

STUDI SEISMISITAS MELALUI PENENTUAN PARAMETER a -VALUE DAN b -VALUE DI WILAYAH SUMATERA BARAT

Erlin Andayani Dewi, Tjipto Prastowo

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

Email: erlin.17030224037@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Studi kegunaan dan analisis potensi bahaya bencana seismik di Sumatera Barat dilaksanakan dengan menentukan parameter a -value dan b -value di wilayah tersebut. Kedua parameter ini mendeskripsikan seismisitas dan akumulasi stres pada batuan bawah permukaan. Penentuan kedua parameter ini melalui hukum Gutenberg-Richter dalam bentuk relasi frekuensi-magnitudo adalah penting untuk analisis pemetaan wilayah rawan bencana gempa. Kedua parameter ditentukan dengan menggunakan metode *least square* dan *maximum likelihood* dengan memanfaatkan data sekunder dari USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). Data penelitian ini adalah 1374 kejadian dengan kedalaman sampai 270,1 km dan variasi magnitudo antara $4,1 \leq M_w \leq 7,9$ selama kurun waktu 2007-2019. Penentuan a -value dan b -value dengan metode *maximum likelihood* ditemukan lebih reliabel dan akurat daripada *least square*. Hal ini karena *data filtering* dilakukan sebelum proses pengolahan data. Hasil pemrosesan data dengan metode *maximum likelihood* adalah persamaan empiris, $\log N = 5,28 - 0,65M$ di mana a -value = 5,28 dan b -value = 0,65 dengan N adalah frekuensi kumulatif gempa, M adalah magnitudo yang lebih besar dari M_c yaitu 'magnitude of completeness' (magnitudo terkecil untuk keberlakuan hukum Gutenberg-Richter). Variasi spasial b -value dan a -value berhasil merekonstruksi 2 gempa besar di Sumatera Barat dengan $M > 7,0$ pada tahun 2007 dan 2010. Dengan bantuan aplikasi ZMAP6,0 hasil perhitungan b -value = $0,65 \pm 0,01$, a -value = 5,28 dan a -value (annual) = 4,17 menunjukkan bahwa Propinsi Sumatera Barat merupakan wilayah yang rentan mengalami gempa besar karena tingkat stres mekanik batuan yang relatif tinggi, terutama wilayah barat daya. Hal ini dipicu aktivitas sesar Sumatra dan zona subduksi yang mendominasi seismisitas wilayah Sumatera Barat. Temuan lain adalah mayoritas kedalaman sumber gempa kurang dari 70 km.

Kata Kunci: seismisitas, Sumatera Barat, bencana seismik, a -value, b -value, hukum Gutenberg-Richter

Abstract

Earthquake studies in West Sumatera, were carried out by determining seismic parameters a -value and b -value. These parameters describe seismicity rate and stress accumulated in subsurface rocks. Determination of these parameters by the Gutenberg-Richter law using frequency-magnitude distribution is important for mapping vulnerable areas to seismic threats. The parameters were calculated by the least square and maximum likelihood methods using secondary data from USGS at <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. The datasets included 1374 events with depths varying to 270.1 km and sizes of $4.1 \leq M_w \leq 7.9$ during 2007-2019. Estimation of a -value and b -value using maximum likelihood was found more reliable and accurate because data filtering before processing. The result is given in the empirical equation $\log N = 5.28 - 0.65M$, where a -value = 5.28 and b -value = 0.65 and N is the frequency, M is magnitudes greater than M_c 'magnitude of completeness' (the lower end of magnitudes where the equation remains valid). The spatial variations of b -value and a -value demonstrated 2 large past events with $M > 7$ in Sumatera Barat in 2007 and 2010. Using ZMAP6,0 it was found that b -value is $0,65 \pm 0,01$, a -value is 5,28 and a -value (annual) is 4,17 describing vulnerabilities of Sumatera Barat to large earthquake threats due to a high level of stress accumulated in subsurface rocks, in particular in the south-west region. This is caused by the dominance of subduction-zone processes over the Great Sumatran fault activity in characterising seismicity in the region of interest. In addition, the majority of events were sourced at shallow depths of 70 km below the surface.

Keywords: seismicity, West Sumatera, seismic hazard, a -value, b -value, Gutenberg-Richter law

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu wilayah di dunia dengan aktivitas tektonik yang tinggi (Asrurifak, 2010; Cummins, 2017). Hal ini karena Indonesia berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik aktif di dunia (*mega triple-junction*), yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik yang berinteraksi satu terhadap yang lain (Bird *et al.*, 2003; Chasanah dkk., 2010; Irsyam dkk., 2017). Dinamika lempeng menentukan kondisi geologi bawah permukaan suatu wilayah, apakah wilayah tersebut termasuk kategori daerah tektonik aktif ataukah tidak. BMKG melaporkan 71.628 gempa tektonik di Indonesia

dalam kurun waktu 2009-2019 yang menunjukkan level seismisitas di Indonesia tinggi (Sabtaji, 2020). Kondisi geologi tersebut memicu kerentanan bencana seismik (Asrurifak, 2010) yang bisa terjadi di mana dan kapan saja tanpa bisa dicegah. Oleh karena itu, studi seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik menjadi penting dilakukan untuk memetakan kerentanan wilayah di Indonesia terhadap bencana gempa tektonik.

Dalam konteks tersebut di atas, Sumatera Barat merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang sering mengalami gempa tektonik, di mana pada tahun 2016 BMKG melaporkan 195 kejadian gempa yang didominasi

oleh magnitudo $M < 5,0$. Tumbukan antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia membentuk zona subduksi di sepanjang pantai barat Pulau Sumatera (Chasanah dkk, 2010), lebih tepatnya di sekitar daerah perbatasan pantai barat laut ke bagian selatan Pulau Sumatera (Triyoso *et al.*, 2020). Hal ini berakibat wilayah Sumatera Barat termasuk wilayah dengan tingkat seismisitas tinggi.

Gempa tektonik merupakan fenomena alam destruktif (Satriano *et al.*, 2011), terutama gempa dengan magnitudo yang relatif besar. Dalam konteks tersebut, pengetahuan dasar dan praktis serta metode penanganan yang tepat untuk mengolah informasi seismik suatu wilayah sebagai upaya pengurangan risiko bencana gempa adalah penting (Triyoso *et al.*, 2020).

Meskipun tidak selalu, gempa besar merupakan salah satu pemicu tsunami. Gempa tektonik akibat aktivitas subduksi antar lempeng (*interplate earthquake*) dengan magnitudo relatif besar M_w 7,0 di lepas pantai barat Pulau Sumatera yang masuk wilayah Kepulauan Mentawai dilaporkan terjadi tanggal 25 Oktober 2010 (Hill *et al.*, 2012; Satake *et al.*, 2012). Gempa tersebut memicu gelombang tsunami dengan cakupan dampak dari lokal sampai regional. Tsunami bisa juga dipicu oleh aktivitas seismik patahan (*intraplate earthquake*), misalnya tsunami Palu tanggal 28 September 2018 yang dibangkitkan oleh gempa relatif besar M_w 7,4 berpusat di sepanjang segmen patahan aktif Palu Koro (Widiyantoro *et al.*, 2020).

