

## PENENTUAN PARAMETER SEISMİK $a$ -VALUE DAN $b$ -VALUE UNTUK ANALISIS POTENSI BENCANA GEMPA DI WILAYAH MALUKU

Teti Apriliani, Tjipto Prastowo

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

Email: [teti.17030224006@mhs.unesa.ac.id](mailto:teti.17030224006@mhs.unesa.ac.id)

### Abstrak

Kerentanan wilayah Maluku terhadap bencana gempa dipelajari melalui analisis potensi bahaya bencana gempa dengan menentukan parameter seismik  $a$ -value dan  $b$ -value yang diperoleh dari data statistik gempa tektonik yang terjadi di wilayah tersebut selama kurun waktu tertentu. Kedua parameter seismik mendiskripsikan level seismisitas dan stress mekanik yang disimpan dalam lipatan batuan bawah permukaan. Secara prinsip, kedua parameter ditentukan dari distribusi frekuensi-magnitudo gempa dengan bantuan hukum Gutenberg-Richter. Pada penelitian ini, data sekunder distribusi frekuensi-magnitudo gempa diperoleh dari katalog USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) dengan variasi kedalaman sumber sampai 625 km di bawah permukaan dan variasi magnitudo gempa  $4,3 \leq M_w \leq 7,3$  selama kurun waktu 2009-2019. Perhitungan parameter  $a$ -value dan  $b$ -value dilakukan dengan metode kuadrat terkecil dan *maximum likelihood* untuk uji konsistensi dan reliabilitas estimasi kedua parameter tersebut. Estimasi berdasarkan metode *maximum likelihood* memberikan hasil yang lebih akurat dan stabil karena melibatkan penapisan data sebelum proses pengolahan data dilakukan. Berdasarkan hasil analisis diperoleh persamaan empiris Gutenberg-Richter dengan metode *maximum likelihood* adalah  $\log N = 9,55 - 1,34M$ , di mana  $a = 9,55$  dan  $b = 1,34$  dengan  $N$  adalah frekuensi kejadian gempa dan  $M$  adalah magnitudo yang lebih besar dari  $M_c$ , batas bawah magnitudo di mana hukum Gutenberg-Richter masih berlaku. Akurasi hasil estimasi  $a$ -value dan  $b$ -value dijamin melalui penentuan  $M_c$  yang akurat, di mana  $M_c = 5,0$  diperoleh dari plot distribusi frekuensi-magnitudo gempa. Berdasarkan nilai parameter  $a$ -value dan  $b$ -value, dapat disimpulkan bahwa wilayah Maluku memiliki level seismisitas yang relatif tinggi dan rentan terhadap potensi bencana gempa tektonik yang dipicu oleh aktivitas seismo-tektonik patahan lokal Sorong dan dua zona mikro-subduksi Busur Sangihe dan Busur Halmahera.

**Kata Kunci:** seismisitas Maluku, gempa tektonik,  $a$ -value,  $b$ -value, hukum Gutenberg-Richter

### Abstract

The vulnerability of Molucca to seismic hazards can be examined through analysis of earthquake-event potential in the region. This analysis can be performed by determining parameters  $a$ -value and  $b$ -value acquired from datasets of events during a time period, describing seismicity rate and mechanical stress accumulated within local crustal rocks. These parameters were estimated using the Gutenberg-Richter law in this study using frequency-magnitude distribution obtained from the USGS catalog at <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> with varying depths to 625 km below the surface and earthquake sizes  $4,3 \leq M_w \leq 7,3$  during 2009-2019. The calculations were carried out using two separate methods, the least squares and the maximum likelihood to search for consistency and reliability of the results. Estimates using the maximum likelihood method provides results that are more accurate and stable due to data filtering prior to data processing. Using the maximum likelihood method selected, the Gutenberg-Richter empirical equation was found to be  $\log N = 9,55 - 1,34M$ , where  $a = 9,55$  and  $b = 1,34$  with  $N$  denotes the event frequency and  $M$  represent magnitudes greater than  $M_c$ , defined as the lower end of magnitudes above which the Gutenberg-Richter law applies. The accuracy in  $a$ -value and  $b$ -value estimates was provided by accurate determination of  $M_c = 5,0$  directly obtained from the plot of the frequency-magnitude distribution. Based on the calculated parameters, it can be concluded that Molucca is in the relatively high level of seismicity and prone to seismic threats owing to a combined effect of seismo-tectonic activities from both a local active Sorong fault and subduction processes of Sangihe arc and Halmahera arc.

**Keywords:** Molucca seismicity, tectonic earthquake,  $a$ -value,  $b$ -value, Gutenberg-Richter law

### PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang terletak di pertemuan lempeng tektonik yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Laut Filipina. Interaksi antar lempeng tersebut mengakibatkan sebagian besar wilayah Indonesia sering mengalami gempa tektonik (Bock *et al.*, 2003) sebagai bukti dari kerentanan terhadap bencana geologi (Irsyam dkk., 2017). Oleh karena itu, pemahaman tentang risiko dan potensi bahaya bencana geologi di wilayah Indonesia sangat diperlukan (Cummins, 2017). Dalam hal ini, studi

seismisitas yang memetakan kerentanan wilayah Indonesia terhadap potensi bahaya bencana gempa adalah penting.

Gempa tektonik merupakan peristiwa bergetarnya permukaan tanah akibat pelepasan energi seismik dari dalam perut menuju ke permukaan Bumi yang ditandai dengan deformasi fisis karena tekanan kerak Bumi (Vavrycuk, 2015). Berdasarkan lokasi sumber, terdapat dua jenis gempa yaitu *intraplate earthquakes* yang terjadi di sepanjang zona patahan (Gangopadhyay and Talwani, 2003) dan *interplate earthquakes* yang terjadi di sepanjang zona subduksi atau zona batas antar dua lempeng tektonik

yang saling bertumbukan (Marzocchi *et al.*, 2016). Bahaya bencana gempa tektonik seringkali merugikan baik berupa korban jiwa maupun kerusakan lingkungan.

Studi komprehensif Sabtaji (2020) melaporkan wilayah Maluku memiliki frekuensi kejadian gempa terbanyak di Indonesia dengan 8834 kejadian selama kurun waktu 2009-2019. Selain itu, BMKG juga melaporkan pada tahun 2016 gempa tektonik dengan magnitudo berkekuatan  $M \leq 5,0$  mendominasi. Level seismisitas tinggi tersebut dipicu oleh aktivitas tektonik pertemuan antara Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Laut Filipina serta pada bagian utara Pulau Seram adalah batas zona subduksi Lempeng Indo-Australia (Yusuf dan Santosa, 2016).

Sebagai bagian dari upaya studi mitigasi dan pengurangan risiko bencana, maka informasi kegempaan wilayah adalah penting (Satriano *et al.*, 2011). Informasi kegempaan wilayah dapat diperoleh dari studi aktivitas seismo-tektonik dengan konsep dan metode penanganan yang tepat. Misalnya, gempa tektonik di zona subduksi (*interplate earthquakes*) akibat tumbukan antar lempeng yang memicu tsunami berdampak global dengan pelepasan energi seismik berkekuatan relatif besar  $M_w$  9,0 terjadi di Sumatera-Andaman pada tanggal 26 Desember 2004 (Ishii *et al.*, 2005; Nuannin *et al.*, 2005; Pollitz *et al.*, 2006). Selain itu, gempa akibat aktivitas sesar di sepanjang zona patahan (*intraplate earthquakes*) juga bisa memicu tsunami yang mematikan, seperti gempa pemicu tsunami di Palu yang dipicu oleh aktivitas sesar Palu-Koro pada tanggal 28 September 2018 dengan magnitudo  $M_w$  7,5 (Jamelot *et al.*, 2019; Hidayat *et al.*, 2020).

