

## ESTIMASI PARAMETER $a$ -VALUE DAN $b$ -VALUE UNTUK ANALISIS STUDI SEISMISITAS DAN POTENSI BAHAYA BENCANA GEMPA TEKTONIK DI WILAYAH MALUKU UTARA

Hilda Risanti, Tjipto Prastowo

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

Email: [hilda.17030224012@mhs.unesa.ac.id](mailto:hilda.17030224012@mhs.unesa.ac.id)

### Abstrak

Studi seismisitas dan analisis potensi bahaya bencana seismik di wilayah Maluku Utara dapat dilakukan dengan menentukan parameter  $a$ -value dan  $b$ -value di wilayah tersebut. Kedua parameter mendeskripsikan level seismisitas dan akumulasi stres mekanik yang disimpan oleh batuan geologi bawah permukaan di wilayah tersebut. Secara prinsip, parameter  $a$ -value dan  $b$ -value ditentukan dari distribusi frekuensi-magnitudo gempa melalui hukum Gutenberg-Richter. Dalam penelitian ini, hukum Gutenberg-Richter diterapkan pada sumber gempa tektonik dari katalog gempa USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>) selama 2009-2019 dengan kedalaman mencapai 551 km dan variasi magnitudo  $4,2 \leq M_w \leq 7,2$ . Kedua parameter dihitung dengan metode *least-squares* dan *maximum likelihood*, di mana perbedaan signifikan  $a$ -value dan  $b$ -value menurut kedua metode tersebut merefleksikan level akurasi kedua metode tersebut. Metode *maximum likelihood* memberikan  $a$ -value dan  $b$ -value yang lebih akurat karena melibatkan penapisan data sebelum proses pengolahan data. Persamaan empiris Gutenberg-Richter yang diperoleh dari metode *maximum likelihood* adalah  $\log N = 9,73 - 1,39M$ , di mana  $a = 9,73$  dan  $b = 1,39$  dengan  $N$  adalah jumlah kejadian gempa dan  $M$  adalah gempa dengan magnitudo lebih besar dari  $M_c$  (batas bawah magnitudo di mana hukum Gutenberg-Richter berlaku valid). Analisis variasi spasial dan temporal  $b$ -value serta variasi spasial  $a$ -value berhasil merekonstruksi 3 kejadian gempa relatif besar antara 2009-2019. Kombinasi temuan  $b$ -value  $\approx 1,4$ ,  $a$ -value  $\approx 9,7$  dan  $a$ -value (annual)  $\approx 8,7$  dengan bantuan ZMAP6,0 menunjukkan bahwa seluruh wilayah Maluku Utara merupakan wilayah yang rentan terhadap bencana gempa dengan frekuensi gempa tinggi yang dipicu seismisitas relatif tinggi di wilayah tersebut. Temuan ini memicu peningkatan kesadaran dan kesiagaan terhadap potensi bahaya bencana gempa tektonik di Maluku Utara.

**Kata Kunci:** seismisitas, bencana seismik,  $a$ -value,  $b$ -value, hukum Gutenberg-Richter

### Abstract

Seismic studies and corresponding seismic hazard analysis in North Maluku can be performed using determination of  $a$ -value and  $b$ -value parameters. These parameters describe seismicity level and mechanical stress accumulated in subsurface structure in the region of interest. In principle,  $a$ -value and  $b$ -value were obtained from frequency-magnitude distribution provided by Gutenberg-Richter law. In this study, this law was generated using earthquake datasets from USGS at <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>, where events occurred between 2009-2019 with varying magnitudes  $4.2 \leq M_w \leq 7.2$  and depths to 551 km. The methods included the least-squares and maximum likelihood, where significant differences in the parameters acquired reflect levels of accuracy. The maximum likelihood method yielded accurate results for  $a$ -value and  $b$ -value due to data declustering prior to data processing. The Gutenberg-Richter law in a log-linear expression  $\log N = 9.73 - 1.39M$  was obtained, where  $a = 9.73$  and  $b = 1.39$  with  $N$  is the cumulative number of occurrence and  $M$  denotes events with magnitudes greater than  $M_c$  (defined as the magnitude at which the lower end of the distribution starts to deviate from the Gutenberg-Richter law). Analysis of spatial and temporal variations of  $b$ -value and spatial variation of  $a$ -value successfully reconstructed 3 occurrences of large magnitudes during 2009-2019. A combined finding of  $b$ -value  $\approx 1.4$ ,  $a$ -value  $\approx 9.7$  dan  $a$ -value (annual)  $\approx 8.7$  by ZMAP6.0 found for North Maluku reveals that the whole parts of the region are vulnerable to tectonic earthquakes with high frequency owing to relatively high seismicity. This calls for increased awareness of and preparedness for possible seismic threats in North Maluku.

**Keywords:** seismicity, seismic hazard,  $a$ -value,  $b$ -value, Gutenberg-Richter law

### PENDAHULUAN

Indonesia berada di kawasan tektonik aktif di dunia sehingga sering mengalami gempa tektonik dibandingkan dengan negara lain (Nguyen *et al.*, 2015; Cummins, 2017). Kondisi tersebut memicu kerentanan wilayah terhadap potensi bahaya bencana seismik (Irsyam dkk., 2017) yang bisa terjadi kapanpun tanpa bisa dicegah. Oleh karena itu, studi seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik yang memetakan kerentanan wilayah nusantara terhadap bencana gempa tektonik adalah penting. Dalam konteks ini, propinsi yang seringkali mengalami bencana gempa tektonik adalah

Maluku Utara, di mana 7.203 kejadian tercatat selama tahun 2009-2019 (Sabtaji, 2020). Seismisitas yang tinggi tersebut dipicu oleh aktivitas seismo-tektonik Lempeng Filipina, Eurasia, dan Australia yang memengaruhi kondisi tektonik Maluku Utara dan sekitarnya (Widiwijayanti *et al.*, 2003).

Informasi kegempaan suatu wilayah sebagai bagian dari upaya pengurangan risiko bencana di wilayah tersebut membutuhkan konsep dan metode penanganan yang tepat (Satriano *et al.*, 2011). Sebagai contoh, studi komprehensif Suppasri *et al.* (2015) melaporkan 3 gempa tektonik besar di zona subduksi (*interplate earthquakes*) lepas pantai barat

Sumatra yang memicu tsunami dengan dampak global. Gempa akibat aktivitas sesar lokal (*intraplate earthquake*) juga bisa memicu tsunami lokal yang mematikan, misalnya gempa yang memicu tsunami Palu 28 September 2018 (Carvajal *et al.*, 2019; Gusman *et al.*, 2019).

Dengan analisis seismisitas wilayah Maluku Utara dan bahaya bencana tsunami yang mungkin saja menyertai kejadian gempa tektonik baik *interplate* maupun *intraplate*, maka penelitian ini menganalisis potensi bahaya bencana gempa tektonik di wilayah tersebut. Studi seismisitas dan analisis potensi bahaya bencana seismik biasa dilakukan melalui penentuan parameter seismik *a*-value dan *b*-value (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Penelitian lokal terdahulu (Widiwijayanti *et al.*, 2003) di Maluku Utara memanfaatkan kombinasi data gravitasi yang diperoleh dari permukaan laut dan satelit untuk mempelajari evolusi struktur geologi batuan bawah Laut Maluku yang ikut membentuk kondisi tektonik wilayah Maluku Utara. Sedangkan penelitian terkini (Sabtaji, 2020) melaporkan data statistik gempa di seluruh wilayah Indonesia termasuk Maluku Utara tanpa melakukan analisis yang mendalam tentang distribusi frekuensi-magnitudo gempa tektonik melalui hukum Gutenberg-Richter yang merupakan dasar untuk menentukan parameter *a*-value dan *b*-value.