Dengan mempertimbangkan tingkat seismisitas wilayah Sumatera Barat serta kemungkinan bahaya bencana tsunami yang menyertai kejadian gempa tektonik, maka fokus penelitian ini adalah analisis potensi bahaya bencana gempa tektonik di wilayah tersebut. Dalam hal ini, analisis potensi bahaya bencana gempa tektonik dilakukan melalui perhitungan *a*-value dan *b*-value di wilayah tersebut. Perhitungan kedua parameter tersebut dilakukan dengan bantuan relasi frekuensi-magnitudo Gutenberg-Richter (Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

Parameter *a*-value merupakan ukuran laju aktivitas seismik yang nilainya tergantung pada luas area, lama periode pengamatan, dan magnitudo terbesar. Parameter *b*-value merupakan parameter yang menentukan tingkat stres mekanik dan heterogenitas lapisan batuan geologi bawah permukaan (Han *et al.*, 2015). Kedua parameter tersebut berperan penting pada distribusi spasial magnitudo dan karakteristik seismik suatu wilayah (Lee and Yang, 2006; Diantari *et al.*, 2018).

Pentingnya hukum Gutenberg-Richter terkait dengan bahaya gempa tektonik bisa ditemui dalam studi seismisitas yang diterapkan untuk variasi kondisi tektonik, jangkauan kedalaman, variasi temporal katalog seismik, kegempaan yang terjadi secara alami maupun kegempaan yang diinduksi oleh instrumen. Dengan demikian, hukum Gutenberg-Richter cocok digunakan dalam studi potensi bencana seismik (Han *et al.*, 2015). Oleh karena itu,

penelitian terdahulu (Godano *et al.*, 2014; Popandopoulus *et al.*, 2014; Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado and Bui, 2020) banyak membahas estimasi parameter *a*-value dan *b*-value dari relasi frekuensi-magnitudo Gutenberg-Richter.

Estimasi parameter *a*-value dan *b*-value adalah penting untuk pemetaan wilayah yang rawan terhadap bencana gempa tektonik. Kedua parameter tersebut ditentukan dengan menggunakan metode *least square* (Montgomery *et al.*, 2012) dan *maximum likelihood* (Marzocchi and Sandri, 2003; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Pada penelitian ini, kedua metode tersebut dipilih untuk menentukan *a*-value dan *b*-value di Sumatera Barat sekaligus untuk analisis potensi bahaya bencana seismik di wilayah tersebut. Pemilihan dua metode sekaligus dalam menyelesaikan satu masalah yang sama bertujuan untuk menguji konsistensi dan reliabilitas masing-masing metode melalui konsistensi dan akurasi hasil ukur.

Hukum Gutenberg-Richter

Tingkat kegempaan (*seismicity*) pada suatu wilayah dapat dipelajari dan diketahui melalui distribusi frekuensi-magnitudo dalam persamaan matematis hukum Gutenberg-Richter berikut,

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

di mana N merupakan jumlah kejadian gempa dengan magnitudo $M \geq M_c$ suatu wilayah selama periode waktu tertentu (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sedangkan M_c (*magnitude of completeness*) merupakan magnitudo terkecil sebagai batas bawah jangkauan magnitudo yang terdeteksi oleh instrument di lapangan sebagai fungsi spasiotemporal (Diantari *et al.*, 2018).

Persamaan (1) menunjukkan bahwa titik potong garis lurus terhadap sumbu y merupakan parameter *a*-value dan gradien garis lurus yang menunjukkan linieritas hubungan antara distribusi frekuensi-magnitudo gempa merupakan *b*-value (Popandopoulus and Chatziioannou, 2014), sehingga persamaan (1) adalah persamaan garis lurus antara $\log N$ pada sumbu y sebagai variabel respons dan M pada sumbu x sebagai variabel manipulasi.

Dalam analisis studi potensi bahaya bencana seismik suatu wilayah, perhitungan *a*-value dan *b*-value sangat penting sebagai parameter seismik (Godano *et al.*, 2014; Popandopoulus and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016). Metode *least square* dan *maximum likelihood* adalah metode yang paling umum digunakan untuk menghitung kedua parameter seismik tersebut.

METODE

Metode *Least Square*

Menurut Montgomery *et al.* (2012), metode *least square* adalah metode yang digunakan untuk mengestimasi dan menentukan relasi linier antara dua variabel, dalam hal ini yaitu variabel manipulasi dan variabel respons. Persamaan linear antara dua variabel secara prinsip

dituliskan sebagai berikut,

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

di mana *a* dan *b* merupakan konstanta, *X* merupakan variabel manipulasi, dan *Y* merupakan variabel respons. Dalam menentukan konstanta *a* dan *b* dapat ditulis dalam bentuk persamaan matematis (3) dan (4) berikut,

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

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

jika penelitian menggunakan data kelompok maka *n* berfungsi sebagai jumlah kelas dan jika penelitian menggunakan data tunggal maka *n* berfungsi sebagai jumlah data.

Metode Maximum Likelihood

Metode *maximum likelihood* adalah metode yang digunakan untuk mengestimasi nilai parameter berdasarkan probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Menurut Marzocchi and Sandri (2003), metode *maximum likelihood* bisa digunakan untuk estimasi *a*-value dan *b*-value, yang sebelumnya dilakukan plot distribusi frekuensi-magnitudo. Parameter estimasi *b*-value ditentukan dari persamaan (5) berikut,

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

di mana \bar{M} adalah rata-rata magnitudo untuk skala $M \geq M_c$ dan $\Delta M = 0,1$ adalah *binning interval* pada skala magnitudo tersebut. Parameter *a*-value ditentukan menggunakan persamaan (6) sebagai berikut,

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

Tingkat akurasi penentuan M_c dalam perhitungan *b*-value dapat mempengaruhi keakuratan dalam penentuan *a*-value dalam persamaan (6).

Magnitude of Completeness

Secara prinsip keberadaan M_c pada persamaan (1) merupakan nilai terkecil magnitudo gempa di mana hukum linier-logaritmik Gutenberg-Richter masih valid atau berlaku. Menurut Naylor *et al.* (2010), melalui teknik klustering atau pembagian kelas statistik magnitudo gempa pada distribusi frekuensi-magnitudo gempa akan didapat relasi linier-logaritmik Gutenberg-Richter. Menurut Mignan and Woessner (2012), M_c dapat memiliki nilai yang berbeda jika teknik hitung yang digunakan berbeda. Oleh karena itu, secara teoritik memungkinkan jika M_c tidak bernilai tunggal. Akurasi estimasi M_c merupakan salah satu faktor yang ikut menentukan validitas keberlakuan hukum Gutenberg-Richter (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Diantari *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Mengenai estimasi M_c , peneliti terdahulu (Ogata and Katsura, 1993; Woessner and Wiemer, 2005) berasumsi bahwa gempa dengan magnitudo di bawah M_c tidak ikut menentukan karakteristik seismik geologi pada suatu wilayah. Keberlakuan magnitudo antara M_c dan nilai magnitudo terbesar tertentu yang ditentukan oleh naik

turunnya data statistik gempa serta keterbatasan data gempa dengan skala magnitudo yang besar akan menentukan validitas hukum Gutenberg-Richter pada persamaan (1) (Mignan and Woessner, 2012).