Tingginya tingkat seismisitas wilayah Maluku serta kemungkinan timbulnya tsunami yang menyertai kejadian gempa tektonik menjadi perhatian khusus pada penelitian ini. Oleh karena itu, fokus penelitian adalah menganalisis potensi bahaya dan pengurangan risiko bencana gempa tektonik di wilayah tersebut secara efektif. Dalam konteks ini, penentuan *a*-value dan *b*-value sebagai parameter seismik studi seismisitas dan analisis potensi bahaya bencana seismik di wilayah tersebut (Godano *et al.*, 2014; Popandopoulos and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dalam hal ini, parameter *a*-value mendeskripsikan tingkat keaktifan gempa yang bergantung pada luas wilayah, durasi pengamatan, dan magnitudo terbesar (Han *et al.*, 2015) dan parameter *b*-value mendeskripsikan tingkat tegangan tektonik dan tingkat kerapuhan batuan bawah permukaan suatu wilayah (Godano *et al.*, 2014).

Formulasi yang biasa digunakan untuk menentukan parameter *a*-value dan *b*-value adalah persamaan relasi linier-logaritmik distribusi frekuensi-magnitudo hukum Gutenberg-Richter. Persamaan ini berlaku untuk variasi kondisi tektonik (lokasi geografis wilayah yang diamati), variasi kedalaman (dangkal, menengah, dalam), variasi temporal katalog gempa, dan sumber seismisitas baik alami

maupun buatan (Marzocchi and Sandri, 2003). Beberapa penelitian terdahulu menerapkan keberlakuan persamaan Gutenberg-Richter di Indonesia (Diantari *et al.*, 2018) dan wilayah di luar Indonesia (Godano *et al.*, 2014; Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Hukum Gutenberg-Richter tepat digunakan dalam studi seismisitas sebagai analisis potensi bahaya bencana gempa.

Penentuan parameter *a*-value dan *b*-value bertujuan untuk memetakan kerentanan sekaligus menjadi basis terhadap potensi bahaya bencana gempa tektonik sebagai upaya pengurangan risiko bencana gempa tektonik yang ditimbulkan di wilayah Maluku. Oleh karena itu, estimasi akurat parameter *a*-value dan *b*-value adalah penting (Godano *et al.*, 2014). Kedua parameter seismik tersebut diketahui dari perhitungan melalui metode kuadrat terkecil (Castellaro *et al.*, 2006) dan metode *maximum likelihood* (Marzocchi and Sandri, 2003). Dua metode hitung tersebut merupakan metode sederhana yang dipilih untuk mengetahui konsistensi dan reliabilitas masing-masing metode melalui akurasi hasil ukur yang diperoleh.

### Hukum Gutenberg-Richter

Tingkat seismisitas suatu wilayah dapat diketahui melalui persamaan distribusi frekuensi-magnitudo gempa dari hukum Gutenberg-Richter (Marzocchi *et al.*, 2016) sebagai berikut,

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

di mana  $N$  adalah frekuensi kejadian gempa tektonik dengan jangkauan magnitudo  $M \geq M_c$  di wilayah yang sedang diamati selama kurun waktu tertentu (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dalam hal ini,  $M_c$  (*magnitude of completeness*) merupakan magnitudo terkecil yang bisa dideteksi dengan baik oleh instrumen ukur di lapangan sebagai fungsi spasial dan temporal (Diantari *et al.*, 2018). Dengan kata lain,  $M_c$  berfungsi sebagai batas bawah jangkauan magnitudo di mana hukum Gutenberg-Richter masih valid. Akurasi  $M_c$  ikut menentukan akurasi estimasi parameter seismik *a*-value dan *b*-value (Mignan and Woessner, 2012; Han *et al.*, 2015; Diantari *et al.*, 2018).

Persamaan (1) merupakan persamaan garis lurus antara  $\log N$  sebagai variabel respons di sumbu  $Y$  sedangkan  $M$  sebagai variabel manipulasi di sumbu  $X$ . Dalam hal ini, parameter *a*-value adalah titik potong garis lurus terhadap variabel respons sedangkan *b*-value adalah kemiringan garis lurus yang menunjukkan relasi linier distribusi frekuensi-magnitudo sebagai prekursor terjadi gempa besar (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014).

Estimasi kedua parameter tersebut bisa dilakukan dengan berbagai metode hitung seperti metode kuadrat terkecil dan *maximum likelihood* yang akan dijelaskan dengan detail setelah ini. Kedua metode hitung tersebut paling umum digunakan untuk menentukan parameter seismik *a*-value dan *b*-value sekaligus untuk mengetahui potensi bahaya bencana gempa tektonik di Maluku. Namun,

Kedua metode perhitungan ini tidak melibatkan faktor kualitas bangunan dan infrastruktur, kepadatan penduduk, serta tata ruang kota (Irsyam dkk., 2017).

## METODE

### Metode Kuadrat Terkecil

Metode kuadrat terkecil diterapkan untuk mencari linieritas dua variabel yaitu variabel manipulasi ( $X$ ) dan variabel respon ( $Y$ ). Regresi ini tidak dapat dibalik, yaitu garis  $Y$  terhadap  $X$  tidak dapat dibalik untuk mendapatkan regresi dari  $X$  terhadap  $Y$  (Castellaro *et al.*, 2006). Secara prinsip, persamaan linier antara dua variabel dituliskan sebagai berikut,

$$Y = a + bX \quad (2)$$

di mana  $X$  adalah variabel manipulasi,  $Y$  adalah variabel respons, sedangkan  $a$  dan  $b$  merupakan konstanta. Secara matematis, penentuan konstanta  $a$  dan  $b$  bisa dituliskan dalam bentuk persamaan (3) dan (4) berikut,

$$b = \frac{n \sum (X_i Y_i) - (\sum X_i) \cdot (\sum Y_i)}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{n \sum Y_i - b \sum X_i}{n} \quad (4)$$

di mana  $n$  merupakan jumlah data apabila menggunakan data tunggal dan  $n$  merupakan jumlah kelas apabila menggunakan data kelompok.

### Metode Maximum Likelihood

Metode *maximum likelihood* adalah metode statistik yang digunakan untuk memecahkan masalah tentang seismologi seperti estimasi parameter  $a$ -value dan  $b$ -value (Marzocchi and Sandri, 2003) berdasarkan probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Sebelum kedua parameter ini ditentukan, terlebih dahulu membuat plot distribusi frekuensi-magnitudo (Naylor *et al.*, 2010). Estimasi  $b$ -value dapat ditentukan dari persamaan berikut,

$$b = \frac{1}{\ln(10) [\bar{M} - (M_c - \Delta M / 2)]} \quad (5)$$

di mana  $\bar{M}$  merupakan magnitudo rata-rata dengan skala  $M \geq M_c$  dan  $\Delta M = 0,1$  merupakan *binning interval* pada skala magnitudo tersebut. Estimasi  $a$ -value dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$a = \log N + \log(b \ln 10) + M_c b \quad (6)$$

Persamaan (6) tersebut menunjukkan bahwa level akurasi estimasi  $b$ -value dan penentuan  $M_c$  ikut menentukan level akurasi  $a$ -value (Mignan and Woessner, 2012; Popandopoulos and Chatziioannou, 2014).