Formulasi untuk penentuan kedua parameter (*a*-value dan *b*-value) adalah hukum distribusi frekuensi-magnitudo Gutenberg-Richter yang diterapkan dalam berbagai kondisi tektonik dan sumber seismisitas (baik alami atau buatan). Studi kegempaan terdahulu dengan seting di luar wilayah Indonesia (Godano *et al.*, 2014; Marzocchi *et al.*, 2016; Hong *et al.*, 2020) dan di Indonesia (Diantari *et al.*, 2018) membahas variasi teknik penentuan *a*-value dan *b*-value.

Dalam konteks studi mitigasi, pengetahuan tentang *a*-value dan *b*-value berguna untuk memetakan kerentanan wilayah sekaligus menjadi basis untuk menentukan langkah antisipasi yang diperlukan untuk mengurangi risiko bencana. Oleh karena itu, estimasi *a*-value dan *b*-value secara akurat adalah penting. Estimasi kedua parameter itu bisa dilakukan dengan metode *least-squares* (Draper and Smith, 1998) atau *maximum likelihood* (Marzocchi and Sandri, 2003; Han *et al.*, 2015). Untuk kelengkapan metode estimasi, maka kedua metode tersebut dalam penelitian ini digunakan untuk menentukan *a*-value dan *b*-value sekaligus untuk menganalisis potensi bahaya bencana gempa tektonik di wilayah Maluku Utara.

### Hukum Gutenberg-Richter

Level seismisitas suatu wilayah dipelajari melalui distribusi frekuensi-magnitudo gempa. Secara matematis, dirangkum oleh hukum Gutenberg-Richter 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 dipelajari

selama kurun waktu tertentu. Dalam hal ini,  $M_c$  adalah *magnitude of completeness*, yaitu magnitudo terkecil yang bisa dideteksi dengan baik oleh instrumen ukur di lapangan sebagai fungsi ruang dan waktu (Diantari *et al.*, 2018).

Secara matematis, hukum Gutenberg-Richter dalam bentuk (1) merupakan persamaan garis lurus antara  $\log N$  sebagai variabel respons pada sumbu vertikal dan  $M$  sebagai variabel manipulasi pada sumbu horisontal. Dalam hal ini, parameter *a*-value merupakan titik potong dari garis lurus terhadap sumbu vertikal sedangkan *b*-value adalah gradien garis lurus distribusi statistik frekuensi-magnitudo gempa (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014).

Kedua parameter tersebut di atas adalah penting karena *a*-value menunjukkan level seismisitas dan *b*-value menunjukkan level stres mekanik yang dialami oleh batuan bawah permukaan. Oleh karena itu, penentuan kedua parameter tersebut banyak menjadi topik penelitian kegempaan dan kerentanan suatu wilayah terhadap bencana seismik dengan variasi metode hitung *a*-value dan *b*-value (Marzocchi and Sandri, 2003; Godano *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2015). Pengetahuan tentang kedua parameter tersebut bisa digunakan untuk prediksi lokasi dan waktu yang paling mungkin suatu gempa besar akan terjadi (Marzocchi *et al.*, 2016). Dua metode hitung yang umum digunakan untuk estimasi parameter *a*-value dan *b*-value adalah metode *least-squares* dan *maximum likelihood* yang akan dijelaskan secara rinci sesudah ini. Pilihan kedua metode hitung ini karena secara teknis relatif mudah dengan hasil akhir yang cukup akurat.

## METODE

### Metode *Least-Squares*

Metode *least-squares* digunakan untuk mencari relasi linier antara dua variabel (Draper and Smith, 1998), di mana kedua variabel tersebut adalah variabel manipulasi dan variabel respons penelitian. Secara prinsip, linieritas antara dua variabel ditunjukkan melalui persamaan berikut,

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

di mana  $X$  dan  $Y$  berturut-turut adalah variabel manipulasi dan variabel respons, sedangkan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta. Solusi untuk menentukan konstanta  $a$  dan  $b$  bisa dituliskan dalam bentuk persamaan (3) dan (4) berikut,

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

$$a = \frac{n \sum y_i - b \sum x_i}{n} \quad (4)$$

di mana  $n$  merupakan jumlah data untuk penelitian dengan data tunggal dan untuk penelitian dengan data kelompok, maka  $n$  merupakan jumlah kelas.

### Metode *Maximum Likelihood*

Dalam penelitian ini, metode *maximum likelihood* digunakan untuk estimasi parameter *a*-value dan *b*-value berdasarkan probabilitas maksimal yang mungkin dicapai (Marzocchi and Sandri, 2003). Sebelum kedua parameter ini

ditentukan, plot distribusi frekuensi-magnitudo perlu dibuat dahulu (Naylor *et al.*, 2010; Mignan and Woessner, 2012). Parameter *b*-value 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 untuk  $M \geq M_c$  dan  $\Delta M = 0,1$  adalah *binning interval* skala magnitudo. Parameter *a*-value ditentukan dari persamaan berikut,

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

Persamaan (6) di atas jelas menunjukkan bahwa akurasi penentuan  $M_c$  dan perhitungan *b*-value menentukan akurasi *a*-value yang diperoleh (Mignan and Woessner, 2012).

### Magnitude of Completeness

Sebagaimana ditunjukkan oleh (1), secara prinsip  $M_c$  merupakan nilai magnitudo gempa paling kecil di mana hukum linier-logaritmik Gutenberg-Richter masih berlaku. Relasi linier-logaritmik tersebut dibangun dari distribusi frekuensi-magnitudo gempa dengan membuat kelas statistik magnitudo gempa (Naylor *et al.*, 2010). Secara teoritik,  $M_c$  tidak bernilai tunggal karena memiliki nilai yang berbeda untuk variasi teknik hitung yang berbeda (Mignan and Woessner, 2012). Namun demikian level akurasi  $M_c$  ikut menentukan validitas relasi linier-logaritmik pada (1) (Nanjo *et al.*, 2010; van Stiphout *et al.*, 2012; Diantari *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Penelitian terdahulu tentang estimasi  $M_c$  pada skala magnitudo kecil (Cao and Gao, 2002; Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012) biasanya tidak mempertimbangkan data dengan magnitudo kurang dari  $M_c$  karena diasumsikan tidak ikut menentukan karakteristik geologi bawah permukaan suatu wilayah. Validitas hukum Gutenberg-Richter pada (1) berlaku antara  $M_c$  dan nilai magnitudo maksimum tertentu yang ditentukan oleh fluktuasi statistik data gempa dan keterbatasan data gempa untuk skala magnitudo yang besar (Naylor *et al.*, 2010).

### Data dan Variabel Operasional Penelitian

Data penelitian meliputi data sekunder gempa yang diperoleh dari katalog *United States Geological Survey* (USGS) di laman <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> berjumlah 4006 kejadian gempa antara tahun 2009-2019 dengan magnitudo  $4,2 \leq M_w \leq 7,2$  dan variasi kedalaman mencapai 551 km di bawah permukaan. Data sejumlah itu masih merupakan *raw data* karena belum diseleksi melalui 'proses penapisan' (Amaro-Mellado and Bui, 2020) dengan tujuan untuk meningkatkan akurasi perhitungan *a*-value dan *b*-value di wilayah Maluku Utara. Penapisan dilakukan dengan menghapus data *foreshocks* dan *aftershocks*.