Data dan Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini menggunakan aplikasi Excel, Matlab R2010a, dan ZMAP6.0 untuk mengolah data historis kegempaan yang diunduh dari katalog USGS pada laman <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>, di mana data ini termasuk kedalam data sekunder. Sejumlah 1374 kejadian gempa di wilayah Sumatera Barat pada periode 2007-2019 dengan magnitudo momen antara $4,1 \leq M_w \leq 7,9$ dan kedalaman sumber hingga 270,1 km di bawah permukaan. Seluruh kejadian gempa masih merupakan *raw data* karena belum diseleksi melalui ‘penapisan’ atau *data declustering* (Gardner and Knopoff, 1974; Reasenber, 1985). Teknik *declustering* dilakukan dengan menghapus data *foreshocks* dan *aftershocks* yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi hasil perhitungan parameter seismik *a*-value dan *b*-value di wilayah Sumatera Barat.

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Variabel manipulasi adalah magnitudo momen M_w sedangkan variabel respons adalah distribusi frekuensi kejadian *N* atau nilai logaritmiknya $\log N$. Variabel kontrol adalah metode *least square* dan *maximum likelihood* yang digunakan untuk menentukan parameter seismik *a*-value dan *b*-value melalui pemberlakuan hukum Gutenberg-Richter di wilayah Sumatera Barat. Kedua metode tersebut berbeda dalam hal penapisan perlu dilakukan atau tidak. Pada metode *least square*, 1374 data gempa diolah dengan bantuan Excel tanpa proses penapisan. Solusi yang diberikan untuk menentukan *a*-value dan *b*-value yaitu melalui tampilan langsung grafik garis lurus regresi linear yang menggambarkan kumpulan data historis gempa.

Metode estimasi kedua adalah metode *maximum likelihood* yang relatif lebih kompleks dengan bantuan Excel, Matlab R2010a, dan ZMAP6.0. Dengan bantuan Excel, 1374 data gempa disusun dalam kolom sesuai format yaitu episenter gempa (bujur dan lintang), tanggal kejadian (tahun, bulan, tanggal), kekuatan gempa M_w , kedalaman gempa (km), dan waktu (jam, menit) yang kemudian disimpan dalam format *.csv*, kemudian data dengan format *.csv* diubah menjadi format *.dat* melalui *notepad* yang kemudian dijadikan sebagai masukan dalam ZMAP6.0 yang dijalankan dengan menggunakan Matlab R2010a.

Tahap selanjutnya adalah penapisan terhadap data gempa dengan penapisan Reasenber, sehingga menjadi 1056 data gempa. Secara teknis menurut Amaro-Mellado and Bui (2020), proses penapisan dilakukan dengan jalan menghapus gempa awal (*foreshocks*) dan gempa susulan (*aftershocks*) menyisakan data gempa utama (*mainshocks*). Kemudian, data gempa utama diolah untuk mendapatkan

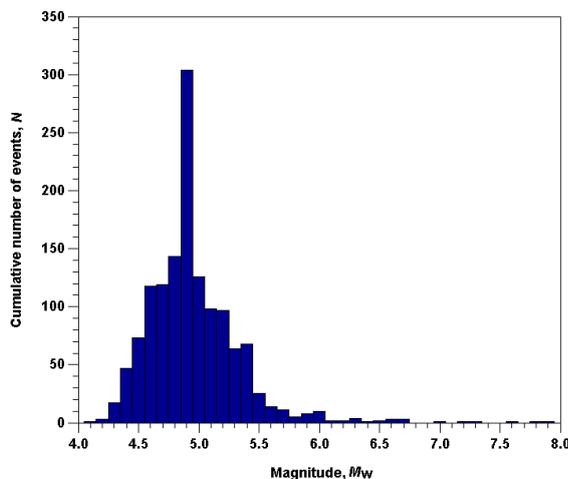
distribusi frekuensi-magnitudo, M_c , parameter a -value dan b -value, dan variasi spasial b -value, variasi spasial a -value, dan distribusi kedalaman gempa di wilayah Sumatera Barat. Penentuan *magnitude of completeness* (M_c) dilakukan menggunakan teknik *maximum curvature* MACX yang mengacu Mignan and Woessner (2012) yang sebelumnya dibahas secara khusus dalam Wiemer and Wyss (2000).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan hasil perhitungan parameter a -value dan b -value menggunakan dua metode yaitu *least square* dan *maximum likelihood*. Masing-masing metode dibahas secara terpisah sebelum dilakukan analisis secara menyeluruh. Kemudian, hasil estimasi kedua parameter tersebut akan dilakukan secara menyeluruh untuk menentukan tingkat kegempaan (*seismicity*) dan potensi bahaya bencana seismik di wilayah Sumatera Barat.

Parameter a dan b (Metode *Least Square*)

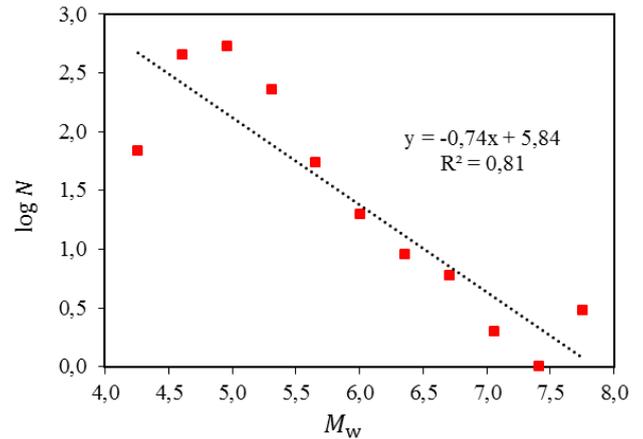
Pada metode ini, sebanyak 1374 data gempa utuh diolah menggunakan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001). Kemudian, untuk mendapatkan *optimum solution* dilakukan pembagian kelas statistik data gempa dengan magnitudo $4,1 \leq M_w \leq 7,9$ dengan lebar kelas masing-masing 0,08 (Gambar 1).



Gambar 1. Plot magnitudo momen gempa M_w terhadap jumlah kejadian N dengan metode *least square*.

Gambar 1 menunjukkan kesesuaian estimasi relasi linier-logaritmik frekuensi-magnitudo, di mana statistik data gempa menunjukkan penurunan frekuensi gempa secara eksponensial hukum Gutenberg-Richter setelah kelas magnitudo berfrekuensi paling tinggi (Naylor *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2015) dengan frekuensi tertinggi pada interval kelas $4,1 \leq M_w \leq 7,9$ yaitu 304 kejadian. Pada Gambar 1 tersebut diketahui bahwa median kelas magnitudo dengan frekuensi tertinggi atau estimasi M_c adalah 4,90. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi frekuensi-magnitudo dapat membangkitkan hukum Gutenberg-Richter.

Gambar 2 berikut adalah plot magnitudo momen M_w terhadap nilai logaritma frekuensi jumlah kejadian $\log N$.



Gambar 2. Plot magnitudo momen gempa M_w terhadap logaritma jumlah kejadian $\log N$ dengan *least square*.

Pada metode *least square*, persamaan linier dua variabel mendiskripsikan X sebagai variabel manipulasi dan Y sebagai variabel respons dengan a dan b merupakan konstanta yang menunjukkan estimasi a -value dan b -value dengan koefisien korelasi R^2 (Montgomery *et al.* 2012). Gambar 2 menunjukkan hubungan linier antara magnitudo momen M_w terhadap logaritma frekuensi kejadian $\log N$, ketika dilakukan regresi linear koefisien relasi yang didapat yaitu 0,81 dan termasuk korelasi yang relatif kuat. Hal ini mengindikasikan bahwa gempa besar itu jarang terjadi. Pada garis regresi yang menggambarkan relasi matematis linier-logaritmik tersebut terdapat penyimpangan pada distribusi gempa, hal ini karena metode *least square* tidak dapat menjangkau gempa dengan magnitudo yang terlalu besar atau kecil. Pada histogram tersebut, penyimpangan terjadi yaitu pada magnitudo yang kurang dari 5,0 dan lebih besar dari 7,5. Berdasarkan distribusi statistik frekuensi-magnitudo metode *least square* menghasilkan persamaan empiris hukum Gutenberg-Richter $\log N = 5,84 - 0,74M$, dengan asumsi perbandingan antara persamaan regresi pada Gambar 1 dengan hukum Gutenberg-Richter maka estimasi parameter a -value adalah 5,84 dan b -value adalah 0,74.

