

SEISMISITAS PULAU SUMATERA DAN WILAYAH SEKITARNYA AKIBAT AKTIVITAS SEISMO-TEKTONIK ZONA SUBDUKSI DAN PATAHAN

¹⁾Kayla Choirunnisa, ²⁾Muhammad Nurul Fahmi, ³⁾ Arie Realita

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email:

kaylachoirrunnisa.21049@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seismisitas di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya yang dikenal memiliki aktivitas seismik yang intens akibat kondisi geologi dan tektonik yang kompleks. Analisis dilakukan menggunakan distribusi frekuensi-magnitudo (FMD) untuk mengestimasi tiga parameter seismik M_c , b -value, dan a -value. Data gempa diambil dari katalog ISC-GEM (1924–2024) dengan rentang magnitudo $4,0 \leq M_w \leq 9,5$ dan diolah menggunakan ZMAP7.0 dalam Matlab2018a. Kedalaman sumber gempa diklasifikasikan: *shallow* dan *intermediate sources*. Hasil analisis menunjukkan dominasi gempa dangkal, dengan nilai a tinggi di zona barat (tertinggi di Zona 3: 6,02) yang mencerminkan aktivitas seismik intens. Sebaliknya, zona timur menunjukkan nilai a lebih rendah dan aktivitas yang lebih stabil. Nilai b berkisar antara 0,4–0,9 yang menunjukkan stres tektonik tinggi di wilayah studi. Nilai b yang rendah di zona barat mengindikasikan potensi akumulasi energi seismik yang signifikan dan risiko gempa besar di masa depan. Hubungan antara M_c , b , dan a memberikan gambaran kuantitatif mengenai karakteristik sumber gempa yang relevan untuk pemodelan bahaya seismik berbasis probabilistik. Temuan ini mendukung upaya mitigasi bencana di Pulau Sumatera dengan memberikan dasar ilmiah untuk penentuan prioritas mikrozonasi, penguatan infrastruktur di zona berisiko tinggi, serta penyusunan kebijakan mitigasi seismik yang terarah.

Kata Kunci: Seismisitas Sumatera, Gutenberg-Richter, M_c , b -value, a -value

Abstract

This study aims to analyze the seismicity of Sumatra Island and its surrounding areas, which are known for their intense seismic activity due to complex geological and tectonic conditions. The analysis was conducted using the frequency-magnitude distribution (FMD) to estimate three seismic parameters: M_c , b -value, and a -value. Earthquake data were obtained from the ISC-GEM catalog (1924–2024) with a magnitude range of $4.0 \leq M_w \leq 9.5$ and processed using ZMAP7.0 in Matlab2018a. Earthquake source depths were classified into shallow and intermediate sources. The analysis results show a dominance of shallow earthquakes, with higher a -values in the western zones (highest in Zone 3: 6.02), indicating intense seismic activity. In contrast, the eastern zones exhibit lower a -values and more stable seismic behavior. The b -values range from 0.4 to 0.9, reflecting high tectonic stress across the study area. Low b -values in the western zones suggest significant seismic energy accumulation and potential for large future earthquakes. The relationship between M_c , b , and a provides a quantitative description of earthquake source characteristics that are relevant for probabilistic seismic hazard modeling. These findings support disaster mitigation efforts in Sumatra by providing a scientific basis for determining microzonation priorities, strengthening infrastructure in high-risk zones, and formulating targeted seismic mitigation policies.

Keywords: Sumatra seismicity, Gutenberg-Richter, M_c , b -value, a -value

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi. Sehingga, rentan terhadap bencana gempa bumi tektonik (Cummins, 2017; Nugraha *et al.*, 2018; Hutchings and Mooney, 2021). Salah satu teritorial di Indonesia yang ditemukan rentan mengalami bencana seismik adalah Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya dengan tatanan tektonik dan geologi yang dipengaruhi oleh keberadaan zona subduksi dan sistem patahan aktif (Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2002; McCaffrey, 2009; Weller *et al.*, 2012; Irsyam dkk., 2017; Gui *et al.*, 2019; Triyoso *et al.*, 2024). Selain kehadiran zona subduksi di sepanjang pantai barat Pulau Sumatera, kerentanan wilayah ini dipengaruhi oleh keberadaan jalur patahan aktif di daratan yang dikenal sebagai Patahan Besar Sumatera yang memanjang dari utara (Ito *et al.*, 2012; Muzli *et al.*, 2018; Rafie *et al.*, 2019) melewati bagian tengah (Sahara *et al.*, 2018) sampai selatan Pulau Sumatera (Natawidjaja *et al.*, 2017). Selain itu, di dekat Palung Sumatera terdapat busur muka Sumatera yang muncul sebagai Patahan Mentawai (Singh *et al.*, 2010; Wiseman *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012) yang juga menjadi sumber gempa di kawasan tersebut.