### Magnitude of Completeness

Secara prinsip,  $M_c$  (*magnitude of completeness*) merupakan nilai magnitudo gempa terkecil di mana relasi linier-logaritmik hukum Gutenberg-Richter masih valid. Persamaan hukum Gutenberg-Richter dibangkitkan dari hubungan distribusi frekuensi-magnitudo gempa dengan membuat kelas statistik magnitudo gempa (Naylor *et al.*, 2010). Menurut Mignan and Woessner (2012), penentuan  $M_c$  diperbolehkan untuk tidak bernilai tunggal karena untuk variasi teknik hitung yang berbeda terkadang bisa memiliki nilai yang berbeda. Beberapa penelitian terdahulu

menerapkan estimasi  $M_c$  pada skala magnitudo kecil (Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012) tidak mempertimbangkan data dengan magnitudo kurang dari nilai  $M_c$  karena diasumsikan tidak ikut menentukan karakteristik batuan bawah permukaan suatu wilayah dan magnitudo kurang dari nilai  $M_c$  akan terekam menyimpang dari hukum Gutenberg-Richter. Oleh karena itu, akurasi nilai  $M_c$  ikut menentukan validitas hukum Gutenberg-Richter hubungan linier-logaritmik pada persamaan (1) (Wiemer and Wyss, 2000; Popandopoulos and Chatziioannou, 2014; Diantari *et al.*, 2018).

### Data dan Variabel Operasional Penelitian

Pada penelitian ini memanfaatkan data sekunder yang diperoleh dari katalog *United States Geological Survey* (USGS) yang dapat diakses secara mudah dari situs berikut ini <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> dengan periode pengamatan 2009-2019. Dalam hal ini, data gempa di Maluku selama kurun waktu tersebut sejumlah 4598 kejadian yang meliputi variasi magnitudo kecil sampai besar dengan jangkauan  $4,3 \leq M_w \leq 7,3$  dan dengan sumber bervariasi sampai kedalaman 625 km yang meliputi sumber relatif dangkal, menengah, dan dalam. Data sejumlah itu masih merupakan data mentah karena belum dilakukan penapisan (Amaro-Mellado and Bui, 2020; Diantari *et al.*, 2018) untuk meningkatkan akurasi dan reliabilitas perhitungan  $a$ -value dan  $b$ -value di wilayah Maluku. Penapisan dilakukan dengan menghapus data gempa awal dan gempa susulan sehingga hanya didapatkan data gempa utama (van Stiphout *et al.*, 2012).

Tiga variabel operasional pada penelitian ini seperti variabel manipulasi adalah magnitudo momen  $M_w$  (sumbu horizontal) sedangkan variabel respons adalah distribusi frekuensi kejadian  $N$  gempa atau nilai logaritmik  $\log N$  (sumbu vertikal). Variabel kontrol adalah metode kuadrat terkecil dan *maximum likelihood* yang digunakan untuk penentuan estimasi parameter seismik  $a$ -value dan  $b$ -value melalui persamaan distribusi frekuensi-magnitudo dari hukum Gutenberg-Richter di wilayah Maluku.

Dengan bantuan aplikasi Zmap 6.0, Matlab R2010a, dan *Excel*, analisis data dan plot grafik digunakan untuk estimasi parameter  $a$ -value dan  $b$ -value yang diperoleh dari persamaan hukum Gutenberg-Richter menggunakan metode kuadrat terkecil dan *maximum likelihood*. Kedua metode ini berbeda dalam hal apakah dilakukan penapisan atau tidak. Sebelum melakukan pengolahan data, hal pertama yang dilakukan yaitu mengonversi skala  $mb$  (*body wave magnitude*) menjadi magnitudo momen  $M_w$ . Skala magnitudo momen  $M_w$  dipilih karena paling akurat untuk semua jangkauan magnitudo (Scordilis, 2006) melalui persamaan berikut,

$$M_w = 0,85(\pm 0,04) mb + 1,03(\pm 0,23) \quad (8)$$

Selain itu, skala  $M_w$  memiliki hubungan langsung dengan energi seismik  $M_0$  yang dilepaskan (Amaro-Mellado and

Bui, 2020). Menurut Kanamori (1983), hubungan antara  $M_w$  dan  $M_o$  adalah sebagai berikut,

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_o - 16,1) \quad (9)$$

Dalam pengolahan data, metode kuadrat terkecil tidak memerlukan penapisan sehingga 4598 data utuh diolah pada aplikasi *Excel*. Pada contoh isian data olahan metode kuadrat terkecil, di mana  $X_i$  merupakan nilai tengah dari distribusi kelas magnitudo momen  $M_w$  dengan banyaknya kelas  $k = 1 + 3.3 \log N$ , di mana  $N$  merupakan jumlah data dan  $Y_i$  merupakan logaritma frekuensi kejadian  $\log N$ . Plot data gempa dilakukan dengan magnitudo momen  $M_w$  sebagai sumbu  $X$  dan logaritma frekuensi kejadian  $\log N$  sebagai sumbu  $Y$ .

Metode estimasi kedua adalah *maximum likelihood*, di mana contoh isian data olahan pada *Excel* disesuaikan seperti yang tertera pada aplikasi *Zmap 6.0* yaitu bujur, lintang, tahun, bulan, kekuatan gempa ( $M_w$ ), kedalaman gempa (km), jam, dan menit agar dapat dijalankan. Data yang sudah sesuai disimpan dengan format *.csv* dan dibuka kembali melalui *notepad* untuk diubah menjadi format *.dat* yang kemudian dijadikan masukan untuk aplikasi *Zmap 6.0* (Wiemer, 2001) dengan menggunakan *Matlab R2010a*.

Metode *maximum likelihood* relatif lebih kompleks di mana yang awalnya berjumlah 4598 data, namun setelah mengalami penapisan Uhrhammer (Panday *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) menjadi 2803 kejadian gempa. Secara teknis, penapisan dilakukan dengan tujuan untuk menghapus data gempa awal dan gempa susulan sehingga hanya tersisa data gempa utama saja. Data gempa utama tersebut kemudian diolah untuk mendapatkan distribusi statistik frekuensi-magnitudo,  $M_c$ ,  $a$ -value,  $b$ -value, dan inspeksi visual variasi temporal  $b$ -value di wilayah Maluku. Secara teknis, penentuan  $M_c$  mengikuti metodologi yang dibahas oleh Woessner and Wiemer (2005) yaitu dengan menggunakan teknik *maximum curvature* (MAXC). Teknik tersebut telah dibahas secara detail pada Wiemer and Wyss (2000) dan secara ringkas pada Mignan and Woessner (2012).

Perbandingan hasil estimasi parameter  $a$ -value dan  $b$ -value yang ditentukan berdasarkan persamaan hukum Gutenberg-Richter dengan menggunakan metode kuadrat terkecil dan *maximum likelihood* dengan tujuan melihat seberapa dekat estimasi parameter menurut kedua metode hitung tersebut. Analisis kelebihan dan kekurangan kedua metode hitung dilakukan dengan memberikan estimasi ketidakpastian perhitungan kedua parameter seismik.