Estimasi b -value dengan *least square* adalah sebesar 0,74. Estimasi tersebut mendekati "harga normal" $b \approx 1,0$ (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014; Marocchi *et al.*, 2016; Mellado and Bui, 2020), di mana estimasi tersebut cukup baik meskipun memiliki ketidakpastian hasil ukur. Estimasi parameter a -value dan b -value pada metode ini tidak memanfaatkan penapisan melainkan memanfaatkan *mixed events* (*foreshocks*, *mainshocks*, *aftershocks*) yang berakibat rendahnya level akurasi b -value. Menurut Mignan and Woessner (2012), ketika level akurasi b -value akan mempengaruhi level akurasi a -value.

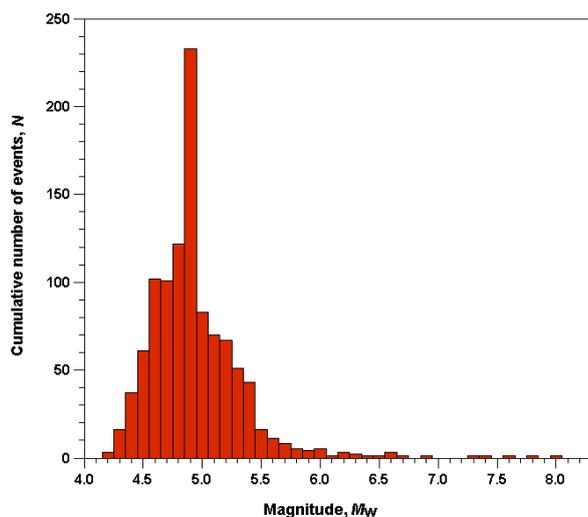
Proses penapisan dalam menentukan gempa utama (*mainshocks*) di suatu wilayah penting untuk dilakukan, karena memiliki tingkat akurasi hasil hitung yang relatif tinggi. Hal ini terjadi karena gempa utama adalah gempa yang memiliki distribusi magnitudo relatif lebih besar sebagai refleksi dari energi seismik yang dilepaskan lebih

besar dengan durasi waktu lebih singkat. Pengolahan data menggunakan metode *least square* hanya dikelompokkan ke dalam kelas distribusi frekuensi tertentu sehingga menyebabkan penyimpangan hasil perhitungan akibat kekosongan data pada 1-2 kelas tertentu atau *statistical outlier*. Beberapa peneliti terdahulu (Marzocchi and Sandri, 2003; Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020) tidak menerapkan penggunaan metode ini. Castellaro *et al.* (2006) mengatakan ada kelemahan inheren dalam estimasi a -value dan b -value dengan metode ini.

Parameter a dan b (Metode Maximum Likelihood)

Pada metode ini, penapisan dilakukan terhadap 1374 kejadian gempa sehingga menjadi 1056 data gempa utama. Hal ini mengacu pada penelitian van Stiphout *et al.* (2012) dan Mellado and Bui (2020), di mana proses penapisan dilakukan untuk memperoleh gempa utama (*mainshocks*) yang akan diolah dengan menggunakan aplikasi ZMAP6.0 (Wiemer, 2001). Untuk mendapatkan *optimum solution* dilakukan pembagian kelas statistik data gempa dengan lebar kelas masing-masing 0,08 seperti pada Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan kesesuaian estimasi perkiraan relasi linier-logaritmik frekuensi-magnitudo, di mana gambar statistik data gempa menunjukkan penurunan frekuensi gempa secara eksponensial hukum Gutenberg-Richter setelah kelas magnitudo berfrekuensi paling tinggi (Naylor *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2015) dengan frekuensi tertinggi pada interval kelas magnitudo $4,1 \leq M_w \leq 7,9$ yaitu 235 kejadian gempa. Dari histogram magnitudo pada Gambar 3 didapatkan median dari kelas magnitudo dengan frekuensi tertinggi atau estimasi M_c sebesar 4,90. Namun sebelum itu, masih diperlukan koreksi oleh ZMAP6.0 terhadap nilai M_c . Penjelasan ini menunjukkan bahwa hukum Gutenberg-Richter dapat dibangkitkan melalui distribusi frekuensi-magnitudo.

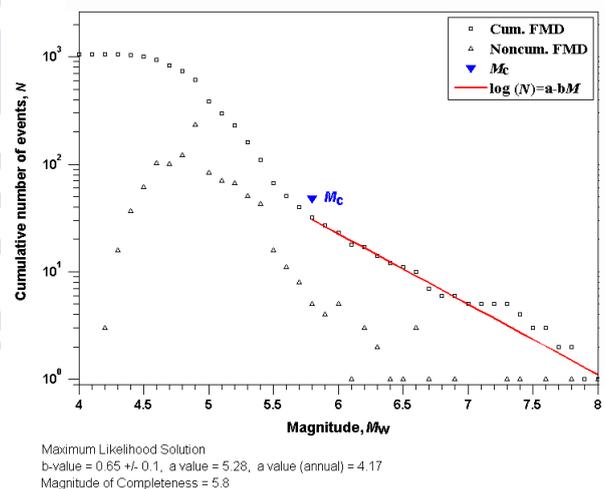


Gambar 3. Plot magnitudo momen gempa M_w terhadap jumlah kejadian N dengan metode *maximum likelihood*.

Hukum Gutenberg-Richter menjadikan M_c sebagai fungsi magnitudo dengan frekuensi tertinggi, karena secara

kualitatif plotting distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 1 dan Gambar 3 mengindikasikan bahwa data statistik gempa di wilayah Sumatera Barat mengalami penurunan secara eksponensial setelah magnitudo berfrekuensi tinggi. Meskipun hasil evaluasi M_c dua metode pada penelitian ini bernilai sama yaitu 4,90. Namun hal ini tidak menjadikan hasil estimasi b -value bernilai sama pada kedua metode ini, karena pada persamaan (5) dijelaskan bahwa rumusan b -value pada metode *maximum likelihood* dipengaruhi oleh \bar{M} (rata-rata magnitudo untuk skala $M \geq M_c$) dan ΔM (*binning interval* pada skala magnitudo tersebut) yang ditentukan oleh data keseluruhan gempa dan kelas statistik magnitudo.

Plotting distribusi frekuensi-magnitudo dilakukan dengan menggunakan aplikasi ZMAP6,0 untuk memastikan kebenaran dari M_c serta a -value dan b -value. Berbeda dari Gambar 2, Gambar 4 berikut adalah plot magnitudo momen M_w terhadap jumlah kumulatif frekuensi kejadian N sekaligus logaritma frekuensi kejadian $\log N$. *Magnitude of completeness* M_c dari grafik distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 4 bernilai M_w 5,8. Penentuan M_c dilakukan dengan menggunakan teknik MAXC, di mana teknik ini memiliki tingkat korelasi hingga 90%. Nilai M_c dalam teknik MAXC merupakan nilai magnitudo terendah dari M_{CO} yang memiliki b -value konstan (Mignan and Woessner, 2012). M_{CO} atau *magnitudo cut off* merupakan rentang magnitudo di mana jumlah kejadian mulai menurun pada magnitudo tertentu. Teknik ini juga menunjukkan bahwa *visual inspection* pada Gambar 1 dan Gambar 3 mendiskripsikan distribusi frekuensi-magnitudo.