Ketiga sumber potensial pemicu bencana gempa bumi tektonik (zona subduksi, busur muka, dan Patahan Besar Sumatera) mengancam wilayah pesisir dan daratan dari ujung utara sampai selatan Sumatera (Natawidjaja *et al.*, 2017; Gunawan *et al.*, 2018; Rafie *et al.*, 2019; Ratnasari *et al.*, 2020; Salman *et al.*, 2020; Triyoso *et al.*, 2020). Tatanan geologi dan tektonik Sumatera didominasi oleh konvergensi lempeng, di mana lapisan litosfer Samudera Hindia menunjam ke arah utara-timur di bawah mikro Lempeng Sunda (Bradley *et al.*, 2017; Lange *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019). Tumbukan antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia menghasilkan deretan patahan aktif yang memanjang sejajar dengan Pulau Sumatera dan kemudian bersatu menjadi Patahan Besar Sumatera (Daryono and Tohari, 2016; Salman *et al.*, 2020). Patahan Besar Sumatera tersebut membagi Pulau Sumatera menjadi dua bagian, yaitu bagian barat yang lebih sempit, membentang sepanjang Pegunungan Bukit Barisan dari Laut Andaman hingga Teluk Semangko (Sieh and Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2002) dan bagian timur yang lebih luas dengan kondisi tektonik yang relatif lebih stabil.

Keberadaan 3 sumber gempa di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya memicu gempa tektonik dengan kekuatan magnitudo dari sedang $M_w \sim 6$ hingga kuat $M_w \sim 8$ (Ito *et al.*, 2012; Weller *et al.*, 2012; Natawidjaja *et al.*, 2017; Gunawan *et al.*, 2018; Haridhi *et al.*, 2018; Rafie *et al.*, 2019; Triyoso *et al.*, 2020; Kusumawati *et al.*, 2021). Bencana seismik ini menyebabkan banyak korban jiwa di daerah terdampak dengan populasi padat dan menimbulkan kerusakan yang signifikan pada struktur fisik (Suppasri *et al.*, 2015; Cummins, 2017; Rusydy *et al.*, 2020). Dengan mempertimbangkan hal di atas, maka pengetahuan tentang seismisitas di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya sangat diperlukan sebagai salah satu upaya untuk mereduksi risiko bencana serupa di masa yang akan datang.

Studi seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik di suatu wilayah dapat dilakukan melalui penentuan parameter seismik b -value dan a -value (Ashadi *et al.*, 2015; Marzocchi *et al.*, 2016; Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Rigo *et al.*, 2018; Amaro Mellado and Bui, 2020). Selain kedua parameter tersebut, variasi spasial dan variasi temporal b -value (Hong *et al.*, 2020; Zhu, 2021) merupakan parameter yang juga sering digunakan sebagai prekursor gempa bumi tektonik (Prasad and Singh, 2015; Hui *et al.*, 2021). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengkaji seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya melalui analisis parameter b -value dan a -value. Selain kedua parameter tersebut, parameter lain yang relevan (M_c) turut dipertimbangkan. Dalam memperoleh hasil yang lebih terperinci, wilayah penelitian dibagi menjadi enam zona seismik guna menganalisis variabilitas b -value serta pola seismisitas di setiap zona.

B. Hukum Gutenberg-Richter

Level seismisitas suatu wilayah dapat ditentukan melalui persamaan FMD dari persamaan Gutenberg-Richter (1944) sebagai berikut:

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

di mana N adalah jumlah kejadian gempa dengan $M \geq M_c$ di suatu wilayah selama periode tertentu (Amaro-Mellado and Bui, 2020). Dalam hal ini, M_c (*magnitude of completeness*) merupakan batas bawah magnitudo terkecil di mana data gempa dianggap lengkap dan persamaan Gutenberg-Richter berlaku valid (Mignan and Woessner, 2012; Han *et al.*, 2015). Nilai a dan b adalah parameter yang relevan dengan kerentanan wilayah terhadap potensi bahaya bencana seismik. Secara umum, a menggambarkan level seismisitas suatu wilayah yang besarnya bergantung pada luas wilayah, periode, dan magnitudo terbesar (Han *et al.*, 2015; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Sedangkan b adalah rasio jumlah gempa kecil relatif terhadap jumlah gempa besar yang menunjukkan level stres batuan bawah permukaan (Scholz, 2015; Yeken, 2016; Rigo *et al.*, 2018).