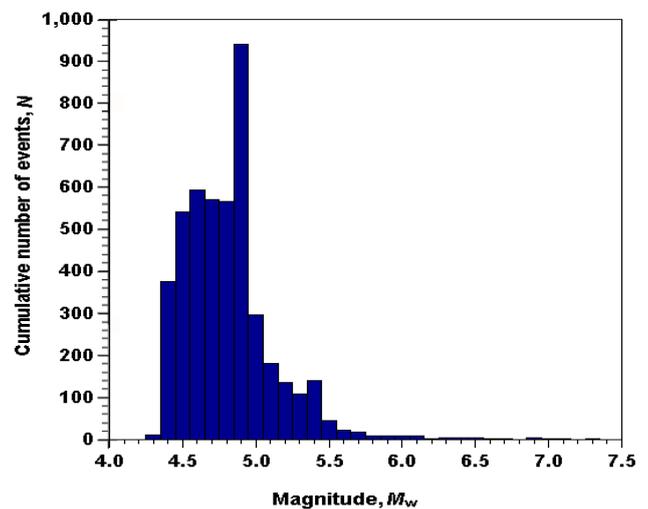
Semua informasi seismik yang diperoleh dari kedua metode, khususnya metode *maximum likelihood* ini dianalisis secara komprehensif untuk menentukan potensi bahaya bencana di wilayah Maluku sebagai bagian dari upaya pengurangan dampak dan risiko bencana geologi, baik kerusakan bangunan maupun korban jiwa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data gempa yang dihimpun di katalog USGS diperoleh hasil dan pembahasan estimasi parameter  $a$ -value dan  $b$ -value dari dua metode hitung yaitu metode kuadrat terkecil dan *maximum likelihood*. Masing-masing akan dibahas terpisah sebelum dilakukan analisis secara menyeluruh untuk mengetahui potensi bahaya bencana gempa tektonik dan tingkat keaktifan gempa di Maluku.

### Parameter $a$ dan $b$ (Metode Kuadrat Terkecil)

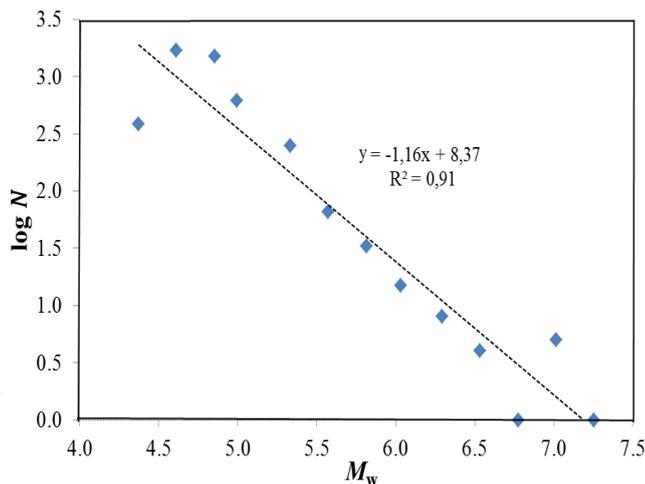
Pada metode kuadrat terkecil tidak dilakukan penapisan data gempa sehingga 4598 data gempa tetap utuh untuk diolah pada aplikasi *Zmap 6.0* (Wiemer, 2001) yang dijalankan menggunakan *Matlab R2010a*. Berikut Gambar 1 adalah histogram hubungan antara magnitudo momen  $M_w$  dan frekuensi kejadian gempa dengan magnitudo  $4,3 \leq M_w \leq 7,3$  yang dibagi menjadi beberapa kelas statistik dengan lebar masing-masing kelas sekitar 0,08 untuk mendapatkan *optimum solution*.



**Gambar 1.** Plot  $M_w$  vs  $N$  dengan metode kuadrat terkecil.

Berdasarkan data histogram di atas menunjukkan interval kelas magnitudo antara  $4,86 \leq M_w \leq 4,94$  dengan frekuensi tertinggi sejumlah 942 kejadian (gempa awal, gempa utama, dan gempa susulan). Ilustrasi data gempa pada Gambar 1 terlihat untuk magnitudo sesudah kelas dengan frekuensi kejadian tertinggi akan menunjukkan penurunan frekuensi kejadian gempa di Maluku di mana hal tersebut sesuai dengan prediksi relasi linier-logaritmik secara eksponensial hukum Gutenberg-Richter (Naylor *et al.*, 2010). Informasi seismik penting lain pada Gambar 1 diperoleh nilai tengah dari kelas dengan frekuensi tertinggi sekitar 4,90 yang merupakan estimasi nilai  $M_c$ .

Gambar 2 merupakan grafik magnitudo momen  $M_w$  terhadap nilai logaritma frekuensi jumlah kejadian  $\log N$ . Gambar tersebut menunjukkan hubungan antara magnitudo momen  $M_w$  sebagai variabel manipulasi dan logaritma frekuensi kejadian  $\log N$  sebagai variabel respons dengan koefisien korelasi  $R^2 = 0.91$  yang merupakan korelasi kuat.



Gambar 2. Plot  $M_w$  vs  $\log N$  dengan metode kuadrat terkecil.

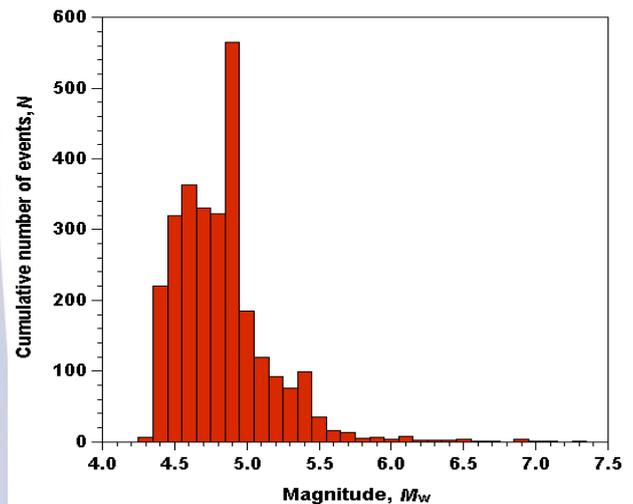
Pada grafik tersebut ada hasil yang menyimpang dari garis regresi yang mendeskripsikan relasi matematis linier-logaritmik hukum Gutenberg-Richter yaitu pada distribusi magnitudo sekitar kurang dari 5,0 dan lebih besar dari 6,8. Hal ini terjadi karena proses pengolahan data metode ini tidak dapat menjangkau magnitudo dengan kekuatan terlalu kecil maupun besar. Persamaan empiris Gutenberg-Richter dengan menggunakan metode ini yaitu  $\log N = 8,37 - 1,16M$ , di mana parameter  $a$ -value sebesar 8,37 dan  $b$ -value sebesar 1,16.

Pada metode ini diperoleh parameter  $b$ -value sebesar 1,16 di mana hasil tersebut cukup baik karena sesuai dengan ‘harga normal’ yaitu  $b \approx 1,0$  (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Namun, penentuan parameter seismik  $a$ -value dan  $b$ -value dengan metode kuadrat terkecil memanfaatkan *mixed events* (gempa awal, gempa utama, dan gempa susulan) tanpa adanya proses penapisan. Hal ini menyebabkan akurasi hasil hitung parameter  $b$ -value relatif rendah dari ‘kemurnian data’ yang terekam oleh instrument ukur. Selain itu, pada metode ini juga masih diragukan ketidakpastian hasil ukurnya. Apabila parameter  $b$ -value tidak cukup akurat, maka  $a$ -value yang diperoleh juga tidak akurat (Han *et al.*, 2015; Diantari *et al.*, 2018).

Karakteristik gempa di suatu wilayah akan lebih baik jika dianalisis hanya memanfaatkan data gempa utama sehingga estimasi kedua parameter seismik yang diperoleh akan memiliki akurasi yang tinggi. Hal tersebut dikarenakan pelepasan energi seismik dominan terjadi pada saat gempa utama (Kusky, 2008) di mana durasi kejadian relatif lebih singkat dibanding durasi gempa awal dan gempa susulan. Selain itu, metode kuadrat terkecil dalam proses pengolahan data dilakukan dengan membuat ‘kelas’ dan kemungkinan terjadi 1-2 kelas statistik tersebut mengalami kekosongan data. Hal tersebut menyebabkan perhitungan statistik berbasis 1-2 kelas kosong tersebut menyimpang jauh dari nilai benar yang diharapkan. Dengan demikian, metode ini tidak disarankan untuk menentukan estimasi parameter seismik (Han *et al.*, 2015).