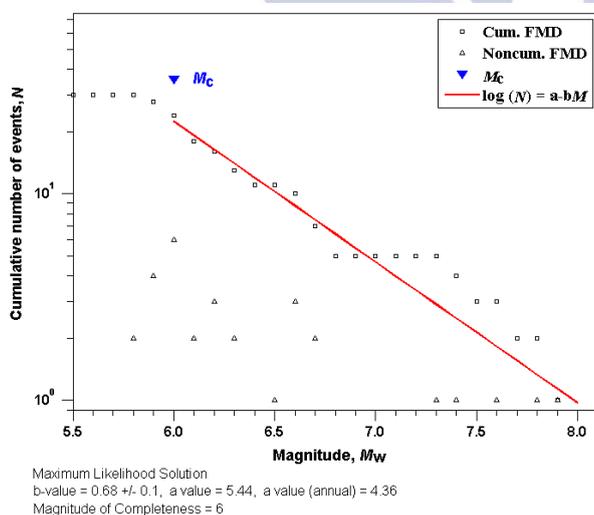
Gambar 4. Plot magnitudo momen gempa M_w terhadap distribusi frekuensi-magnitudo (FMD), baik kumulatif N maupun non-kumulatif $\log N$, di mana estimasi M_c dan kedua parameter seismik ditentukan oleh ZMAP 6.0 dengan metode *maximum likelihood* dan penapisan Reasensberg.

Estimasi b -value yang ditunjukkan pada grafik distribusi frekuensi-magnitudo pada Gambar 4 yaitu 0,65 dengan ketidakpastian ukur 0,1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Popandopoulos and Chatziioannou (2014)

bahwa harga normal $b \approx 1,0$ serta penelitian Amaro-Mellado and Bui (2020) bahwa jangkauan statistik b -value berkisar antara 0,6 dan 1,5. Pada Gambar 4 juga diketahui bahwa a -value dan *annual rate of seismicity* berturut-turut yaitu 5,28 dan 4,17. Hal ini menunjukkan bahwa seismisitas wilayah Sumatera Barat tidak terlalu tinggi, namun struktur batuan bawah permukaannya menyimpan akumulasi stress yang relatif tinggi. Informasi lain yang didapat pada grafik FMD Gambar 4 yaitu persamaan empiris hukum Gutenberg-Richter yang ditunjukkan oleh garis merah, yaitu $\log N = 5,28 - 0,65M$.

Untuk menguji kebenaran dan konsistensi aplikasi ZMAP6.0 dalam mengestimasi b -value dan a -value serta *annual rate of seismicity*, maka dilakukan kegiatan penapisan ulang dengan mengubah jumlah data dari 44 data gempa menjadi 30 data gempa (di mana data tersebut merupakan magnitudo $\geq M_c$). Hal ini dilakukan untuk memastikan reliabilitas hasil estimasi b -value dan a -value dengan teknik penapisan Reasenberg. Gambar 5 berikut adalah grafik distribusi-magnitudo hasil penapisan 44 data gempa dengan $M_w \geq 5,8$.

Teknik penapisan Reasenberg sangat reliabel untuk menentukan estimasi parameter seismik di Sumatera Barat. Hal ini terbukti dari estimasi b -value dan a -value serta *annual rate of seismicity* berturut-turut menggunakan plot gempa $M_w \geq M_w = 5,8$ yaitu 0,68 (dengan ketidakpastian ukur 0,1); 5,44; dan 4,36. Estimasi parameter tersebut menunjukkan kemiripan dengan Gambar 4.



Gambar 5. Plot magnitudo momen gempa M_w terhadap distribusi frekuensi-magnitudo (FMD), baik kumulatif N maupun non-kumulatif $\log N$ dengan *maximum likelihood* dan penapisan Reasenberg, di mana data gempa dipilih $M \geq M_w = 5,8$.

Perbedaan kecil M_c akan mempengaruhi b -value. Dengan kata lain akurasi magnitudo sangat penting untuk menentukan keakuratan M_c yang kemudian berpengaruh terhadap tingkat akurasi b -value dan a -value (Godano *et al.*, 2014; Popandopoulos and Chatziioannou, 2014, Lamessa *et*

al., 2019). Dalam hal ini dapat diartikan bahwa akurasi penentuan nilai M_c , b -value, dan a -value adalah hal yang penting untuk analisis potensi bahaya bencana seismik suatu wilayah (Popandopoulos and Chatziioannou, 2014; Han *et al.*, 2015; Diantari *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Perbedaan estimasi b -value dengan kedua metode adalah cukup signifikan, yaitu sekitar 12%, di mana b -value dengan metode *least square* $b \approx 0,74$ dan dengan metode *maximum likelihood* $b \approx 0,65$.

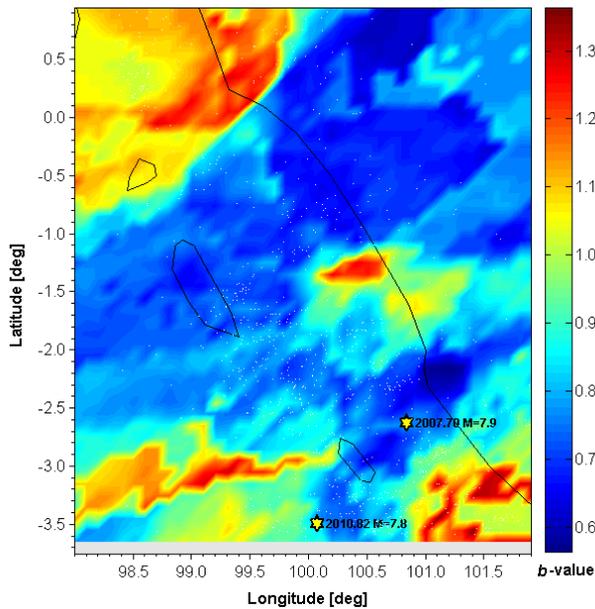
Kondisi geologi wilayah Sumatera sangat kompleks, di mana bagian selatan Sumatera dilalui oleh busur sunda yang membentang dari Andaman hingga Jawa dan Kepulauan Nusa Tenggara (Harjono dkk., 2017). Menurut Harjono dkk. (2017) dan Irsyam dkk. (2017), busur Sunda ini terbentuk akibat pergerakan antar lempeng Indo-Australia dengan Eurasia yang bahkan akibat tumbukan antar lempeng ini menyebabkan terbentuknya zona patahan yang biasa dikenal sebagai *Sumatran Fault Zones* (SFZ). Hal ini memicu terjadinya gempa yang berasal dari zona subduksi selain zona patahan dengan magnitudo sedang hingga relatif besar.