Dalam penelitian ini, variabel manipulasi adalah magnitudo momen  $M_w$  (sumbu horisontal) sedangkan variabel respons adalah distribusi frekuensi kejadian  $N$  atau nilai logaritmik  $\log N$  (sumbu vertikal). Variabel kontrol adalah metode *least-squares* dan *maximum likelihood* yang digunakan untuk estimasi *a*-value dan *b*-value melalui

penerapan hukum Gutenberg-Richter di Maluku Utara. Dalam hal ini, metode *least-squares* tidak menerapkan penapisan data. Alih-alih, metode ini bisa menyelesaikan masalah penentuan *a*-value dan *b*-value secara langsung melalui inspeksi visual pada garis lurus regresi linier yang merepresentasikan kumpulan data gempa.

Metode *maximum likelihood* relatif lebih kompleks dan membutuhkan bantuan aplikasi *Excel*, *Matlab R2010a*, dan *ZMAP6.0*. Dengan bantuan *spreadsheet*, 4006 kejadian gempa disusun dalam kolom bujur, lintang, tahun, bulan, tanggal, kekuatan gempa ( $M_w$ ), kedalaman gempa (km), jam, dan menit yang disimpan dalam format *.csv*. Data format *.csv* kemudian diubah menjadi format *.dat* melalui *notepad* yang kemudian menjadi masukan bagi *ZMAP6.0* (Wiemer, 2001) yang dijalankan dengan menggunakan *Matlab R2010a*.

Data gempa dalam metode ini mengalami penapisan *Uhrhammer* sehingga menjadi 2601 kejadian. Secara teknis, penapisan mengikuti metodologi van Stiphout *et al.* (2012), yaitu mengambil gempa utama (*mainshocks*) saja sebagai data penelitian. Data gempa utama tersebut diolah untuk mendapatkan distribusi statistik frekuensi-magnitudo,  $M_c$ , *b*-value dan *a*-value, variasi temporal *b*-value, dan distribusi kedalaman gempa di wilayah Maluku Utara. Penentuan nilai  $M_c$  dilakukan dengan teknik *maximum curvature* (MAXC) yang dibahas secara khusus dalam Wiemer and Wyss (2000) dan secara ringkas dalam Mignan and Woessner (2012).

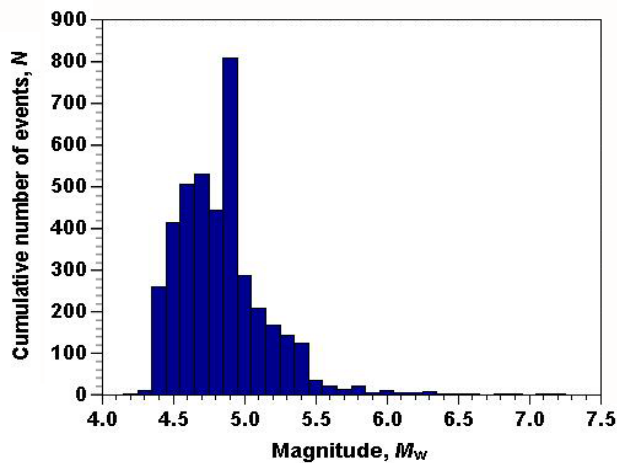
Komparasi parameter *a*-value dan *b*-value yang diperoleh dengan menggunakan metode *least-squares* dan *maximum likelihood* dilakukan untuk melihat seberapa dekat estimasi parameter seismik menurut kedua metode. Analisis kelebihan dan kekurangan kedua metode dilakukan melalui estimasi ketidakpastian hasil hitung kedua parameter. Semua informasi seismik yang diperoleh dari kedua metode, khususnya metode *maximum likelihood* ini dianalisis secara komprehensif untuk menentukan karakteristik geologi dan potensi bahaya bencana gempa tektonik di Maluku Utara.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemaparan hasil dan pembahasan estimasi parameter *a*-value dan *b*-value dibedakan berdasarkan metode yang digunakan, yaitu *least-squares* dan *maximum likelihood*. Analisis hasil estimasi kedua parameter dilakukan secara menyeluruh untuk menentukan level seismisitas dan potensi bahaya bencana gempa tektonik di Maluku Utara.

#### Parameter *a* dan *b* (Metode *Least-Squares*)

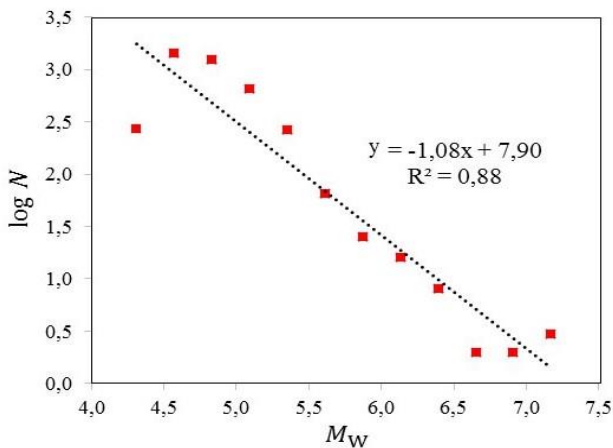
Penapisan data gempa tidak dilakukan dalam metode *least-squares* sehingga 4006 data gempa dibiarkan utuh untuk diolah dengan aplikasi *ZMAP6.0* (Wiemer, 2001). Gempa dengan magnitudo  $4,2 \leq M_w \leq 7,2$  dibagi menjadi beberapa kelas statistik dengan lebar masing-masing 0,10 untuk mendapatkan *optimum solution* seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plot  $M_w$  vs  $N$  dengan metode *least-squares*.

Interval kelas magnitudo antara  $4,85 \leq M_w \leq 4,94$  memberikan frekuensi tertinggi sejumlah 807 kejadian. Ilustrasi data gempa (Gambar 1) dengan magnitudo sesudah kelas dengan frekuensi tertinggi tersebut menunjukkan bahwa statistik gempa mengikuti penurunan eksponensial hukum Gutenberg-Richter, sesuai dengan prediksi relasi linier-logaritmik frekuensi-magnitudo (Naylor *et al.*, 2010; Singh, 2016; Hong *et al.*, 2020). Berdasarkan distribusi frekuensi-magnitudo (Gambar 1) inilah hukum Gutenberg-Richter dibangkitkan. Informasi seismik penting lain yang digali dari diagram batang pada Gambar 1 adalah estimasi  $M_c = 4,90$  (median dari kelas dengan frekuensi tertinggi).

Plot magnitudo momen gempa  $M_w$  terhadap nilai logaritma frekuensi jumlah kejadian  $\log N$  dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Plot  $M_w$  vs  $\log N$  dengan metode *least-squares*.

Gambar 2 menggambarkan linieritas  $M_w$  terhadap  $\log N$  dengan koefisien korelasi sebesar 0,88 yang tergolong relatif baik karena menunjukkan korelasi yang relatif kuat. Untuk distribusi gempa dengan magnitudo  $< 5,0$  (relatif kecil) dan  $> 6,8$  (skala menengah) terlihat menyimpang dari garis regresi yang mendiskripsikan relasi linier-logaritmik. Analisis distribusi frekuensi-magnitudo dengan metode ini memberikan hukum Gutenberg-Richter dalam bentuk  $\log N = 7,90 - 1,08M$ , di mana parameter  $a$ -value = 7,90

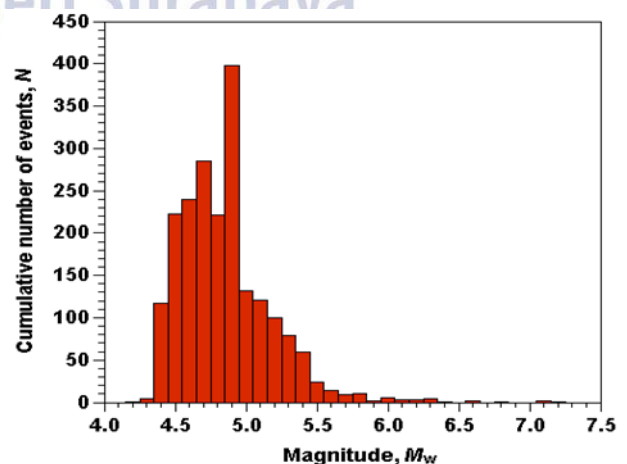
dan  $b$ -value = 1,08 (setelah membandingkan persamaan regresi pada Gambar 1 dan hukum Gutenberg-Richter).