### Parameter $a$ dan $b$ (Metode *Maximum Likelihood*)

Data gempa tektonik yang awalnya berjumlah 4598 data berupa *mixed events*, namun setelah mengalami penapisan menjadi 2803 data gempa utama. Secara teknis, penapisan dilakukan mengikuti metodologi yang dibahas oleh van Stiphout *et al.* (2012) yaitu menghapus data gempa awal dan gempa susulan sehingga hanya tersisa data gempa utama saja. Data gempa utama ini kemudian diolah menggunakan aplikasi Zmap 6.0 (Wiemer, 2001) dengan bantuan Matlab R2010a menjadi beberapa kelas statistik dengan lebar masing-masing kelas sebesar 0,08 untuk mendapatkan *optimum solution* seperti Gambar 3.



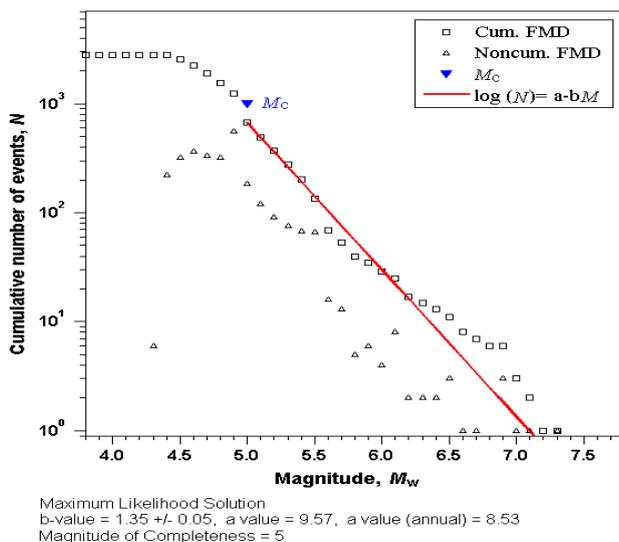
Gambar 3. Plot  $M_w$  vs  $N$  dari metode *maximum likelihood*.

Berdasarkan data histogram diatas diperoleh interval kelas magnitudo antara  $4,86 \leq M_w \leq 4,94$  memiliki frekuensi tertinggi sejumlah 568 kejadian. Distribusi magnitudo gempa setelah kelas frekuensi tertinggi pada Gambar 3 mengalami penurunan frekuensi kejadian gempa di mana sesuai dengan penurunan eksponensial linier-logaritmik hukum Gutenberg-Richter (Naylor *et al.*, 2010). Nilai tengah dari kelas magnitudo dengan frekuensi tertinggi atau estimasi  $M_c$  dari histogram diatas adalah 4,95. Hasil tersebut terdapat sedikit perbedaan dengan hasil nilai  $M_c$  yang ditentukan oleh metode kuadrat terkecil. Namun, hasil dari  $M_c$  pada metode ini masih diperlukan koreksi lebih lanjut melalui aplikasi Zmap 6.0.

Gambar 1 dan Gambar 3 merupakan plot distribusi frekuensi-magnitudo statistik gempa di wilayah Maluku yang menjadi data penelitian ini mengalami penurunan eksponensial frekuensi kejadian gempa setelah nilai magnitudo dengan frekuensi tertinggi. Berdasarkan dua histogram tersebut membuktikan adanya hukum Gutenberg-Richter (Diantari *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020) sebagai solusi distribusi statistik gempa di wilayah tersebut, di mana magnitudo dengan frekuensi tertinggi berfungsi sebagai nilai  $M_c$ . Kedua metode hitung dalam menentukan  $M_c$  memiliki hasil yang hampir sama, yaitu 4,90 pada metode kuadrat terkecil dan 4,95 pada metode *maximum likelihood*. Namun, tidak berarti bahwa parameter

$b$ -value yang diperoleh dengan kedua metode hitung tersebut juga pasti hampir sama meskipun memiliki nilai  $M_c$  yang hampir sama. Hal ini dikarenakan pada persamaan (5) untuk estimasi parameter  $b$ -value menurut metode *maximum likelihood* dipengaruhi oleh  $\bar{M}$  dan  $\Delta M$  yang ditentukan oleh data dan kelas statistik gempa.

Plot distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 4 dilakukan dengan aplikasi Zmap 6,0 (Wiemer, 2001) yang bertujuan untuk memastikan akurasi dan konsistensi dari nilai  $M_c$ ,  $b$ -value, dan  $a$ -value. Gambar 4 berikut merupakan plot magnitudo momen  $M_w$  dibuat terhadap jumlah kumulatif kejadian  $N$  dan logaritma jumlah kejadian  $\log N$  di mana berbeda seperti ilustrasi Gambar 2.



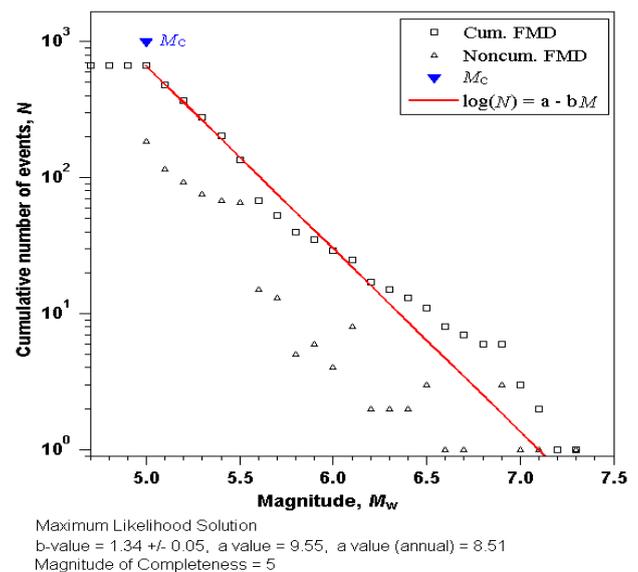
**Gambar 4.** Plot magnitudo momen  $M_w$  terhadap distribusi frekuensi-magnitudo (FMD), baik kumulatif  $N$  maupun non-kumulatif  $\log N$ , di mana estimasi  $M_c$  dan kedua parameter seismik ditentukan oleh Zmap 6.0 dengan metode *maximum likelihood* dan teknik penapisan Uhrhammer.

Metode ini menggunakan penapisan Uhrhammer (Panday *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) di mana data yang awalnya berjumlah 4598 berubah menjadi 2803. Berdasarkan grafik plot distribusi frekuensi-magnitudo pada gambar 4 diperoleh  $M_c$  bernilai  $M_w$  5,0 yang merupakan magnitudo terkecil gempa dengan magnitudo lebih besar dari  $M_c$  akan terdeteksi secara sempurna oleh instrumen ukur di lapangan (Diantari *et al.*, 2018). Dengan kata lain,  $M_c$  berfungsi sebagai batas bawah magnitudo di mana hukum Gutenberg-Richter masih valid. Garis lurus merah pada plot distribusi frekuensi magnitudo merupakan persamaan empiris dari hukum Gutenberg-Richter yaitu  $\log N(M) = 9.57 - 1.35M$  di mana estimasi  $b$ -value adalah 1,35 (dengan ketidakpastian ukur 0,05). Hasil estimasi parameter seismik  $b$ -value tersebut masuk dalam jangkauan statistik  $b$ -value antara 0,6 dan 1,5 (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Estimasi  $a$ -value dari Gambar 4 adalah 9,57 dengan *seismicity annual rate* sebesar 8,53 yang menggambarkan tingkat seismisitas yang relatif tinggi di wilayah Maluku. Terlihat dari persamaan tersebut

akan lebih akurat pada gempa dengan magnitudo lebih dari  $M_c$  yaitu antara 5,0 hingga 7,3 karena pada rentang magnitudo tersebut berlaku persamaan hukum Gutenberg-Richter yang konstan.

