkan akumulasi stres pada batuan bawah permukaan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Selain kedua parameter tersebut, kurva FMD juga memberikan hasil perhitungan  $M_c$  dan  $a$  (*annual*). Gambar 4 di bawah ini menunjukkan kurva FMD untuk masing-masing zona seismik di Jawa Timur.

yang relatif sedikit (keraguan hasil perhitungan  $M_c$  menjadi besar).

Nilai  $b$  untuk Zona Selatan pada Gambar 4(b) dan Zona Utuh pada Gambar 4(c) berada pada kisaran 0,8-0,9 sedikit di bawah nilai normal  $b = 1$  (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014). Nilai  $b$  yang relatif rendah tersebut menandai stres tinggi struktur batuan bawah permukaan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Hal ini bisa dipahami karena Zona Selatan Jawa Timur berada dekat dengan Palung Jawa (zona subduksi) sebagai sumber potensial pemicu gempa tektonik (Špičák *et al.*, 2007; Fahrudin *et al.*, 2019; Widiyantoro *et al.*, 2020). Berbeda dengan Zona Selatan, nilai  $b$  untuk Zona Utara pada Gambar 4(a) hampir mendekati 1. Argumen terbaik adalah aktivitas kegempaan di wilayah utara Jawa Timur banyak dipengaruhi oleh Sesar Kendeng sebagai perpanjangan dari busur belakang Flores (Koulali *et al.*, 2016; Koulali *et al.*, 2017), Sesar Pasuruan (Marliyani *et al.*, 2019) dan busur Sunda Modern yang terbentuk pada jaman kwatier yang lebih muda dari jaman tersier (Soeria-Atmadja *et al.*, 1994; Setijadji *et al.*, 2006; Smyth *et al.*, 2008; van Gorsel, 2018; Cholifah *et al.*, 2020; Zaputlyeva *et al.*, 2020).

Level seismisitas untuk ketiga zona seismik bisa dilihat langsung dari nilai  $a$  dan  $a(\text{annual})$  atau *seismicity annual rate*. Oleh karena nilai  $a$  pada Zona Selatan dan Zona Utuh seperti ditunjukkan oleh Gambar 4(b) dan 4(c)