Dalam penelitian ini, nilai parameter a dan b dihitung menggunakan pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965) dengan bantuan aplikasi ZMAP7.0 (Reyes and Wiemer, 2019) untuk analisis statistik gempa di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya. Sebelum menghitung parameter tersebut, nilai M_c harus ditentukan secara tepat. Jika estimasi M_c terlalu tinggi, maka sampel data gempa akan berkurang sehingga mengurangi keakuratan analisis. Sebaliknya, jika M_c terlalu rendah, maka nilai a dan b akan menyimpang jauh dari nilai sebenarnya (Mignan, 2012; Mignan and Woessner 2012). Metode estimasi M_c yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik data gempa (Woessner and Wiemer, 2005).

C. Pendekatan Maximum Likelihood

Pendekatan Maximum Likelihood (Aki, 1965) merupakan metode statistik yang umum digunakan untuk mengestimasi a dan b dalam persamaan Gutenberg-Richter berdasarkan probabilitas maksimal (Mignan and Woessner, 2012). Metode ini memiliki keunggulan dalam mengurangi ketidakpastian estimasi dibandingkan metode lainnya, sehingga menghasilkan nilai parameter yang lebih akurat dan andal (Nava *et al.*, 2017; Amaro-Mellado and Bui, 2020). Metode maximum likelihood didasarkan pada asumsi bahwa statistik gempa mengikuti distribusi eksponensial (Scholz, 2015; Amaro-Mellado *et al.*, 2017), dengan estimasi b dapat diperoleh melalui persamaan Utsu (1966),

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

Parameter a dapat dihitung menggunakan rumus:

$$a = \log N + \log(b \ln 10) + M_c b \quad (3)$$

Akurasi estimasi parameter a bergantung pada ketepatan perhitungan parameter b dan M_c (Mignan and Woessner, 2012; Amaro-Mellado and Bui, 2020).

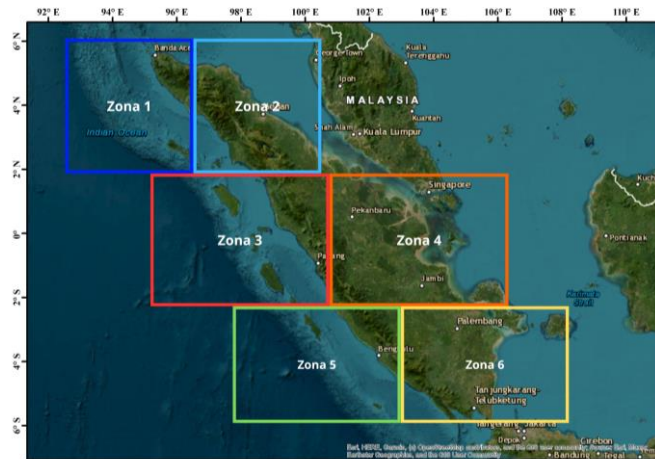
II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat seismisitas dan stres batuan bawah permukaan di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya akibat aktivitas seismik zona subduksi dan patahan. Data gempa diperoleh melalui katalog ISC-GEM antara tahun 1924–2024 dengan kekuatan magnitudo $4,0 \leq M_w \leq 9,5$ dan kedalaman mencapai > 300 km. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan ZMAP7.0 dan Matlab2018a untuk estimasi parameter M_c , b -value, dan a -value dengan pendekatan *maximum likelihood* (Aki, 1965). Pendekatan ini dipilih karena memberikan estimasi parameter yang lebih konsisten dibandingkan metode regresi linier sederhana, terutama pada distribusi data gempa yang tidak homogen. Metode MAXC juga diterapkan untuk memastikan akurasi M_c , b -value, dan a -value (Woessner and Wiemer, 2005; Mignan and Woessner, 2012).

Teknik Uhrhammer (1986) diterapkan dalam penelitian ini untuk menjamin kemurnian data *mainshocks* dengan menghapus data *foreshocks* dan *aftershocks*. Analisis seismisitas memanfaatkan distribusi frekuensi-

magnitudo (FMD) gempa yang memenuhi persamaan Hukum Gutenberg-Richter (1944) dan Utsu (1966). Wilayah penelitian dalam studi mencakup Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya yang dibagi menjadi enam zona seismik berdasarkan lokasi geografis dan karakteristik seismo-tektonik. Keenam zona ini mencakup wilayah daratan serta area lepas pantai yang dipengaruhi oleh aktivitas tektonik zona subduksi dan patahan lokal. Pembagian zona penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