Penentuan nilai  $M_c$  ini mengikuti metodologi yang dibahas oleh beberapa penelitian terdahulu (Wiemer and Wyss, 2000; Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012) dengan menggunakan teknik *maximum curvature* (MAXC). Pada teknik ini,  $M_c$  adalah nilai magnitudo terendah dari *magnitude cutoff* ( $M_{co}$ ) yaitu jangkauan magnitudo di mana  $b$ -value bernilai konstan. Konsistensi dan reliabilitas hasil estimasi pada teknik ini relatif baik yaitu mencapai 90% sekaligus memberi konfirmasi estimasi  $M_c$  berdasarkan inspeksi visual pada kedua histogram yang merepresentasikan relasi distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 1 dan Gambar 3, meskipun teknik tersebut bukan satu-satunya teknik estimasi  $M_c$  secara akurat.

Gambar 5 berikut merupakan plot magnitudo momen  $M_w$  dibuat terhadap jumlah kumulatif kejadian  $N$  dan logaritma jumlah kejadian  $\log N$  di mana  $M_w \geq M_c$ .



**Gambar 5.** Plot magnitudo momen  $M_w$  terhadap FMD baik kumulatif  $N$  maupun non-kumulatif  $\log N$  (metode *maximum likelihood*) dengan teknik penapisan Uhrhammer, di mana data gempa dipilih  $M_w \geq M_c = 5,0$ .

Pada metode ini data gempa yang awalnya berjumlah 988 kejadian, namun setelah mengalami penapisan Uhrhammer (Panday *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020) menjadi 319 kejadian gempa. Hasil plot gempa dengan  $M_w \geq M_c$  di mana  $M_c$  sebesar 5,0 menunjukkan bahwa  $b$ -value adalah 1,34,  $a$ -value adalah 9,55 dan  $a$ -value (annual) adalah 8,51 di mana hasil tersebut tidak berbeda signifikan dengan hasil perhitungan seperti pada Gambar 4 (berbagai variasi magnitudo). Hal ini membuktikan bahwa teknik penapisan Uhrhammer lebih akurat dan cocok digunakan sebagai estimasi parameter seismik untuk analisis potensi bencana gempa dan mengetahui tingkat

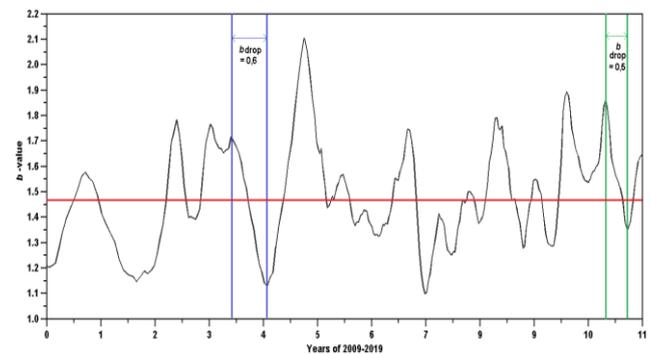
seismisitas di wilayah Maluku

Hasil estimasi parameter  $b$ -value yang diperoleh dari kedua metode hitung berbeda signifikan di mana pada metode *maximum likelihood* diperoleh  $b = 1,34$  sedangkan kuadrat terkecil diperoleh  $b = 1,16$  (berbeda sekitar 13%) di mana dari hasil tersebut  $b$ -value sensitif terhadap perbedaan kecil dari  $M_c$ . Oleh karena itu, akurasi magnitudo sangat penting dalam penentuan  $M_c$  yang akurat (Godano *et al.*, 2014) sebagai akurasi  $a$ -value dan  $b$ -value (Mignan and Woessner, 2012; Popandopoulos and Chatziioannou, 2014) untuk menganalisis potensi bahaya dan risiko yang ditimbulkan bencana gempa tektonik di suatu wilayah. Bahaya bencana gempa tektonik seringkali merugikan baik berupa korban jiwa maupun kerusakan lingkungan. Terjadinya gempa tektonik kapan saja dan tidak dapat dicegah, tetapi dampaknya dapat diminimalkan sekecil mungkin (Sianturi *et al.*, 2019).

Dengan mempertimbangkan bahwa wilayah Maluku memiliki kondisi geologi yang unik dan kompleks dengan tiga jenis batuan, yaitu batuan sedimen, batuan metamorf, dan batuan beku dengan persebaran merata di setiap gugus pulau yang dikendalikan oleh aktivitas seismik patahan lokal (Harris, 2011) sehingga banyak memicu gempa tektonik dengan skala magnitudo relatif kecil sampai menengah (Yusuf dan Santosa, 2016). Estimasi parameter seismik berdasarkan metode *maximum likelihood* diperoleh  $b$ -value sebesar 1,34 dan  $a$ -value sebesar 9,55 lebih dipercayai sebagai hasil hitung kedua parameter seismik dibanding metode kuadrat terkecil di mana hukum Gutenberg-Richter berlaku dengan akurasi yang tinggi. Dalam hal ini,  $b$ -value sebesar 1,34 (relatif tinggi) menunjukkan Maluku merupakan wilayah *creeping* yaitu memiliki tingkat tegangan tektonik (stres mekanik) relatif rendah yang tersimpan di batuan bawah permukaan dengan tingkat kerapuhan batuan yang tergolong tinggi (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014). Selain itu, wilayah Maluku memiliki frekuensi kejadian gempa tektonik yang relatif tinggi dengan representasi  $a = 9,55$  dan  $a$ -value (annual) = 8,51. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur batuan geologi di wilayah tersebut tidak membutuhkan banyak waktu untuk melepas energi seismik melalui mekanisme gempa tektonik. Dengan demikian, Maluku dikategorikan wilayah yang rentan terhadap bencana gempa tektonik.

Gambar 6 adalah grafik variasi temporal  $b$ -value selama kurun waktu 2009-2019 di mana perilaku  $b$ -value dan dinamika seismo-tektonik di Maluku dapat diketahui. Gambar 6 menunjukkan variasi temporal  $b$ -value di mana data gempa mengalami naik-turun dengan  $b$ -min  $\approx 1,1$  dan  $b$ -maks  $\approx 2,1$ . Ketidakstabilan data bisa dihubungkan dengan frekuensi pelepasan energi seismik yang relatif tinggi di wilayah Maluku dengan parameter  $a$ -value = 9,55 dan  $a$ -value (annual) = 8,51 yang menunjukkan tingkat keaktifan gempa yang relatif tinggi di mana wilayah Maluku

berpotensi terjadi gempa tektonik dengan magnitudo relatif kecil sampai sedang akibat adanya akumulasi stres mekanik rendah yang tersimpan di batuan bawah permukaan wilayah tersebut dalam jangka waktu yang singkat.