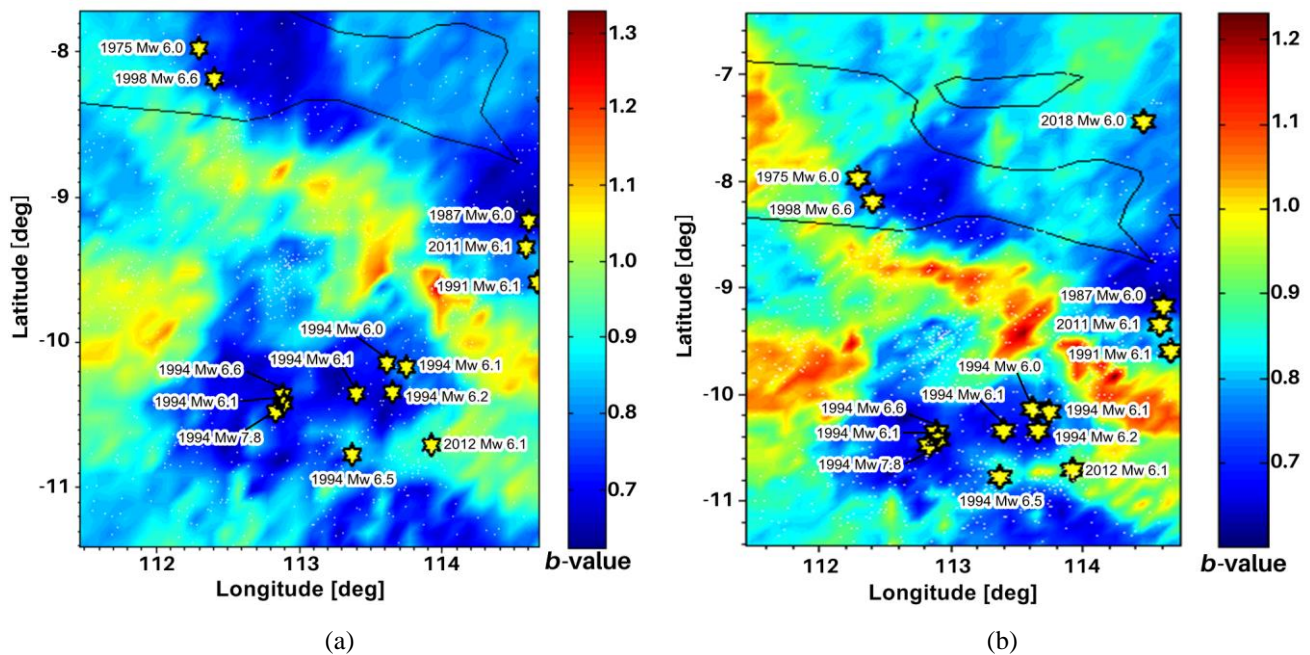
tidak berbeda jauh, maka ada indikasi bahwa seismisitas Jawa Timur didominasi oleh aktivitas seismo-tektonik wilayah selatan. Selain dekat dengan Palung Jawa atau zona subduksi pemicu gempa *megathrust*, wilayah selatan Jawa Timur juga dipengaruhi oleh aktivitas Sesar Grindulu di wilayah Kabupaten Pacitan (Fahrudin *et al.*, 2019; Cholifah *et al.*, 2020). Catatan sejarah gempa Jawa Timur wilayah utara relatif lebih sedikit dan dengan magnitudo relatif kecil dibandingkan dengan wilayah selatan. Hal ini sesuai dengan nilai  $a$  dan  $a(annual)$  pada Gambar 4(a) yang relatif lebih kecil (signifikan) dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh Gambar 4(b). Nilai  $a$  dan  $a(annual)$  yang kecil untuk Zona Utara sesuai dengan prediksi Han *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa parameter  $a$  ditentukan juga oleh luas area pengamatan.

Peran penting parameter  $a$  dan  $b$  untuk memetakan seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik wilayah (El-Isa, 2013; Tormann *et al.*, 2014; Ashadi *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016; Nava *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020; Arroyo-Solórzano and Linkimer, 2021; Taroni and Akinci, 2021) kemudian diterapkan untuk masing-masing zona seismik Jawa Timur dengan hasil wilayah selatan mendominasi kegempaan dan berpotensi mengalami bencana seismik yang lebih serius daripada wilayah utara. Kehadiran zona subduksi dekat

Palung Jawa adalah alasan utama mengapa struktur batuan bawah permukaan wilayah selatan mengalami stres tinggi dengan potensi bencana gempa *megathrust* sewaktu-waktu bisa terjadi (Widiyantoro *et al.*, 2020). Untuk melihat lebih detail tentang area mana saja di wilayah selatan Jawa Timur yang berpotensi mengalami bencana gempa *megathrust*, maka diperlukan kajian distribusi spasial nilai  $b$ .

#### Variasi spasial $b$ -value

Peta distribusi variasi spasial  $b$ -value dibuat dengan bantuan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012). Peta tersebut penting karena bisa digunakan sebagai dasar studi potensi bahaya bencana seismik di suatu wilayah (Scholz 2015; Singh, 2016; Yeken, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2020; Arroyo-Solórzano and Linkimer, 2021; Zhu, 2021). Namun demikian, ZMAP6.0 membutuhkan data yang cukup (minimal 200 kejadian) agar level resolusi gambar yang dihasilkan dapat dipercaya (Woessner and Wiemer, 2005). Dalam hal ini, jumlah data untuk Zona Utara hanya 50 kejadian sehingga ZMAP6.0 tidak mampu memberikan peta distribusi spasial  $b$ -value. Oleh karena itu, Gambar 5 berikut ini hanya menampilkan distribusi spasial  $b$ -value untuk Zona Selatan (Gambar 5a) dan Zona Utuh (Gambar 5b).