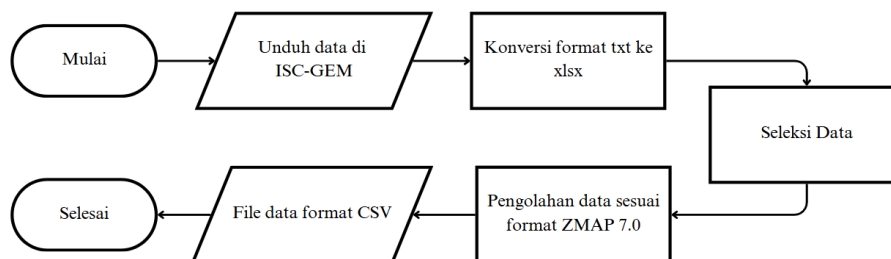
Gambar 1. Peta zonasi seismik Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya (gambar dibuat dengan bantuan aplikasi ArcMap 10.8)

B. Variabel Operasional Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel manipulasi adalah magnitudo momen gempa M_w , sedangkan variabel respons adalah frekuensi kejadian N atau $\log N$. Variabel kontrol adalah metode perhitungan M_c , b -value, dan a -value berbasis maximum likelihood (Aki, 1965) melalui pemberlakuan persamaan Gutenberg-Richter (1944) dan Utsu (1966) di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian merupakan data sekunder berupa data gempa di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya yang diperoleh dari katalog ISC-GEM yang dapat diakses melalui laman (<https://www.isc.ac.uk/iscgem/>) pada rentang tahun 1924–2024 dengan kriteria magnitudo $4,0 \leq M_w \leq 9,5$. Data tersebut diklasifikasikan berdasarkan variasi kedalaman sumber gempa: *shallow sources* (0–70 km), *intermediate sources* (70–300 km) dan *deep sources* (> 300 km). Selanjutnya, data *foreshocks* dan *aftershocks* dihapus menggunakan filter Uhrhammer (Uhrhammer, 1986) untuk meningkatkan level akurasi M_c , b -value, dan a -value (Amaro-Mellado *et al.*, 2017). Flowchart pengumpulan data dapat dilihat pada Gambar 2.



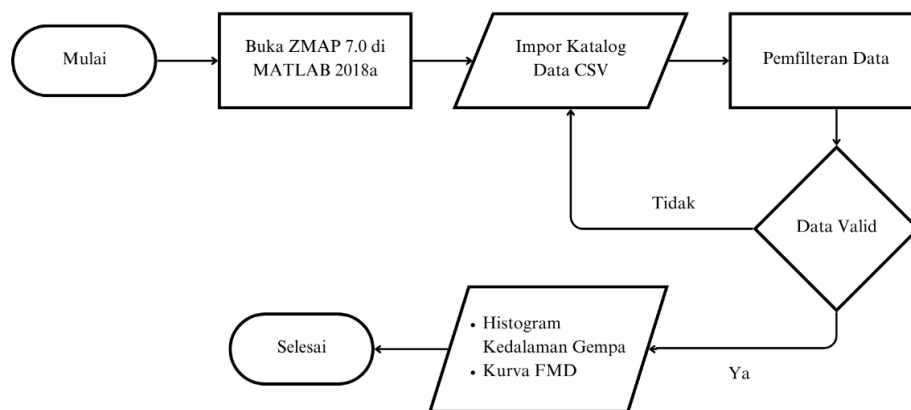
Gambar 2. Flowchart pengumpulan data

D. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan pada keenam zona seismik, yaitu Zona 1 dan 2 yang mencakup wilayah utara Sumatera, Zona 3 dan Zona 4 yang mencakup wilayah tengah Sumatera, serta Zona 5 dan Zona 6 yang mencakup wilayah selatan Sumatera. Seluruh data sampel diunduh melalui katalog ISC-GEM dan disimpan

dalam format file.csv. Dengan bantuan *spreadsheet*, data gempa yang memiliki magnitudo selain magnitudo momen dikonversi menjadi M_w sesuai dengan persamaan konversi dari Irsyam dkk. (2017). Selanjutnya, data diatur sesuai format yang ditentukan oleh ZMAP7.0 yaitu *longitude, latitude, year, month, day, magnitude, depth, hour, dan minute*. Tahap selanjutnya adalah menyimpan data dalam format file.dat sebagai input dalam program aplikasi ZMAP7.0 dengan bantuan Matlab2018a.