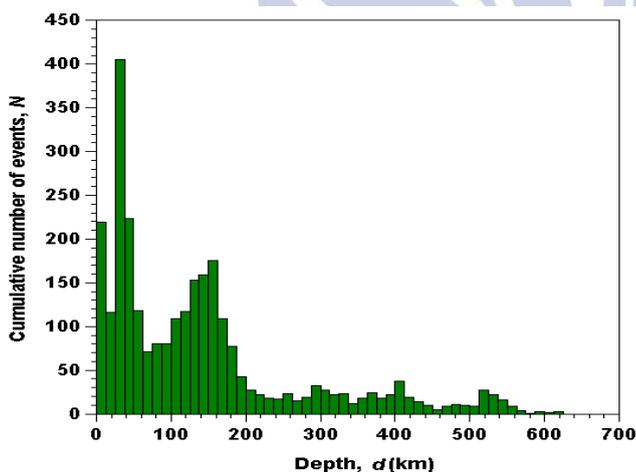
**Gambar 6.** Grafik variasi temporal  $b$ -value dari data gempa di wilayah Maluku selama tahun 2009-2019, di mana pada sumbu horisontal 0=Januari 2009, 1=Januari 2010, dan 11=Januari 2020. Garis merah horisontal adalah *the b-value averaged over time*,  $b \approx 1,47$ .

Hasil dari  $b$ -min  $\approx 1,1$  pada grafik  $b$ -value *with time* yang mendekati harga normal  $b \approx 1,0$  (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014; Amaro-Mellado and Bui, 2020) memberikan interpretasi bahwa seting tektonik wilayah Maluku didominasi oleh aktivitas sesar disepanjang zona patahan dan kondisi geologi yang unik dengan tiga jenis batuan (Harris, 2011) dipicu oleh pertemuan antara Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Laut Filipina, di mana bagian utara Pulau Seram adalah zona subduksi Lempeng Indo-Australia (Yusuf dan Santosa, 2016). Kerentanan ini juga diperparah oleh zona tumbukan Maluku, subduksi busur Banda, dan patahan Kolaka yang memicu potensi gempa di Maluku menjadi tinggi. Pada grafik diperoleh nilai *time-averaged b-value* sebesar  $b \approx 1,47$  (garis merah) di mana hasil tersebut hampir sama seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Informasi penting lain dari Gambar 6 yaitu  $b$ -value *drop* antara fase 3-4 (Mei 2012 menuju Januari 2013) dan fase 10 (Maret 2019 menuju Oktober 2019). Berdasarkan fase 3-4 (*offset*) merepresentasikan  $b$ -value *drop*  $\approx 0,6$  (dua garis biru) dengan magnitudo gempa relatif besar  $M_w$  7,1 (Desember 2012) dan fase 10 (*offset*) merepresentasikan  $b$ -value *drop*  $\approx 0,5$  (dua garis hijau) dengan magnitudo gempa relatif besar  $M_w$  7,3 (Juni 2019). Kedua  $b$ -value *drop* tersebut paling besar diantara semua fase tahunan dari 2009 hingga 2019 di mana energi potensial seismik yang tersimpan tidak lagi mampu ditahan dan dalam upaya mencari keseimbangan batuan yang baru energi tersebut dilepaskan melalui mekanisme gempa berkekuatan besar. Hal ini berarti variasi temporal  $b$ -value khususnya  $b$ -value *drop* dapat menjadi prekursor (tanda) gempa relatif besar akan terjadi (Prasad and Singh, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016) dan memberikan informasi mengenai peringatan dini gempa tektonik (Satriano *et al.*, 2011).

Gempa tektonik terdiri dari dua jenis yaitu *interplate earthquakes* yang terjadi di sepanjang zona subduksi dan *intraplate earthquakes* yang terjadi di sepanjang zona patahan. *Interplate earthquakes* merupakan pelepasan energi seismik yang dipicu oleh tumbukan antar lempeng dengan magnitudo  $M_w \geq 7,5$  pada kedalaman lebih dari 70 km bahkan bisa mencapai ratusan kilometer dari permukaan tanah (Velasco *et al.*, 2000; Pardo *et al.*, 2002; Hasegawa and Yoshida, 2015). *Intraplate earthquakes* merupakan pelepasan energi seismik yang dipicu oleh aktivitas sesar aktif dengan magnitudo sebesar  $M_w \leq 6,5$  pada kedalaman kurang dari 70 km yang disebut gempa dangkal (Lam and Wilson, 2004; Kolawole *et al.*, 2017). Menurut Allmann and Shearer (2009), mekanisme gempa *thrust-faulting* terjadi di sepanjang zona subduksi sedangkan mekanisme gempa *strike-slip* atau *normal-faulting* terjadi di sepanjang zona patahan.

Aplikasi Zmap 6.0 menyediakan fasilitas histogram sebaran kedalaman pusat gempa tektonik berguna untuk memastikan klasifikasi sumber gempa (gempa dangkal, gempa menengah, dan gempa dalam) yang sering terjadi di suatu wilayah. Gambar 7 berikut merupakan histogram distribusi kedalaman pusat gempa di wilayah Maluku.



**Gambar 7.** Diagram batang menunjukkan pola distribusi kedalaman sumber gempa tektonik (hiposenter) di wilayah Maluku antara tahun 2009-2019.

Berdasarkan Gambar 7 mengindikasikan bahwa hiposenter gempa tektonik di Maluku dominan berada pada kedalaman dangkal  $\leq 70$  km (Hammed, 2012) dengan frekuensi kejadian tertinggi adalah gempa berpusat pada 30 km di bawah permukaan. Berdasarkan Gambar 3 diperoleh informasi bahwa wilayah Maluku dominan terjadi *intraplate earthquakes* (Sabtaji, 2020) dengan frekuensi kejadian tertinggi pada magnitudo  $M_w = 4,86$ . Parameter  $b$ -value berturut-turut pada Gambar 4 dan Gambar 5 adalah 1,35 dan 1,34 (34% lebih tinggi dari 'harga normal'  $b$ -value) serta Gambar 6 diperoleh grafik temporal  $b$ -value dengan  $b$ -value *averaged over time* sebesar  $b \approx 1,47$ . Hasil tersebut mengindikasikan  $b$ -value di wilayah Maluku relatif tinggi

dengan akumulasi stres mekanik rendah yang tersimpan pada batuan bawah permukaan di sepanjang zona patahan sehingga menyebabkan wilayah tersebut sering terjadi gempa tektonik dengan skala magnitudo  $M_w \leq 6,5$  (kecil sampai menengah). Dalam konteks ini, relevan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa wilayah dengan  $b$ -value tinggi berkorelasi dengan frekuensi kejadian gempa yang relatif tinggi pula (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Selain itu, pada Gambar 7 di mana bagian ujung kiri histogram menggambarkan gempa dangkal pada kedalaman dekat permukaan yang relatif sering terjadi sedangkan ujung kanan menunjukkan gempa dengan pusat kedalaman lebih dari 300 km di bawah permukaan pernah terjadi dengan frekuensi kejadian relatif kecil.

## PENUTUP

### Simpulan

Penentuan parameter  $a$ -value dan  $b$ -value bertujuan untuk mengetahui tingkat seismisitas dan potensi bencana di wilayah Maluku melalui distribusi frekuensi-magnitudo hukum Gutenberg-Richter. Kedua parameter seismik tersebut menjelaskan mengenai tingkat keaktifan gempa dan tingkat tegangan tektonik (stres mekanik) batuan di bawah permukaan wilayah tersebut. Data gempa diperoleh dari katalog USGS selama periode 2009-2019. Dalam penelitian ini, metode *maximum likelihood* terbukti lebih akurat dan konsisten dalam menentukan kedua parameter seismik dibanding kuadrat terkecil, di mana diperoleh parameter  $b$ -value = 1,34 dan  $a$ -value = 9,55 serta  $a$ -value (annual) = 8,51 dengan  $M_w \geq M_c$  yang memberikan fakta bahwa tingkat seismisitas Maluku relatif tinggi. Dari paparan tersebut disimpulkan bahwa Maluku berpotensi rentan terhadap gempa tektonik dan tidak menutup kemungkinan terjadinya tsunami yang menyertai *intraplate earthquake* tersebut. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengurangan risiko dan bahaya terhadap dampak yang ditimbulkan, baik kerusakan lingkungan dan korban jiwa. Kesadaran dan kesiapsiagaan terhadap kerentanan akan terjadinya gempa tektonik di suatu wilayah adalah penting.