**Gambar 5.** Peta distribusi variasi spasial  $b$ -value untuk (a) Zona Selatan dan (b) Zona Utuh.

Secara umum, peta distribusi spasial  $b$ -value untuk Zona Selatan (Gambar 5a) dan Zona Utuh (Gambar 5b) konsisten satu sama lain, kecuali untuk peristiwa gempa  $M_w$  6.0 tahun 2018 yang terjadi di lepas pantai tenggara Pulau Madura. Lokasi episenter gempa tersebut masuk ke dalam bagian Zona Utara sehingga tidak muncul pada Gambar 5(a). Untuk kedua gambar, area dimana struktur batuan bawah permukaan mengalami level stres yang relatif tinggi

ditunjukkan oleh posisi episenter gempa yang ditandai dengan simbol bintang berwarna kuning yang berada pada area dengan nilai  $b$  yang relatif rendah antara 0.7 sampai 1.0. Fakta bahwa area dengan level stres yang relatif tinggi bertepatan dengan nilai  $b$  yang relatif rendah pada penelitian ini adalah sesuai dengan temuan penelitian terdahulu (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and

Bui, 2020).

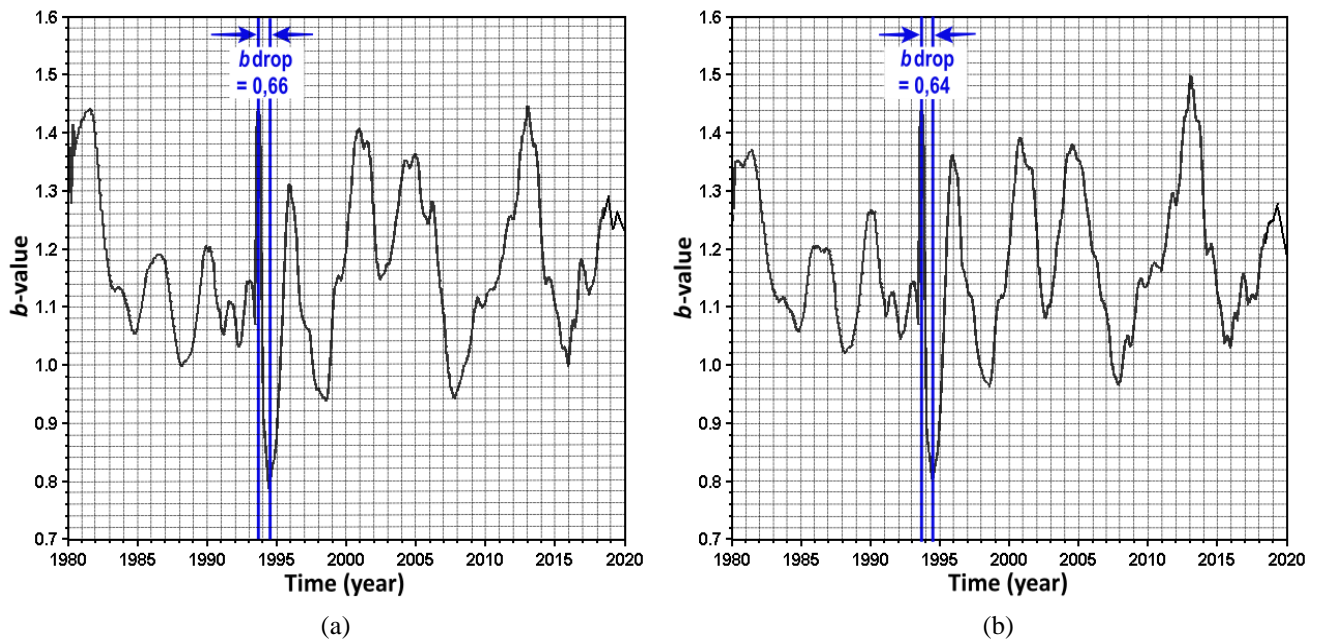
Gambar 5(a) dan 5(b) dengan tepat menunjukkan kejadian lokasi episenter *tsunami-earthquake* 2 Juni 1994 berkekuatan  $M_w$  7.8 yang terjadi di wilayah lepas pantai selatan Jawa Timur (Dziewonsky *et al.*, 1995; Polet and Kanamori, 2000; Bilek and Engdahl, 2007; Xia *et al.*, 2021). Lokasi episenter gempa pemicu tsunami tahun 1994 berada di area dengan nilai  $b$  rendah yang berasosiasi dengan stres tinggi struktur batuan bawah permukaan (*e.g.*, Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015).