Fakta bahwa  $b$ -value ditemukan sebesar 1,08 sesuai dengan ‘harga normal’ yaitu  $b \approx 1,0$  (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014; Nava *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020) adalah cukup baik namun tetap menyimpan keraguan berasal dari ketidakpastian hasil ukur. Perlu diingat bahwa penentuan  $a$ -value dan  $b$ -value dengan *least-squares* memanfaatkan *foreshocks*, *mainshocks*, dan *aftershocks*. Hal ini berakibat ‘kemurnian data’ relatif rendah yang akan terekam sebagai level akurasi  $b$ -value yang relatif rendah. Apabila  $b$ -value tidak cukup akurat, maka  $a$ -value juga ikut tidak cukup akurat (Mignan and Woessner, 2012; Amaro-Mellado *et al.*, 2017).

Untuk satu kejadian gempa di suatu wilayah, maka karakteristik gempa akan lebih baik jika dianalisis dengan memanfaatkan data gempa utama (*mainshock*) saja. Hal ini karena pelepasan energi seismik dominan terjadi saat gempa utama (Kusky, 2008; Balocchi, 2017; Yingnan *et al.*, 2019), di mana durasi kejadian lebih singkat sehingga akurasi hasil hitung energi gempa relatif tinggi. Selain itu, metode *least-squares* dilakukan dengan membuat ‘kelas’ dan mungkin terjadi 1-2 kelas statistik data ternyata kosong. Situasi ini memberikan dampak berupa efek ‘*statistical outlier*’ yang berakibat perhitungan statistik berbasis kelas kosong tersebut menyimpang dari nilai benar yang diharapkan. Argumen lain (Castellaro *et al.*, 2006; Thingbaijam *et al.*, 2017) menunjukkan kelemahan dalam metode *least-squares* untuk estimasi parameter seismik yang membutuhkan *error measurements* untuk semua variabel.

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

Penapisan data gempa dilakukan dengan mengikuti metodologi terdahulu (van Stiphout *et al.*, 2012; Gentili *et al.*, 2017; Peresan and Gentili, 2020), di mana 4006 data awal gempa (*mixed events*) disaring menjadi 2061 data gempa utama. Data gempa utama kemudian diolah dengan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) menjadi kelas-kelas magnitudo dengan lebar setiap kelas adalah 0,10 untuk mendapatkan *optimum solution* seperti terlihat pada Gambar 3.

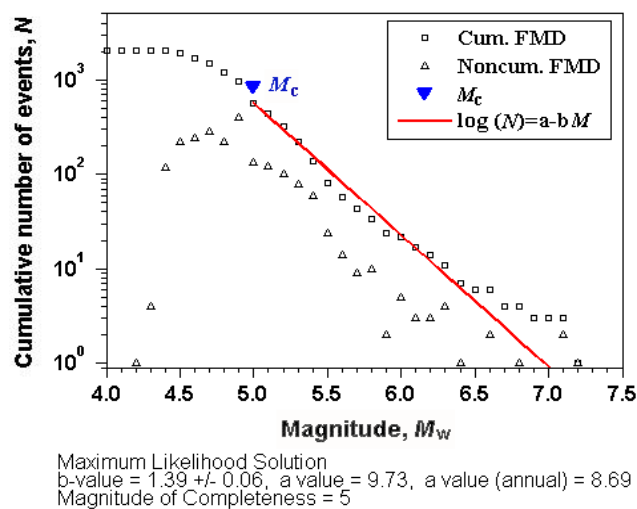


Gambar 3. Plot  $M_w$  vs  $N$  dari metode *maximum likelihood*.

Interval kelas magnitudo antara  $4,85 \leq M_w \leq 4,94$  memberikan frekuensi tertinggi sejumlah 400 kejadian. Seperti Gambar 1, distribusi magnitudo gempa sesudah kelas frekuensi tertinggi pada Gambar 3 juga menunjukkan bahwa statistik gempa mengikuti penurunan eksponensial hukum linier-log Gutenberg-Richter (Naylor *et al.*, 2010; Singh, 2016; Hong *et al.*, 2020). Berdasarkan distribusi frekuensi-magnitudo (Gambar 3) inilah hukum Gutenberg-Richter dibangkitkan. Informasi seismik penting lain yang digali dari diagram batang pada Gambar 3 adalah estimasi  $M_c = 4,95$  (berbeda sedikit dari nilai  $M_c$  yang ditentukan metode *least-squares*). Namun, nilai  $M_c$  tersebut akan dikoreksi dengan perhitungan yang diberikan ZMAP6.0.

Plot distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 1 dan Gambar 3 secara kualitatif memberikan indikasi bahwa statistik gempa di wilayah Maluku Utara yang menjadi data penelitian mengalami fase eksponensial turun sesudah nilai magnitudo dengan frekuensi tertinggi. Hal ini membuktikan kehadiran hukum Gutenberg-Richter sebagai pengatur distribusi gempa di wilayah tersebut, di mana magnitudo dengan frekuensi tertinggi sebagai  $M_c$ . Kedua metode mengevaluasi  $M_c$  hampir sama, yaitu 4,90 (*least-squares*) dan 4,95 (*maximum likelihood*). Namun, kemiripan  $M_c$  menurut kedua metode estimasi tidak berarti bahwa  $b$ -value yang dihitung dengan kedua metode juga pasti hampir sama. Hal ini karena rumusan  $b$ -value pada persamaan (5) menurut metode *maximum likelihood* dipengaruhi oleh  $\bar{M}$  dan  $\Delta M$  yang ditentukan oleh jumlah data.

Untuk memastikan ‘nilai benar’ dari  $M_c$  dan  $b$ -value sekaligus  $a$ -value, maka plot distribusi frekuensi-magnitudo dibuat dengan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001). Berbeda dengan plot pada Gambar 2, plot magnitudo momen  $M_w$  dibuat terhadap jumlah kumulatif kejadian  $N$  dan logaritma jumlah kejadian  $\log N$  sekaligus (Gambar 4).

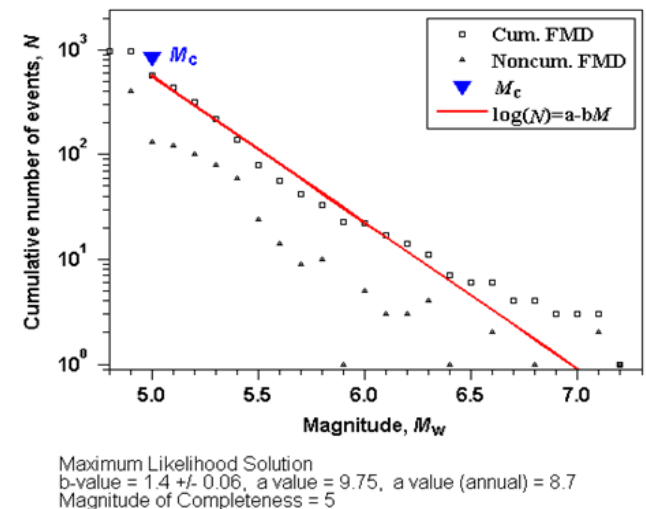


**Gambar 4.** Plot magnitudo momen  $M_w$  terhadap statistik distribusi frekuensi-magnitudo (FMD), baik non-kumulatif  $\log N$  maupun kumulatif  $N$ , di mana  $M_c$  dan kedua parameter seismik ditentukan dengan metode *maximum likelihood* dan teknik penapisan Uhrhammer.