Hasil perhitungan b -value dan a -value dengan *maximum likelihood* lebih reliabel dengan b -value sebesar 0,65 dan a -value sebesar 5,28. Nilai $b \approx 0,65$ lebih rendah dari harga normal, hal ini mengindikasikan bahwa batuan bawah permukaan wilayah Sumatera Barat menyimpan akumulasi stress yang tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan rentang tahun yang cukup lama untuk melepaskan energi seismik, pelepasan energi seismik berupa gempa biasanya memiliki kekuatan magnitudo M_w yang besar. Berdasarkan seismisitas tahunan atau a -value (annual) sebesar 4,17 mengindikasikan bahwa frekuensi gempa tektonik yang terjadi di Sumatera Barat relatif lebih rendah dari wilayah Indonesia bagian timur (Sabtaji, 2020). Estimasi b -value pada penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Nuannin *et al.* (2012) bahwa 15 peristiwa gempa pada zona subduksi Andaman-Sumatera memiliki b -value rendah.

Analisis perilaku b -value dan seismotektonik wilayah Sumatera Barat dalam kurun waktu 2007-2019 dapat dilakukan dengan memetakan distribusi spasial a -value dan b -value. Pemetaan dilakukan dengan menggunakan aplikasi ZMAP 6.0 (Wiemer, 2001). Gambar 6 berikut adalah peta distribusi spasial b -value wilayah Sumatera Barat antara 2007-2019. Rentang variasi b -value pada peta tersebut digambarkan dengan perbedaan warna, di mana warna biru menunjukkan b -value yang relatif rendah, sedangkan semakin merah maka b -value relatif lebih besar (Wiemer and Benoit, 1996). Wilayah dengan b -value di bawah 'harga normal' $b \approx 1$ mengindikasikan bahwa b -value rendah, sebaliknya jika b -value di atas 'harga normal' $b \approx 1$ mengindikasikan bahwa b -value tinggi (Prasad and Singh, 2015).

Bagian barat daya lepas pantai Sumatera Barat didominasi oleh warna biru tua dengan rentang b -value

relatif rendah yaitu 0,6–0,8. Tafsiran ini memberikan informasi bahwa wilayah ini menyimpan akumulasi stress yang tinggi dengan tingkat kerapuhan batuan yang rendah (Prasad and Singh, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sebagai akibatnya, pada masa mendatang mungkin terjadi peristiwa gempa besar (Scholtz, 1968; Wyss 1973). Hal ini terbukti dengan adanya dua peristiwa gempa besar pada wilayah tersebut (lebih tepatnya wilayah Mentawai), yaitu pada tahun 2007 dengan M_w 7,9 dan pada tahun 2010 dengan M_w 7,8.

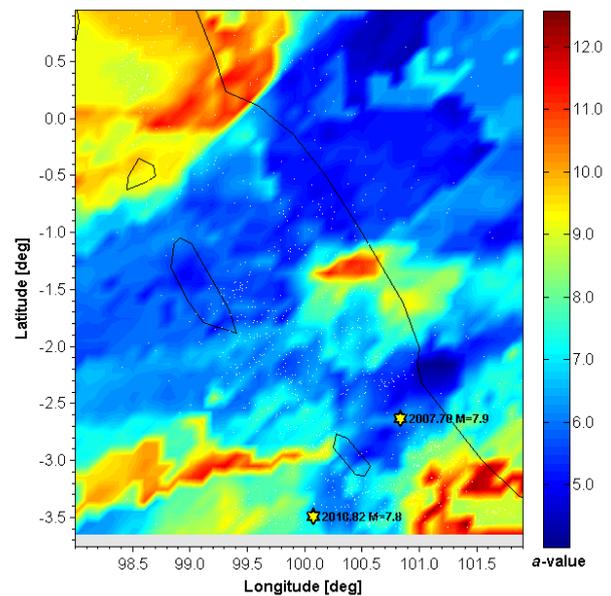


Gambar 6. Peta distribusi spasial b -value wilayah Sumatera Barat selama kurun waktu 2007-2019.

Sedangkan untuk daratan bagian barat dekat pantai Sumatera Barat (lebih tepatnya wilayah Padang dan sekitarnya) serta bagian selatan kepulauan Mentawai sedikit didominasi oleh warna kuning hingga merah dengan rentang b -value 1,0 hingga 1,2. Hal ini menginformasikan bahwa di wilayah ini menyimpan akumulasi stress yang relatif rendah dengan tingkat kerapuhan batuan yang tinggi (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Aktivitas tektonik yang kompleks di wilayah Sumatera Barat ini menyebabkan beberapa segmen patahan aktif dengan tingkat stress batuan yang berbeda. Informasi lain yang didapat dari peta distribusi spasial tersebut yaitu lokasi yang belum pernah terjadi atau jarang terjadi gempa besar, sehingga dikemudian hari akan memungkinkan terjadi gempa besar di wilayah tersebut akibat penumpukan stress batuan bawah permukaan mengikuti pergeseran lempeng tektonik pada bidang batas antar lempeng (Widiyantoro *et al.*, 2020). Peluang terjadi gempa besar pada daerah yang relatif jarang mengalami kegempaan biasa disebut sebagai ‘seismic gap’ (McCann *et al.*, 1979).

Gambar 7 merepresentasikan peta distribusi spasial untuk a -value wilayah Sumatera Barat periode 2007-2019, di mana a -value menunjukkan seismisitas suatu wilayah

(Han *et al.*, 2015). Rentang variasi a -value pada peta tersebut digambarkan dengan perbedaan warna, di mana warna biru menunjukkan a -value yang relatif rendah, sedangkan semakin merah maka a -value relatif lebih tinggi. Sama seperti penjelasan sebelumnya pada bagian barat daya lepas pantai Sumatera Barat didominasi oleh warna biru dengan a -value antara 5,0-8,0. Hal ini mengindikasikan wilayah tersebut memiliki potensi gempa berkekuatan besar akibat akumulasi stress yang tinggi pada batuan bidang patahan dalam jangka waktu yang relatif lama. Sedangkan untuk wilayah lain terutama selatan Kepulauan Mentawai didominasi oleh warna kuning hingga merah dengan rentang a -value antara 9,0-12,0. Hal ini berarti wilayah ini memiliki potensi gempa berkekuatan kecil hingga sedang akibat akumulasi stress pada batuan bidang patahan dalam jangka waktu yang relatif singkat.



Gambar 7. Peta distribusi spasial a -value wilayah Sumatera Barat selama kurun waktu 2007-2019.

Peta distribusi spasial b -value dan a -value wilayah Sumatera Barat tahun 2007-2019 didominasi oleh wilayah dengan b -value sekitar 0,6-0,8 dan a -value sekitar 5,0-8,0. Wilayah dengan karakteristik b -value dan a -value yang relatif rendah biasanya berada di dekat pada zona subduksi sumber pemicu *interplate earthquakes*. Oleh karena itu, dengan stress batuan yang tinggi serta akumulasi stress batuan dalam jangka waktu yang lama maka Sumatera Barat termasuk dalam wilayah yang berpotensi mengalami gempa dengan M_w relatif besar. Hal ini memberi informasi penting untuk studi mitigasi bencana gempa di wilayah tersebut.

Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang berada di Lempeng Eurasia dan berinteraksi dengan Lempeng Indo-Australia. Interaksi antar lempeng yang paling intens terjadi di bagian barat dan selatan Kepulauan Indonesia yang membentuk Busur Sunda, membentang dari Andaman, Kepulauan Nicobar, barat daya Sumatera, hingga Jawa dan Nusa Tenggara (Harjono dkk.,

2017). Hal ini karena perbedaan densitas lapisan batuan pembentuk lempeng tektonik, di mana perbedaan densitas lapisan batuan berkaitan dengan perbedaan umur batuan.