Sebagai daratan yang berada pada bagian ujung dari Lempeng Eurasia, wilayah selatan Pulau Jawa dengan dominasi batuan geologi yang terbentuk pada jaman tersier (Soeria-Atmadja *et al.*, 1994; Setijadji *et al.*, 2006; Smyth *et al.*, 2008; van Gorsel, 2018; Fahrudin *et al.*, 2019; Cholifah *et al.*, 2020) memiliki aktivitas seismo-tekonik yang lebih tinggi daripada aktivitas serupa di wilayah utara dengan dominasi batuan geologi yang lebih muda yang terbentuk pada jaman kwatier (Setijadji *et al.*, 2006; Smyth *et al.*, 2008; van Gorsel, 2018; Zaputlyeva *et al.*, 2020). Hal ini terekam dengan baik dalam bentuk ketimpangan jumlah data kejadian gempa antara kedua wilayah tersebut. Oleh karena wilayah selatan Jawa Timur berada dekat dengan zona subduksi, maka frekuensi gempa besar yang terjadi di wilayah selatan Jawa Timur relatif lebih banyak daripada

wilayah utara seperti terlihat pada Gambar 5(b). Kemiripan antara Gambar 5(a) dan Gambar 5(b) sekaligus juga menunjukkan seismisitas Jawa Timur didominasi oleh aktivitas seismo-tekonik Zona Selatan.

#### Variasi temporal $b$ -value

Plot variasi temporal  $b$ -value dibuat dengan bantuan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001; Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012). Plot tersebut dapat digunakan untuk membuktikan penurunan nilai  $b$  ( $b$ -drop) yang signifikan sebelum gempa besar terjadi di suatu lokasi tertentu (Nuannin *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2012; El-Isa, 2013; Prasad and Singh, 2015; Zhu, 2021). Untuk keperluan ini, ZMAP6.0 membutuhkan minimal 200 data gempa agar level resolusi gambar yang dihasilkan dapat dipercaya (Woessner and Wiemer, 2005). Dalam hal ini, jumlah data untuk Zona Utara hanya 50 kejadian sehingga ZMAP6.0 tidak mampu memberikan plot variasi temporal  $b$ -value (masalah dan alasan yang sama juga terjadi untuk variasi spasial  $b$ -value). Oleh karena itu, Gambar 6 berikut hanya menampilkan plot variasi temporal  $b$ -value untuk Zona Selatan (Gambar 6a) dan Zona Utuh (Gambar 6b) dengan nilai absolut  $b$ -drop untuk masing-masing zona ditunjukkan secara eksplisit dalam gambar. Dalam hal ini, nilai absolut  $b$ -drop tidak begitu penting.



**Gambar 6.** Plot variasi temporal  $b$ -value untuk (a) Zona Selatan dan (b) Zona Utuh.

Plot variasi temporal  $b$ -value untuk Zona Selatan (Gambar 6a) terlihat konsisten dengan plot serupa untuk Zona Utuh (Gambar 6b). Gambar 6a menunjukkan nilai minimum  $b$ -value sebesar 0,78 dengan nilai maksimumnya mencapai 1,44 sedangkan Gambar 6b menunjukkan nilai minimum  $b$ -value sebesar 0,80 dengan nilai maksimumnya mencapai 1,50. Fakta bahwa nilai minimum  $b$  untuk kedua zona seismik masih di bawah nilai normal  $b = 1,0$  (Godano

*et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014) menandai tingginya stres batuan bawah permukaan wilayah selatan Jawa Timur. Kesimpulan ini merujuk pada temuan terdahulu tentang kebergantungan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Hal ini karena wilayah selatan Jawa Timur berada dekat dengan Palung Jawa (zona subduksi) sebagai sumber potensial pemicu gempa (Špičák *et al.*, 2007; Hall and Spakman, 2015; Fahrudin *et al.*, 2019; Widiyantoro *et*

al., 2020).