Gambar 4 menunjukkan  $M_c$  yang bernilai  $M_w$  5,0. Penentuan  $M_c$  ini dilakukan dengan menggunakan teknik MAXC yang dibahas dalam Mignan and Woessner (2012). Teknik ini memilih  $M_c$  merupakan nilai magnitudo terendah dari *magnitude cutoff*, yaitu jangkauan magnitudo di mana  $b$ -value berharga konstan. Meskipun bukan merupakan satu-satunya teknik estimasi  $M_c$ , namun reliabilitas hasil estimasi teknik ini mencapai 90% yang memberi konfirmasi estimasi  $M_c$  berbasis *visual inspection* pada kedua diagram batang yang mendiskripsikan relasi distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 1 dan Gambar 3.

Menurut Gambar 4, estimasi  $b$ -value adalah 1,39 (dengan ketidakpastian ukur 0,06). Estimasi  $b$ -value tersebut masuk dalam jangkauan statistik  $b$ -value antara 0,6 dan 1,5 (Amaro-Mellado and Bui, 2020) dan tidak terlalu beda jauh dari taksiran 30% lebih tinggi dari harga normal  $b$ -value (Godano *et al.*, 2014). Estimasi  $a$ -value dari Gambar 4 adalah 9,73 dengan *annual rate of seismicity* sebesar 8,69, menunjukkan level seismisitas yang relatif tinggi di wilayah Maluku Utara. Estimasi parameter  $b$ -value dan  $a$ -value dengan *maximum likelihood* memberikan relasi statistik linier-logaritmik dalam bentuk hukum Gutenberg-Richter, yaitu  $\log N = 9,73 - 1,39M$  yang ditunjukkan sebagai garis lurus merah pada Gambar 4.

Aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001) menyediakan fasilitas untuk menguji konsistensi ‘nilai benar’  $b$ -value dan  $a$ -value termasuk *seismicity annual rate*,  $a$ -value (annual), dengan mengubah jumlah data gempa dari 2061 kejadian menjadi 967 kejadian, di mana semua magnitudo  $\geq M_c$ . Meskipun langkah ini sederhana namun bisa memberikan keyakinan bahwa teknik penapisan data Uhrhammer adalah reliabel dan cocok digunakan untuk penapisan data gempa dalam penelitian ini. Gambar 5 berikut mengilustrasikan hasil penapisan data 967 gempa dengan  $M_w \geq 5,0$ .



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

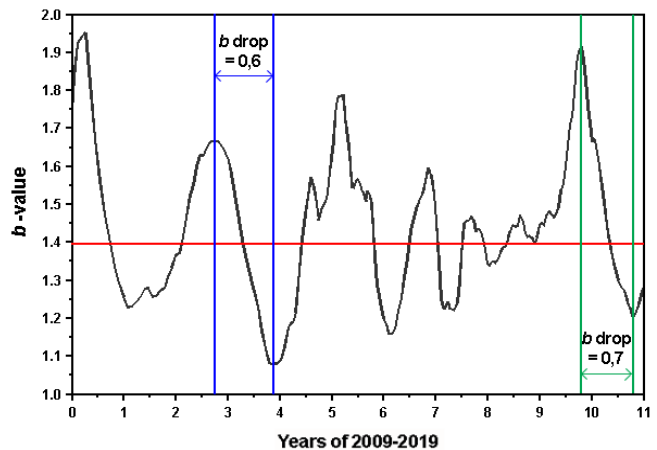
Hasil plot gempa dengan  $M_w \geq M_c$  pada Gambar 5 menunjukkan bahwa  $b$ -value,  $a$ -value dan  $a$ -value (annual) berturut-turut adalah 1,4; 9,75; dan 8,7 yang tidak berbeda signifikan dengan hasil perhitungan ketiga parameter yang diberikan pada Gambar 4. Hal ini jelas membuktikan bahwa teknik penapisan Uhrhammer reliabel dan cocok digunakan untuk estimasi parameter seismik di Maluku Utara.

Perhitungan  $b \approx 1,4$  dengan menggunakan metode ini berbeda signifikan dengan nilai  $b \approx 1,1$  yang diperoleh dari penerapan metode *least-squares* (berbeda sekitar 22%). Kesimpulan penting dari temuan ini adalah  $b$ -value sensitif terhadap perbedaan kecil dari  $M_c$ . Oleh karena itu, akurasi penentuan  $M_c$  juga mempersyaratkan akurasi magnitudo (Godano *et al.*, 2014) yang pada akhirnya menentukan akurasi  $b$ -value dan  $a$ -value (Mignan and Woessner, 2012). Mengingat kedua parameter digunakan untuk menganalisis potensi bahaya bencana gempa tektonik di suatu wilayah, maka penentuan nilai  $M_c$ ,  $b$ -value, dan  $a$ -value secara akurat adalah penting (Nanjo *et al.*, 2010; Popandopoulous and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Hong *et al.*, 2020).

Dengan mempertimbangkan bahwa geologi wilayah Maluku Utara lebih banyak didominasi lapisan batuan yang dipengaruhi aktivitas seismik patahan lokal (Hall, 1987) yang banyak memicu gempa tektonik bermagnitudo sedang sampai relatif tinggi (Widiwijayanti *et al.*, 2003), maka estimasi parameter  $a$ -value dan  $b$ -value dengan metode *maximum likelihood* yang memberikan  $b$ -value sekitar 1,4 dan  $a$ -value sekitar 9,75 yang lebih dipercaya sebagai hasil hitung kedua parameter. Dalam konteks ini, nilai  $b \approx 1,4$  (relatif tinggi) menunjukkan akumulasi stres mekanik yang dialami batuan bawah permukaan di wilayah Maluku Utara adalah relatif rendah, akumulasi energi seismik juga rendah. Hal ini berarti lapisan batuan geologi tidak membutuhkan banyak waktu untuk melepas energi seismik tersimpan via mekanisme gempa tektonik. Dengan demikian, frekuensi gempa tektonik di wilayah Maluku Utara relatif tinggi yang terekam sebagai level seismisitas tahunan yang relatif tinggi yaitu  $a$ -value (annual)  $\approx 8,7$  (relevan sebagai parameter).

Perilaku  $b$ -value sekaligus dinamika seismo-tektonik wilayah Maluku Utara selama kurun waktu 2009-2019 bisa dipelajari melalui *time-varying b-value*. Gambar 6 berikut merupakan grafik variasi  $b$ -value *with time* untuk seluruh data gempa tektonik yang dipelajari dalam penelitian ini. Karakteristik grafik variasi  $b$ -value *with time* (Gambar 6) yang sangat fluktuatif dengan  $b$ -min  $\approx 1,1$  dan  $b$ -maks  $\approx 1,9$  berbeda dengan kasus lipatan kerak Bumi di wilayah utara-timur Jepang di mana  $b$ -value bervariasi antara 0,7 – 0,9 (Cao and Gao, 2002). Sifat fluktuatif ini bisa diasosiasikan dengan frekuensi pelepasan energi yang relatif tinggi di wilayah Maluku Utara, paralel dengan  $a$ -value (annual)  $\approx 8,7$  yang menunjukkan level seismisitas yang relatif tinggi. Fakta bahwa  $b$ -min  $\approx 1,1$  mendekati harga normal  $b \approx 1,0$  (Godano *et al.*, 2014; Hiemer *et al.*, 2014; Nava *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020) memberikan tafsiran bahwa

seting tektonik Maluku Utara didominasi oleh patahan lokal Sorong (Hall, 1987) dengan pengaruh Lempeng Filipina, Busur Sangihe and Halmahera (Widiwijayanti *et al.*, 2003) ikut bermain dalam dinamika batuan bawah permukaan. Nilai *time-averaged b-value* sebesar  $b \approx 1,4$  (garis merah) juga memberikan konfirmasi temuan yang sama seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5.