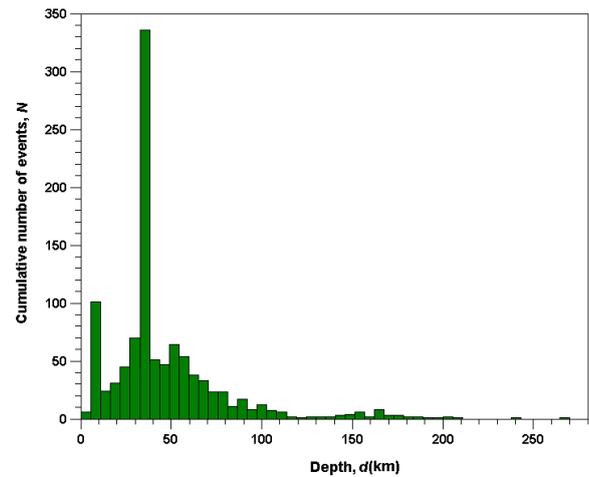
Lempeng Indo-Australia dengan densitas yang lebih tinggi relatif dari densitas Lempeng Eurasia akan menunjam ke bawah Lempeng Eurasia. Saat penunjaman berlangsung maka friksi terjadi sepanjang zona penunjaman. Akumulasi friksi adalah temperatur permukaan lempeng sepanjang zona penunjaman meningkat, menyebabkan lempeng yang tertunjam meleleh diikuti penurunan densitas sehingga Lempeng Indo-Australia semakin menunjam ke bawah Lempeng Eurasia.

Pada zona subduksi, ketika tumbukan antar lempeng terjadi maka akan terjadi transfer momentum dan energi seismik yang memicu variasi tekanan batuan kerak bumi dan mengakibatkan terjadinya dislokasi batuan yang berujung pada pembentukan zona patahan (Stein and Wysession, 2003). Pada peristiwa tumbukan antar lempeng Indo-Australia dan Eurasia menghasilkan barisan pegunungan dari bagian utara Pulau Sumatera hingga Kepulauan Nusa Tenggara serta membentuk segmen sesar aktif di daratan Sumatera yaitu *Sumatran Fault Zone* (SFZ) yang membentang dari Aceh hingga Selat Sunda. Segmen sesar aktif yang melintasi wilayah Sumatera Barat antara lain, segmen Sumpur-Sianok-Sumani, segmen Suliti-Siulak. Selain itu, terdapat sesar Mentawai sebagai *back-arc thrust* yang melintasi wilayah selatan Sumatera Barat hingga mencapai Sumatera Selatan (Irsyam dkk, 2017). Zona subduksi dan *hot-spot area* merupakan bukti bahwa aktivitas seismo-tektonik di Pulau Sumatera dipicu oleh dua sumber, yaitu *interplate and intraplate earthquakes*.

Interplate earthquakes merupakan pelepasan energi seismik dengan kekuatan sebesar $M_w \geq 7,0$ sebagai akibat dari aktivitas zona subduksi dengan kedalaman gempa lebih dari 70 km hingga ratusan kilometer (Kanamori, 1977; Pardo *et al.*, 2002). Berdasarkan Stein and Wysession (2003), mekanisme gempa yang terjadi pada zona subduksi adalah *thrust-faulting* sedangkan pada zona patahan adalah *strike-slip* atau *normal-faulting*. *Intraplate earthquakes* merupakan pelepasan energi seismik dengan kekuatan sebesar $M_w \leq 6,5$ sebagai akibat dari aktivitas seismik sepanjang bidang patahan dengan kedalaman gempa kurang dari 70 km atau sumber pemicu gempa dangkal (Hammed, 2012; Kolawe *et al.*, 2017).

Berdasarkan penjelasan tersebut di atas, penentuan kedalaman pusat gempa sangat mempengaruhi klasifikasi sumber gempa. Oleh karena itu, dengan menggunakan aplikasi ZMAP6.0 Gambar 8 diperoleh yang bermanfaat untuk menggambarkan histogram distribusi kedalaman pusat atau hiposenter gempa di wilayah Sumatera Barat. Terlihat bahwa wilayah Sumatera Barat didominasi oleh gempa dengan kedalaman ≤ 70 km (gempa dangkal). Gempa dangkal relatif lebih sering terjadi daripada gempa dengan kedalaman ≥ 70 km (gempa dalam) yang biasa ditemui

pada kasus *interplate earthquakes* (Pardo *et al.*, 2002; Leyton *et al.*, 2009; Kolawe *et al.*, 2017).



Gambar 8. Diagram batang menunjukkan pola distribusi kedalaman sumber gempa tektonik (hiposenter) wilayah Sumatera Barat pada periode 2007-2019.

Dengan $b = 0,65$ dan $a = 5,28$, maka hal itu berarti wilayah Sumatera Barat memiliki seismisitas yang relatif rendah dibandingkan dengan wilayah Maluku dan Halmahera (Sabtaji, 2020) namun memiliki potensi kegempaan dengan magnitudo besar (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Hal ini memerlukan perhatian khusus ditinjau dari aspek kerentanan wilayah terhadap bencana seismik apalagi statistik gempa di wilayah Sumatera Barat banyak bersumber pada kedalaman dangkal yang bisa memicu dampak bencana yang lebih parah dibandingkan dengan sumber dalam untuk gempa dengan kekuatan yang sama. Proses geologi sepanjang zona subduksi sebelah barat dari pantai barat Pulau Sumatera bisa mempengaruhi aktivitas seismik pada bidang patahan di daratan Pulau Sumatera. Pada saatnya kelak, aktivitas patahan tersebut bisa menjadi sumber gempa *intraplate*. Dengan demikian bisa dikatakan sumber gempa di wilayah Sumatera Barat adalah dominasi proses subduksi yang kompleks di lautan dan diikuti oleh aktivitas patahan di daratan.

PENUTUP

Simpulan

Analisis potensi bahaya bencana seismik di wilayah Sumatera Barat dilakukan dengan menentukan a -value yang mendiskripsikan tingkat seismisitas dan b -value yang mendiskripsikan tingkat akumulasi stres batuan bawah permukaan. Informasi a -value dan b -value didapat melalui distribusi frekuensi-magnitudo gempa berdasarkan hukum Gutenberg-Richter dengan bantuan katalog USGS selama 2007-2019. Pada penelitian ini, metode *maximum likelihood* terbukti lebih reliabel dan akurat daripada metode *least square* di mana menurut *maximum likelihood* b -value = 0,65, a -value = 5,28 dan *annual rate of a-value* = 4,17.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa wilayah Sumatera Barat rentan terhadap bencana gempa dengan tingkat stres batuan relatif tinggi sehingga menyimpan potensi bencana gempa besar terutama pada bagian barat daya, seperti yang ditunjukkan oleh peta distribusi spasial *a*-value dan *b*-value bahwa wilayah tersebut didominasi oleh warna biru tua yang mengindikasikan *a*-value dan *b*-value yang rendah. Kedalaman gempa yang terjadi relatif lebih sering ≤ 70 km (gempa dangkal). Hal ini diakibatkan oleh aktivitas seismik zona patahan lokal Sumatra dan dominasi zona subduksi di perbatasan antara Lempeng India dan Eurasia sepanjang pantai barat Pulau Sumatera.