Gambar 6a dan 6b menunjukkan *b-drop* yang cukup signifikan selama fase Juni-Juli 1993 hingga Juni-Juli 1994 yang direpresentasikan oleh dua garis biru vertikal pada kedua gambar tersebut. Selama kurun waktu tersebut, *b-drop*  $\approx 0,66$  (Gambar 6a) dan *b-drop*  $\approx 0,64$  (Gambar 6b). Perlu diketahui kedua nilai *b-drop* tersebut paling besar diantara semua *b-drop* selama tahun pengamatan antara 1980-2020. Penurunan nilai *b* menunjukkan stres tektonik pada batuan geologi bawah permukaan wilayah selatan Jawa Timur yang terakumulasi dan akan dilepaskan dalam bentuk energi gempa. Batuan geologi tersebut tidak lagi mampu menyimpan energi seismik. Dalam upaya mencari keseimbangan geologi yang baru energi seismik dilepaskan melalui peristiwa gempa besar dengan magnitudo momen  $M_w$  7,8 tanggal 2 Juni 1994 dengan episenter gempa yang ditunjukkan melalui analisis peta distribusi variasi spasial *b-value* pada Gambar 5a dan 5b. Peristiwa gempa tersebut memicu tsunami yang dikenal dengan *tsunami-earthquake* (Dziewonsky *et al.*, 1995; Polet and Kanamori, 2000; Bilek and Engdahl, 2007; Xia *et al.*, 2021). Hal ini berarti variasi temporal *b-value* dapat menjadi prekursor gempa yang akan terjadi di suatu wilayah (Nuannin *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2012; El-Isa, 2013; Prasad and Singh, 2015; Zhu, 2021).

## KESIMPULAN

Penelitian ini membahas seismisitas Jawa Timur dan potensi bahaya bencana gempa tektonik terkait melalui analisis parameter *a-value*, *b-value*, dan anomali *b-value* yang diperoleh akurat dari frekuensi-magnitudo (FMD) dari katalog USGS antara 1973-2020. Hukum Gutenberg-Richter dan pendekatan *maximum likelihood* diterapkan pada gempa dengan magnitudo antara  $3,1 \leq M_w \leq 7,8$  dan kedalaman mencapai 574 km. Ketiga parameter dihitung untuk Zona Utara, Zona Selatan, dan Zona Utuh dengan hasil-hasil untuk Zona Utara:  $a = 5,77$  dan  $b = 0,96$ ; Zona Selatan:  $a = 6,49$  dan  $b = 0,81$ ; dan Zona Utuh:  $a = 6,80$  dan  $b = 0,87$ . Anomali nilai *b* tidak dilaporkan sebagai bilangan numerik melainkan sebagai peta distribusi variasi spasio-temporal *b-value*. Hasil-hasil perhitungan *a* dan *b* untuk ketiga zona seismik menunjukkan bahwa seismisitas wilayah selatan Jawa Timur lebih tinggi daripada wilayah utara karena level stres tinggi batuan yang dipicu aktivitas tektonik sepanjang zona subduksi dekat Palung Jawa. Dengan demikian, wilayah selatan Jawa Timur lebih rentan terhadap potensi bahaya bencana gempa. Analisis variasi spasio-temporal *b-value* telah menemukan area di selatan Jawa Timur dengan nilai *b* yang rendah, bertepatan dengan kejadian *tsunami earthquake* pada tanggal 2 Juni 1994. Hasil-hasil penelitian ini sama dengan temuan penelitian terdahulu tentang seismisitas Pulau Jawa. Oleh karena itu, metodologi penelitian ini bisa diterapkan untuk wilayah yang lain di Indonesia, misalnya wilayah timur Indonesia.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada USGS yang telah mengelola katalog gempa tektonik yang digunakan dalam penelitian ini yang diakses bebas melalui kanal link <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada pihak ArcGIS Online Basemaps yang menyediakan fasilitas gambar peta melalui akses secara bebas di <https://arcgis.com/home/group.html> darimana peta tektonik Pulau Jawa dan sekitarnya dibuat. Terimakasih juga ditujukan kepada *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*, 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.
- Arroyo-Solórzano, M. and Linkimer, L. 2021. Spatial variability of the *b-value* and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics*, Vol. 814, No. 228951.
- Ashadi, A. L., Harmoko, U., Yuliyanto, G. and Kaka, S. I. 2015. Probabilistic seismic-hazard analysis for Central Java Province, Indonesia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 3, pp. 1711-1720.
- Bilek, S. L. and Engdahl, E. R. 2007. Rupture characterization and aftershock relocations for the 1994 and 2006 tsunami earthquakes in the Java subduction zone. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L20311.
- Cholifah, L., Mufidah, N., Lazuardi, E., Santosa, B. J., Sungkono and Haryono, A. 2020. Identification of the Grindulu Fault in Pacitan, East Java using Magnetic Method. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 10, Issue 01, pp. 22-33.
- 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., Angraini, 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.
- Dokht, R. M. H., Gu, Y. J. and Sacchi, M. D. 2018. Migration imaging of the Java subduction zones.