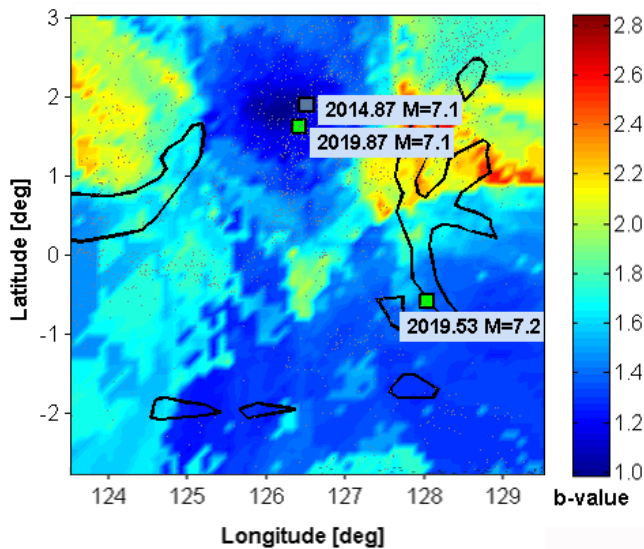
**Gambar 6.** Grafik variasi temporal  $b$ -value dari data gempa di wilayah Maluku Utara selama tahun 2009-2019, di mana pada sumbu horisontal 0=Januari 2009, 1=Januari 2010, dan 11=Januari 2020. Garis merah horisontal adalah *the b-value averaged over time*,  $b \approx 1,4$ .

Fitur menarik lain dari Gambar 6 adalah  $b$ -value drop yang signifikan, sekurangnya antara fase 3-4 (Januari 2012 menuju Januari 2013) dan fase 10-11 (Januari 2019 menuju Januari 2020). Antara fase 3-4 (*offset*), inspeksi visual memberikan  $b$ -value drop  $\approx 0,6$  (dua garis biru) dan antara fase 10-11 (*offset*)  $b$ -value drop  $\approx 0,7$  (dua garis hijau). Kedua  $b$ -value drop tersebut paling besar di antara semua fase tahunan dari 2009-2019. Untuk  $b$ -value drop  $\approx 0,7$  selama fase 10-11 (*offset*) stres mekanik terakumulasi pada lipatan batuan bawah permukaan wilayah Maluku Utara. Energi potensial seismik yang tersimpan tidak lagi mampu ditahan dan dalam upaya mencari keseimbangan geologi yang baru energi tersebut dilepaskan melalui mekanisme gempa relatif besar dengan magnitudo  $M_w$  7,2 (Juli 2019) dan  $M_w$  7,1 (November 2019). Penjelasan serupa berlaku untuk  $b$ -value drop  $\approx 0,6$  selama fase 3-4 (*offset*) namun gempa relatif besar  $M_w$  7,1 baru terjadi November 2014. Hal ini berarti *time-varying b-value* khususnya  $b$ -value drop dapat menjadi prekursor (tanda) gempa relatif besar yang akan terjadi di suatu wilayah (Nuannin *et al.*, 2005; 2012; Prasad and Singh, 2015) sekaligus memberi alternatif studi earthquake early warning (Satriano *et al.*, 2011).

Perilaku  $b$ -value berdasarkan *time-varying b-value* pada Gambar 6 hanya menjelaskan mengenai waktu yang paling mungkin saat gempa relatif besar akan terjadi tanpa mampu menunjukkan kemungkinan lokasi gempa tersebut. Oleh karena itu, diperlukan informasi tambahan untuk melengkapi informasi pada Gambar 6, yaitu berupa prediksi

di mana lokasi gempa relatif besar akan terjadi. Informasi ini bisa diperoleh dari variasi spasial  $b$ -value Maluku Utara. Hal ini penting untuk memperkuat argumen  $b$ -value drop sebagai penanda awal atau prekursor gempa relatif besar di wilayah Maluku Utara.

Variasi spasial  $b$ -value dan  $a$ -value di Maluku Utara dipelajari dari pola sebaran warna sebagai representasi dari variasi spasial  $b$ -value dan  $a$ -value di wilayah tersebut. Gambar 7 berikut ini menunjukkan variasi spasial  $b$ -value yang dibangkitkan dari data gempa Maluku Utara selama 2009-2019 dengan bantuan ZMAP6.0 (Wiemer, 2001).



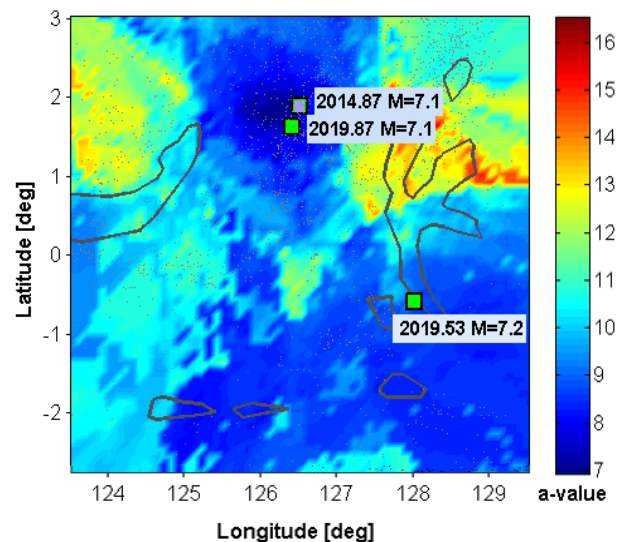
**Gambar 7.** Variasi spasial  $b$ -value dari data gempa tektonik di wilayah Maluku Utara selama tahun 2009-2019.

Gambar 7 menggambarkan variasi spasial  $b$ -value di Maluku Utara dengan rentang  $1,0 \leq b \leq 2,8$  (dengan kata lain *spatially-averaged b-value* adalah 1,9). Hal ini berarti bahwa level stres mekanik yang dialami oleh batuan bawah permukaan di hampir seluruh wilayah Maluku Utara relatif rendah. Kotak abu-abu pada Gambar 7 merupakan episenter gempa  $M_w$  7,1 (November 2014) di Laut Maluku yang diapit oleh zona subduksi Busur Sangihe dan Halmahera (Widiwijayanti *et al.*, 2003). Dua kotak hijau merupakan episenter gempa  $M_w$  7,2 (Juli 2019) dan  $M_w$  7,1 (November 2019) yang terjadi di wilayah Selatan Pulau Halmahera dan Laut Maluku. Analisis pada Gambar 6 dan Gambar 7 secara bersamaan mampu mengungkap gempa relatif besar pada sejarah kegempaan di wilayah Maluku Utara, baik dalam hal waktu maupun lokasi gempa, di mana indikasi tersebut direpresentasikan oleh  $b$ -value drop.