### Saran

Oleh karena pemetaan wilayah yang rentan gempa dengan menentukan parameter seismik  $a$ -value dan  $b$ -value adalah penting, maka variasi temporal  $b$ -value saja tidaklah cukup sebagai analisis potensi bahaya bencana seismik di wilayah tersebut. Dengan demikian, analisis variasi spasial  $b$ -value juga perlu dilakukan sehingga memberikan informasi seismik lebih detil dan akurat sebagai prekursor gempa untuk studi mitigasi dan peringatan dini gempa. Selain itu, proses pengolahan data sebaiknya disesuaikan dengan aplikasi yang digunakan agar dapat dijalankan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak atas ketersediaan data sekunder pada penelitian ini. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada *reviewers* atau dosen penguji yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Allmann, B. P. and Shearer, P. M. 2009. Global Variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 144, No. B01310, pp. 1-22.
- Amaro-Mellado, J. L. and Bui, D. T. 2020. GIS-based mapping of seismic parameters for the Pyrenees. *International Journal of Geo-Information*, Vol. 452, No. 9, pp. 1-21.
- Bock, Y., Prawirodirjo, L., Genrich, J.F., Stevens, C.W., Mc Caffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S.S.O. and Callais, E. 2003. Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 108.
- Castellaro, S., Mulargia, F. and Kagan, Y. Y. 2006. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, Vol. 165, Issue 3, pp. 913-930.
- 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.
- Gangopadhyay, A. and Talwani, P. 2003. Symptomatic features of intraplate earthquake. *Seismological Research Letters*, Vol. 74, No. 6, pp. 863-883.
- Godano, C., Lippiello, E. and de Arcangelis, L. 2014. Variability of the  $b$ -value in the Gutenberg-Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, Issue 3, pp. 1765-1771.
- Hammed, O. S., Popoola, O. I., Adetoyinbo, A. A., Awoyemi, M. O., Badmus, G. O. and Ohwo, O. B. 2013. Focal depth, magnitude, and frequency distribution of earthquake along oceanic trenches. *Earthquake Science*, Vol. 26, pp. 75-82.
- 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.
- Harris, S. 2011. The nature of the Banda-Arc Continent Collision in the Timor Region. *Earth Science*, pp. 163-211.
- Hasegawa, A. and Yoshida, K. 2015. Preceding seismic activity and slow slip event in the source area of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Okii earthquake: a review. *Geoscience Letters*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-13.
- Hidayat, R. F., Kiyota, T., Tada, N., Hayakawa, J. and Nawir, H. 2020. Reconnaissance on Liquefaction-induced Flow Failure Caused by the 2018 Mw 7.5 Sulawesi Earthquake, Plau, Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol. 52, No. 1, pp. 51-65.
- 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.
- 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.
- Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H. and Vidale, J. E. 2005. Extent, duration and speed of the 2004 Sumatera-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array. *Nature*, Vol. 435, pp. 933-936.
- Jamelot, A., Gailler, A., Heinrich, P. H., Vallage, A. and Champenois, J. 2019. Tsunami Simulations of the Sulawesi Mw 7.5 Event: Comparison of Seismic Sources Issued from a Tsunami Warning Context Versus Post-Event Finite Source. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, pp. 3351-3376.
- Kanamori, H. 1983. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, Vol. 93, pp. 185-199.
- Kolawole, F., Atekwana, E. A., Malloy, S., Stamps, D., Gradin, M. G., Leseane, K. and Shemang, E. M. 2017. Aeoromagnetic, gravity, and Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar analyses reveal the causative fault of the 3 April 2017 Mw 6.5 Moiyabana, Botswana, earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 17, pp. 8837-8846.
- Kusky, T. 2008. *Earthquakes: Plate Tectonics and Earthquake Hazards*. pp. 1-169. New York: Fact on File, Inc.
- Lam, N. and Wilson, J. 2004. Displacement modeling of intraplate earthquakes. *Journal of Earthquake Technology*, Vol. 41, No. 1, pp. 15-52.
- Marzocchi, W. and Sandri, L. 2003. A review and new insights on the estimation of the  $b$ -value and its uncertainty. *Annals of Geophysics*, Vol. 46, No. 6, pp. 1271-1282.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Heuret, A. and Funicello, F. 2016. Where giant earthquakes may come. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, No. 10, pp. 7322-7336.
- 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. Available at <http://www.corssa.org>.
- 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. Available at <http://www.corssa.org>.
- Nuannin, P., Kulhánek, 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, Issue 11, L11307.
- Pandey, A. K., Chingtham, P. and Roy, P. N. S. 2017. Homogeneous earthquake for Notheast region of India using robust statistical approaches *Geomatics, Nature Hazard and Risk*, Vol. 8, No. 2, pp. 1477-1491.
- Pardo, M., Comte, D. and Monfret, T. 2002. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Science*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-22.
- Pollitz, F. F. Burgmann, R. and Banerjee, P. 2006. Post-seismic relaxation following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake on a compressible self-gravitating Earth. *Geophysical Journal International*, Vol. 167, pp. 397-420.
- Popandopoulos, G. A. and Chatziioannou, E. 2014. Gutenberg-Richter law parameters analysis using the hellenic unified seismic network data through fast-bee technique. *Earth Science*, Vol. 3, No. 5, pp. 122-131.
- 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.
- Sabtaji, A. 2020. Statistik kejadian gempa bumi tektonik tiap provinsi di wilayah Indonesia selama 11 tahun pengamatan (2009-2019). *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, Vol. 1, No. 7, pp. 31-46.
- Satriano, C., Wu, Y. M., Zollo, A. and Kanamori, H. 2011. Earthquake early warning: concepts, methods, and physical grounds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, Issue 2, pp. 106-118.
- Scordilis, E. M. 2006. Empirical global relation converting  $M_S$  and  $m_b$  to moment magnitude. *Journal of Seismology*, Vol. 10, pp. 225-236.
- Sianturi, H. L., Susilo, A., Sunaryo. and Maryanto, S. 2019. Correllation Analysis of Spatial Distrbution, Temporal Seismotectonics, and Return Period of Earthquake in East Nusa Tenggara, Indonesia. *International Journal of Geophysics*, pp. 1-12.
- 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. Available at <http://www.corssa.org>.
- Vavrycuk, V. 2015. Earthquake mechanisms and stress field. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, pp. 1-21.
- Velasco, A. A., Ammon, C. J. and Beck, S. L. 2000. Broadband source modeling of the November 8, 1997, Tibet ( $M_w = 7.5$ ) earthquake and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B12, pp. 28065-28080.
- Wiemer, S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol. 72, No. 3, pp. 374-383.
- Wiemer, S. and Wyss, M. 2000. Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from alaska, the western united states, and japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 4. pp. 859-869.
- 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.
- Yusuf, R. B. dan Santosa, B. J. 2016. Persebaran hiposenter Maluku Selatan menggunakan metode double difference. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, Vol. 5, No. 2, pp. 2337-3520.