- Journal of Geophysical: Solid Earth*, Vol. 123, doi: 10.1002/2017JB014524.
- Dziewonsky, A. M., Ekström, G. and Salganik, M. P. 1995. Centroid-moment tensor solutions for April-June 1994. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 88, No. 2, pp. 69-78.
- El-Isa, Z. H. 2013. Continuous-cyclic variations in the *b*-value of the earthquake frequency-magnitude distribution. *Earthquake Science*, Vol. 26, No. 5, pp. 301-320.
- Fahrudin, Hidayatullah, A. S. and Maulana, M. J. 2019. Tectonic relationships and structural development between Arjosari, Pacitan, East Java and Tawangmangu, Karanganyar, Central Java. *The 1st International Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration 2019, KnE Engineering*, pp. 47-56.
- 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.
- Görgün, E. 2013. Analysis of the *b*-values before and after the 23 October 2011 Mw 7.2 Van-Erciş, Turkey earthquake. *Tectonophysics*, Vol. 603, pp. 213-221.
- Gunawan, E. and Widiyantoro, S. 2019. Active tectonic deformation in Java, Indonesia inferred from a GPS-derived strain rate. *Journal of Geodynamics*, Vol. 123, pp. 49-54.
- Gutenberg, R. and Richter, C. F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34, pp. 185-188.
- Hall, M. and Spakman, W. 2015. Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, Vol. 658, pp. 14-45.
- Hamilton, W. 1979. Tectonics of the Indonesian region: U.S. Geological Survey Professional Paper 1078, pp. 1-345.
- 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 earthquake. *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 81, pp. 103-110.
- 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.
- Hui, C., Cheng, C., Shen, S., Gao, P., Chen, J., Yang, J. and Zhao, M. 2021. The effect of the Wenchuan and Lushan earthquakes on the size distribution of earthquakes along the Longmenshan Fault. *Applied Science*, Vol. 11, No. 8534.
- 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.
- 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. 1988. Maximum likelihood estimation of Gutenberg-Richter *b* parameter for uncertain magnitude values. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 127, pp. 573-579.
- 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., McClusky S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning P., Meilano, I., Efendi, J. and Wijanarto, A. B. 2017. The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 458, pp. 69-79.
- 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.
- Luen, B and Stark, P. B. 2012. Poisson tests of declustered catalogues. *Geophysical Journal International*, Vol. 189, pp. 691-700.
- Marliyani, G. I., Arrowsmith, J. R. dan Helmi, H. 2019. Evidence for multiple ground-rupturing earthquakes in the Past 4,000 years Along the Pasuruan Fault, East Java, Indonesia: Documentation of active normal faulting in the Javan backarc. *Tectonics*, Vol. 38, pp. 1489-1506.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Heuret, A. and Funicello, F. 2016. Where giant earthquakes may come. *AGU Publications, Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, No. 10, pp. 7322-7336.
- 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.
- Natawidjaja, D. H. 2021. *Riset Sesar Aktif Indonesia dan*