Gambar 7 semakin memperkuat deskripsi Gambar 6, di mana gempa relatif besar akan terjadi di wilayah yang mengalami  $b$ -value drop besar (Prasad and Singh, 2015). Wilayah yang berwarna biru tua (wilayah dengan  $b$ -value drop besar) menunjukkan bahwa akumulasi energi seismik yang disimpan oleh batuan bawah permukaan relatif tinggi (Cao and Gao, 2002; Wu *et al.*, 2018; Hussain *et al.*, 2020). Hal ini berarti potensi gempa besar adalah relatif tinggi

(Nuannin *et al.*, 2005; Prasad and Singh, 2015). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa variasi spasial dan temporal  $b$ -value dapat digunakan sebagai prekursor gempa besar yang lebih akurat (Nuannin *et al.*, 2005; 2012; Prasad and Singh, 2015).

Studi seismisitas dan potensi bahaya bencana gempa di Maluku Utara membutuhkan juga analisis variasi spasial  $a$ -value. Hal ini penting untuk mengetahui level seismisitas di wilayah tersebut selama kurun tahun 2009-2019 yang digambarkan pada Gambar 8 berikut.



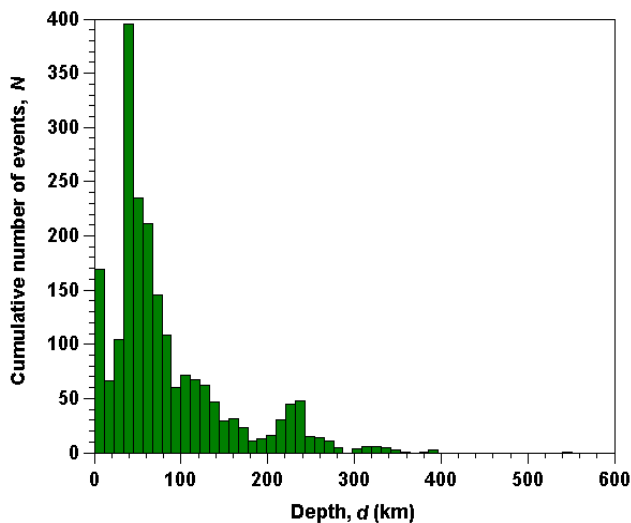
**Gambar 8.** Variasi spasial  $a$ -value dari data gempa tektonik di wilayah Maluku Utara selama tahun 2009-2019.

Gambar 8 memiliki pola sebaran warna yang terlihat hampir sama seperti pola sebaran warna Gambar 7. Hal ini menunjukkan distribusi dan akurasi  $b$ -value ini sangat memengaruhi distribusi dan akurasi  $a$ -value (Mignan and Woessner, 2012; Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Menurut kedua pola sebaran warna pada Gambar 8 dan Gambar 7, wilayah dengan  $b$ -value drop besar telah menahan stres yang relatif lama dan menyimpan energi potensial elastik dalam jumlah besar yang akan dilepaskan secara alamiah melalui mekanisme gempa besar. Oleh karena itu, wilayah  $b$ -value drop besar memiliki level seismisitas cenderung lebih rendah (Hussain *et al.*, 2020) dibanding wilayah lain. Variasi spasial  $a$ -value di wilayah Maluku Utara memiliki rentang  $7 \leq a \leq 16$  (*spatially-averaged a-value* = 11,5). Hal ini menunjukkan level seismisitas di hampir seluruh wilayah Maluku Utara cukup tinggi. Dengan kata lain, wilayah tersebut sering terjadi gempa yang didominasi oleh gempa berkekuatan kecil hingga menengah (Gambar 3).

Sejarah kegempaan di satu wilayah tertentu biasanya didominasi oleh *interplate earthquakes or intraplate events*. *Interplate earthquakes* dipicu oleh aktivitas seismo-tektonik sepanjang zona subduksi dengan karakteristik gempa besar berkekuatan  $M_w \geq 7,5$  dan pelepasan energi seismik melalui mekanisme *thrust-faulting* dengan kedalaman gempa lebih dari 70 km dan bisa mencapai ratusan kilometer diukur dari

permukaan tanah (Stein and Wysession, 2003). Sedangkan *intraplate events* dipicu oleh pergeseran atau lipatan batuan sepanjang patahan lokal pada kedalaman relatif dangkal, kurang dari 100 km diukur dari permukaan (Mogi, 2004; Chu *et al.*, 2009; Hammed, 2012). Gempa jenis ini biasanya disertai pelepasan energi melalui mekanisme *strike-slip* atau *normal-faulting* (Stein and Wysession, 2003) dengan skala magnitudo  $M_w \leq 6,5$  (kecil sampai menengah).

Untuk memastikan sumber gempa yang sering terjadi di wilayah Maluku Utara, maka dengan bantuan Zmap 6.0 dibuat histogram sebaran kedalaman pusat gempa tektonik di wilayah tersebut pada Gambar 7.



**Gambar 9.** Diagram batang menggambarkan pola distribusi kedalaman sumber gempa tektonik (hiposenter) di wilayah Maluku Utara antara tahun 2009-2019.

Gambar 9 menunjukkan bahwa pusat gempa tektonik di Maluku Utara mayoritas berada pada kedalaman dangkal kurang dari 100 km dengan frekuensi kejadian tertinggi adalah gempa berpusat pada 40-60 km di bawah permukaan. Kombinasi informasi dari Gambar 3 yang menunjukkan frekuensi tertinggi adalah gempa bermagnitudo  $M_w \approx 5,0$  memberikan kepastian *intraplate earthquakes* mendominasi wilayah Maluku Utara (Sabtaji, 2020). Analisis sederhana dengan melihat parameter  $b \approx 1,4$  (40% lebih tinggi dari harga normal  $b$ -value) dari Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 yang termasuk relatif tinggi memberikan tafsiran bahwa akumulasi stres lapisan batuan bawah permukaan wilayah Maluku Utara relatif rendah. Hal ini paralel dengan temuan terdahulu yang menyatakan bahwa daerah dengan  $b$ -value tinggi berkorelasi dengan frekuensi kejadian gempa yang tinggi pula (Popandopoulus and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sebagai tambahan informasi dari Gambar 9, bagian ujung kiri histogram merefleksikan gempa dangkal pada kedalaman dekat permukaan yang relatif sering terjadi sedangkan ujung kanan menunjukkan gempa dengan pusat lebih dari 300 km di bawah permukaan sangat jarang terjadi. Menurut Stein and Wysession (2003), kedalaman  $\geq 300$  km dikategorikan

sebagai *deep earthquakes* yang biasa ditemui untuk kasus *interplate earthquakes*.

## PENUTUP

### Simpulan

Studi seismisitas dan analisis potensi bencana gempa di Maluku Utara dilakukan dengan menentukan parameter  $a$ -value dan  $b$ -value. Kedua parameter tersebut menjelaskan level seismisitas dan stres mekanik yang disimpan oleh batuan geologi bawah permukaan di wilayah tersebut yang diperoleh dari statistik FMD via hukum Gutenberg-Richter. Hukum Gutenberg-Richter diterapkan untuk katalog gempa USGS selama tahun 2009-2019. Dalam proses perhitungan, metode *maximum likelihood* terbukti lebih akurat dalam menentukan  $a$ -value dan  $b$ -value daripada *least-squares*. Menurut metode *maximum likelihood* yang dituliskan dalam format 1 desimal (berturut-turut sesuai urutan perhitungan),  $b$ -value  $\approx 1,4$ ,  $a$ -value  $\approx 9,7$ ,  $a$ -value (annual)  $\approx 8,7$  yang bisa memberikan tafsiran bahwa level seismisitas wilayah Maluku Utara relatif tinggi (karena  $a$ -value dan  $a$ -value (annual) relatif tinggi) dan stres batuan yang relatif rendah (karena  $b$ -value  $> 1,0$ ) serta dominasi gempa berkekuatan skala menengah. Oleh karena itu, mitigasi bencana dengan fokus pada peningkatan kesadaran dan kesiagaan terhadap kerentanan wilayah perlu dilakukan segera di Maluku Utara. Sebagai tambahan info,  $b$ -value *drop* yang dideduksi dari variasi spasial dan temporal  $b$ -value bisa menjadi prekursor gempa relatif besar di wilayah Maluku Utara.