Saran

Dalam penelitian ini, analisis potensi bahaya bencana seismik hanya menghitung tingkat seismisitas yang diperoleh dari penentuan *a*-value dan *b*-value melalui hukum Gutenberg-Richter tanpa menyertakan faktor kualitas properti dan infrastruktur, kepadatan penduduk, dan tata ruang kota sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk bisa digunakan sebagai *precursor* gempa dengan lebih baik sebagai sistem mitigasi bencana. Meskipun telah dilakukan analisis spasial melalui peta distribusi *a*-value dan *b*-value, namun analisis variasi temporal *b*-value juga diperlukan untuk menentukan prekursor gempa yang lebih akurat dengan magnitudo M_w yang relatif besar di suatu wilayah.

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. 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.
- Asrurifak, M. 2010. *Peta Respon Spektra Indonesia Untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa Berdasarkan Model Gempa Tiga Dimensi Dalam Analisis Probabilitas*. Disertasi: Institut Teknologi Bandung.
- Bird, P. 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, Vol. 4, No. 3, pp.1-52.
- Castellaro, S., Mulargia, F. and Kagan, Y. Y. 2006. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, Vol. 165, Issue 3, pp. 913-930.
- Chasanah, U., Madlazim. and Prastowo, T. 2013. Analisis tingkat seismisitas dan periode ulang Gempa Bumi di Sumatera Barat pada periode 1960-2010. *Jurnal*

Fisika, Vol. 02, No. 02, pp. 1-5.

- 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.
- Das, R., Sharma, M. L. and Wason, H. R. 2019. A seismic moment magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 4, pp. 1542-1555.
- Diantari, H. C., Suryanto, W., Angraini, A., Irnaka, T. M., Susilanto, P. and Ngadmanto, D. 2018. Preliminary magnitude of completeness quantification of improved BMKG catalog (2008-2016) in Indonesian region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 132, No. 012026.
- Gardner, J. K., Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 64, No. 5, pp. 1363–1367.
- Godano, C., Lippiello, E. and de Arcangelis, L. 2014. Variability of the *b*-value in the Gutenberg-Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, 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, magnitudo, 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.
- Harjono, H. 2017. *Seismotektonik Busur Sunda*. pp- 1-142. Jakarta: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).
- Hill, E. M., Borrero, J. C., Huang, Z., Qiu, Q., Banerjee, P., Natawidjaja, D.H., Elosegui, P., Fritz, H.M., Suwargadi, B., Pranantyo, I. R., Li, L., Macpherson, K. A., Skanavis, V., Synolakis, C. E. and Sieb, K. 2012. The 2010 M_w 7,8 Mentawai earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, pp. 1-21.
- 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, pp. 3761-3774.
- 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.
- Kanamori, H. 1977. The Energy Release in Great

- Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 82, No. 20, pp. 2981-2987.
- Kanamori, H. 1983. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, Vol. 93, pp. 185-199.
- Kolawe, F., Atekwana, E. A., Malloy, S., Stamps, D., Gradin., Abdelsalam, M. G., Leseane, K. and Shemang, E. M. 2017. Aeomagnetic, gravity, and Differential Intoferometric 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., Nelson, J. and Hutchinson, G. 1996. Building ductility demand: interpolate versus intraplate earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, pp. 965-985.
- Lamessa, G., Mammo, T. and Raghuvanshi, T. K. 2019. Homogened earthquake catalog and b-value mapping for Ethiopia and its adjoining regions. *Geoenvironmental Disaster*, Vol. 6, No. 16, pp. 1-24.
- Lamontagne, M. 2013. Hypocenter. In: Bobrowsky, P. T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazard*. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht.
- Lange, D., Tilmann, F., Henstock, T., Rietbrock, a., Natawidjaja, D. and Kopp, H. 2018. Structure of the central Sumatran subduction zone revealed by local earthquake travel-time tomography using an amphibious network. *Solid Earth*, Vol. 9, pp. 1035–1049.
- Lee, K. and Yang, W. S. 2006. Hystorical seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp. 846-855.
- Leyton, F., Rui, J., Campos, J. and Kausel, E. 2009. Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction ones: A theoretical and observational comparison. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 175, pp. 37-46.
- Marzocchi, W. and Sandri, L. 2003. A review and new insights on the estimation of the *b*-value and its uncertainly. *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.
- McCaffrey, R. 2009. The tectonic frameworl of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 37, pp. 345-366.
- McCann, W. R., Nishenko, S. P., Sykes, L. R. and Krause, J. 1979. Seismic Gaps and Plate Tectonics: Seismic Potential for Major Boundaries. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 117, pp. 1082-1147.
- 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>.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. and Vining, G. G. 2012. *Introduction to linear regression analysis, Fifth Edition*. pp. 1-679. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Naylor, M., Orfanogiannaki, K. and Harte, D. 2010. Exploratory data analysis: magnitudo, space, and time. *Community Online Resource for Statistikal Seismicity Analysis*, pp. 1-42. Available at <http://www.corssa.org>.
- 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.
- 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.
- Ogata, Y. and Katsura, K. 1993. Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogs. *Geophysical Journal International*, Vol. 113, pp. 727–738.
- Pardo, M., Comte, D. and Monfret, T. 2002. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction one. *Journal of South American Earth Science*, Vol. 32, No. 1, pp. 11-22.
- 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.
- Ratnasari, R. N., Tanioka, Y. and Gusman, A. R. 2020. Determination of source models appropriate for tsunami forecasting: application to tsunami earthquakes in central Sumatra, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, pp. 2551-2562.
- Reasenberg, P. 1985. Second-order moment of Central California Seismicity, 1960–1982. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, pp. 5479–5495.
- 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.
- Salman, R., Lindsey, E. O., Feng, L., Bradley, K., Wei, S., Wang, T., Daryono, M. R. and Hill, E. M. 2020. Structural Controls on Rupture Extent of Recent Sumatran Fault one Earthquakes, Indonesia. *Journal*

- of *Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 125, pp. 1-19.
- Satake, K., Nishimura, Y., Putra, P. S., Gusman, A. R., Sunendar, H., Fujii, Y., Tanioka, Y., Latief, H. and Yulianto, E. 2012. Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 170, pp. 1567-1582.
- 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.
- Scholz, C. H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, pp.399-415.
- Stein, S. and Wysession, M. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing: Malden, MA US. pp. 1-498.
- Syafriani, S. 2018. An Investigation of Seismicity for the West Sumatra Region, Indonesia. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 335, No. 012009.
- Triyoso, W., Suwondo, A., Yudistira, T. and Sahara, D. P. 2020. Seismic Hazard Function (SHF) study of coastal sources of Sumatra Island: SHF evaluation of Padang and Bengkulu cities. *Geoscience Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-7.
- Van Stiphout, T., Zhuang, J. and Marsan, D. 2012. Models and techniques for analyzing seismicity: Seismicity declustering. *Community Online Resource for Statistikal Seismicity Analysis*, pp. 1-25. Available at <http://www.corssa.org>.
- Widiyanto, W., Santoso, P. B., Hsiao, S. C. and Imananta, T. 2019. Post-event field survey of 28 September 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 19, pp. 2781-2794.
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugara, A. D. and Putra, H. E. 2020. Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 15274.
- Wiemer, S. and Benoit, J. P. 1996. Mapping the b-value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones. *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 13, p. 1557-1560.
- Wiemer, S. 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.
- Wiemer, S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol. 72, No. 3, pp. 374-383.
- 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.
- Wyss, M. 1973. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 31, pp. 341-359.