*Peranannya dalam Mitigasi Bencana Gempa dan Tsunami.* Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Ilmu Kebumihan. Jakarta: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

- 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. 2005. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L11307.
- 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.
- Polet, J. and Kanamori, H. 2000. Shallow subduction zone earthquakes and their tsunamigenic potential. *Geophysical Journal International*, Vol. 142, pp. 684-702.
- 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.
- 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.
- Reasenber, P. 1985. Second-order moment of central California seismicity, 1969-1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 90, Issue B7, pp. 5479-5495.
- 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.
- Scholz, C. H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b-value. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, pp. 1399-1402.
- Setijadji, L. D., Kajino, S., Imai, A. and Watanabe, K. 2006. Cenozoic island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization. *Resource Geology*, Vol. 56, No. 3, pp. 267-292.
- 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.
- Smyth, H. R., Hall, R. and Nichols, G. J. 2008. Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: the stratigraphic record of eruptions on an active continental margin. *The Geological Society of America Special Paper 436*, pp. 199-222.
- Soeria-Atmadja, R., Maury, R. C., Bellon, H., Pringgoprawiro, H., Polve, M. and Priadi, B. 1994. Tertiary magmatic belts in Java. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*. Vol. 9, Issues 1-2, pp. 13-27.
- Spada, M., Tormann, T., Wiemer, S. and Enescu, B. 2013. Generic dependence of the frequency-size distribution of earthquakes on depth and its relation to the strength profile of the crust. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp. 709-714.
- 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.
- Susilo, A. and Adnan, Z. 2013. Probabilistic seismic hazard analysis of East Java region, Indonesia. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 341-344.
- Susilo, A., Sunaryo, Fitriah, F. and Sarjiyana. 2018. Fault analysis in Pohgajih village, Blitar, Indonesia using resistivity method for hazard risk reduction. *International Journal of Geomate*, Vol. 14, Issue 41, pp. 111-118.
- Taroni, M. and Akinci, A. 2021. Good practices in PSHA: declustering, b-value estimation, foreshocks and aftershocks inclusion; a case study in Italy. *Geophysical Journal International*, Vol. 224, pp. 1174-1187.
- 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.
- 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.
- van Gorsel, J. T. 2018. Bibliography of the geology of Indonesia and surrounding areas: Java, Madura, Java Sea, Ed. 7.0, pp. 1-297.
- van Stiphout, T., Zhuang, J. and Marsan, D. 2012. Seismicity declustering. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, pp. 1-25, doi: 10.5078/corssa-52382934.
- 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.
- 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. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol 72, No.

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, No. 2, pp. 684-698.
- Xia, Y., Geersen, J., Klaeschen, D., Ma, B., Lange, D., Riedel, M., Schnabel, M. and Kopp, H. 2021. Marine forearc structure of eastern Java and its role in the 1994 Java tsunami earthquake. *Solid Earth*, Vol. 12, pp. 2467-2477.
- Yamagishi, Y., Saito, K., Hirahara, K. and Ueda, N. 2021. Spatio-temporal clustering of earthquakes based on distribution of magnitudes. *Applied Network Science*, Vol. 6, No. 71.
- Yang, X., Singh, S. C. and Tripathi, A. 2020. Did the Flores backarc thrust rupture offshore during the 2018 Lombok earthquake sequence in Indonesia? *Geophysical Journal International*, Vol. 221, pp. 758-768.
- Yeken, T. 2016. Spatial Analysis of b-value variability in Armutlu Peninsula (NW Turkey). *Open Geoscience*, Vol. 8, pp. 548-555.
- Zaputlyaeva, A., Mazzini, A., Blumenberg, M., Scheeder, G., Kürschner, W. M., Kus, J., Jones, M. T. and Frieling, J. 2020. Recent magmatism drives hydrocarbon generation in north-east Java, Indonesia. *Scientific Reports: Nature Research*, Vol. 10, No. 1786.
- 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.