### Saran

Mengingat peran penting parameter seismik  $b$ -value dan  $a$ -value dalam pemetaan wilayah rawan gempa tektonik di satu wilayah tertentu, maka studi seismisitas di wilayah Maluku Utara melalui metode *maximum likelihood* dalam penelitian ini sebaiknya diterapkan juga untuk wilayah lain di Indonesia. Dalam praktek perhitungan kedua parameter seismik tersebut, seismik zonasi perlu dilakukan dengan membagi wilayah tersebut menjadi beberapa area kecil yang akan memberikan informasi seismik lebih detil.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada USGS atas ketersediaan data sekunder gempa penelitian ini yang diakses dari <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada *reviewers* atau dosen penguji yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A. Asencio-Cortés, G. and Martínez-Álvarez, F. 2017. Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, Vol. 717, pp. 449–472.
- Amaro-Mellado, J. L. and Bui, D. T. 2020. GIS-based

- mapping of seismic parameters for the Pyrenees. *International Journal of Geo-Information*, Vol. 452, No. 9, pp. 1-21.
- Balocchi, P. 2017. Aftershock identification and classification. *Open Journal of Earthquake Research*, Vol. 6, pp. 135-157.
- Cao, A. M., and Gao, S. S. 2002. Temporal variations of seismic b-values beneath northeastern japan island arc. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 9, pp. 1334-1336.
- Carvajal, M., Araya-Cortejo, C., S  pulveda, I., Melnick, D. & Haase, J. S., 2019. Nearly instantaneous tsunamis following the Mw 7.5 2018 Palu earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 10, pp. 5117-5133.
- Castellaro, S., Mulargia, F. and Kagan, Y. Y. 2006. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, Vol. 165, Issue 3, pp. 913-930.
- Chu, R., Zhu, L., and Helmberger, D. V. 2009. Determination of earthquake focal depths and source time functions in central Asia using teleseismic *P* waveforms. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, Issue 17, pp. 1-4.
- 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.
- Draper, N. R. and Smith, H. 1998. *Applied Regression Analysis, Third Edition*. pp. 1-706. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- 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.
- Gentili, S., Di Giovambattista, R. and Peresan, A. 2017. Seismic quiescence preceding the 2016 central Italy earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 272, pp. 27-33.
- Godano, C., Lippiello, E. and de Arcangelis, L. 2014. Variability of the *b*-value in the Gutenberg-Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, Issue 3, pp. 1765-1771.
- Gusman, A. R., Supendi, P., Nugraha, A. D., Power, W., Latief, H., Sunendar, H., Widiyantoro, S., Daryono, Wiyono, S. H., Hakim, A., Muhari, A., Wang, X., Burbidge, D., Palgunadi, K., Hamling, I. & Daryono, M. R. 2019. Source model for the tsunami inside Palu Bay following the 2018 Palu earthquake, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 15, pp. 8721-8730.
- Hall, R. 1987. Plate boundary evolution in the Halmahera region, Indonesia. *Tectonophysics*, Vol. 144, Issue 4, pp. 337-352.
- 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.
- Hiemer, S., Woessner, J., Basili, R., Danciu, L., Giardini, D., Wiemer, S. 2014. A smoothed stochastic earthquake rate model considering seismicity and fault moment release for Europe. *Geophysical Journal International*, Vol. 198, Issue 2, pp. 1159-1172.
- Hong, T-K., Park, S., Lee, J. and Kim, W. 2020. Spatiotemporal seismicity evolution and seismic hazard potentials in the Western East Sea. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, No. 3, pp. 3761-3774.
- Hussain, H., Shuangxi, Z., Usman, M. and Abid, M. 2020. Spatial variation of *b*-value and their relationship with the fault blocks in the Western Part of the Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Entropy*, Vol. 22, pp.1-13.
- 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.
- Kusky, T. 2008. *Earthquakes: Plate Tectonics and Earthquake Hazards*. pp. 1-169. New York: Fact on File, Inc.
- 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>.
- Mogi, K. 2004. Deep seismic activities preceding the three large ‘shallow’ earthquakes off south-east Hokkaido, Japan–the 2003 Tokachi–oki earthquake, the 1993 Kushiro–oki earthquake and the 1952 Tokachi–oki earthquake. *Earth Planets Space*, Vol. 56, pp. 353-357.
- Nanjo, K. Z., Ishibe, T., Tsuruoka, H., Schorlemmer, D.,

- Ishigaki, Y. and Hirata, H. 2010. Analysis of the completeness magnitude and seismic network coverage of Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, pp. 1-9.
- Nava, F.A., Ávila-Barrientos, L., Márquez-Ramírez, V. H., Torres, I., Zúñiga, F.R. 2018. Sampling uncertainties and source *b* likelihood for the Gutenberg-Richter *b* value from the Aki-Utsu method. *Journal of Seismology*, Vol. 22, No. 1, pp. 315-324.
- 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>.
- Nguyen, N., Griffin, J., Cipta, A. and Cummins, P. R. 2015. *Indonesia's Historical Earthquakes: Modelled Examples for Improving the National Hazard Map*, pp. 1-79. Canberra: Australian Geoscience.
- 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.
- Nuannin, P., Kulhánek, O. and Persson, L. 2012. Variations of *b*-values preceding large earthquakes in the Andaman–Sumatra subduction zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 61, pp. 237-242.
- Peresan, A. and Gentili, S. 2020. Identification and characterisation of earthquake clusters: a comparative analysis for selected sequences in Italy and adjacent regions. *Bulletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 61, No. 1, pp. 57-80.
- 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.
- Singh, C. 2016. Spatial variation of seismic *b*-value across the NW Himalaya. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 7, No. 2, pp. 522-530.
- Stein, S. and Wyssession, M. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing: Malden, MA US. pp. 1-498.
- Suppasri, A., Goto, K., Muhari, A., Ranasinghe, P., Riyaz, M., Affan, M., Mas, E., Yasuda, M. and Imamura, F. 2015. A decade after the 2004 Indian Ocean Tsunami: the progress in disaster preparedness and future challenges in Indonesia, Sri Lanka, Thailand and Maldives. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, pp. 3313-3341.
- Thingbaijam, K. K. S., Mai, P. M. and Goda, K. 2017. Scalling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 5, pp. 2225-2246.
- 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>.
- Widiwijayanti, C., Mikhailov, V., Diamant, M., Deplus, C., Louat, R., Tikhotsky, S. and Gvishiani, A. 2003. Structure and evolution of the Molucca Sea area: constraints based on interpretation of a combined sea-surface and satellite gravity dataset. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 215, Issue 1-2, pp. 135-150.
- 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.
- Wu, Y. M., Chen, S. K. Huang, T. C., Huang, H. H., Chao, W. A. and Koulakov, I. 2018. Relationship between Earthquake *b*-values and crustal stresses in a young Orogenic belt. *Geophysical Research Letters*, Vol. 45, pp. 1832-1837.
- Yingnan, Z., Xudong, Z. and Feng, F. 2019. Study of the correlations between main shocks and aftershocks and aftershock synthesis method. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 18, No. 4, pp. 759-775.