Setelah proses penapisan Uhrhammer (1986), data kemudian diolah kembali menggunakan ZMAP7.0 untuk menghasilkan output berupa kurva FMD (dengan estimasi M_c , b -value, dan a -value) dan histogram variasi kedalaman gempa. Output yang dihasilkan dari masing-masing zona seismik dianalisis untuk memperoleh informasi yang komprehensif mengenai seismisitas dan potensi bahaya bencana seismik di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya. Flowchart pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart pengolahan data

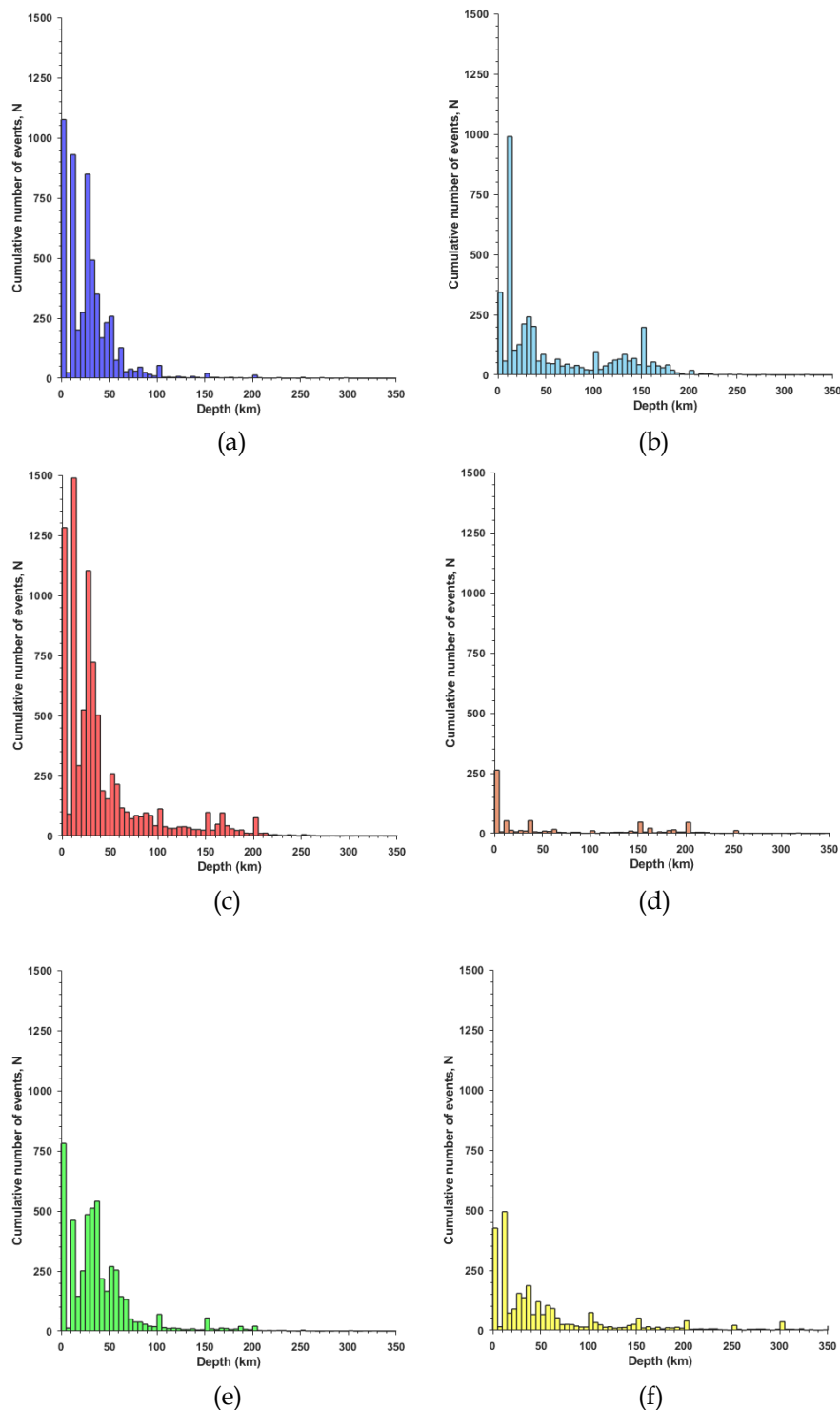
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil analisis seismisitas Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya berdasarkan keluaran pemrosesan data menggunakan perangkat lunak ZMAP7.0. Analisis difokuskan pada dua aspek utama, yaitu: (1) histogram kedalaman sumber gempa, dan (2) kurva distribusi frekuensi-magnitudo (FMD) untuk estimasi parameter seismik M_c , b -value, dan a -value. Seluruh hasil disusun berdasarkan enam zona seismik yang telah dibagi sesuai karakteristik tektonik regional. Histogram digunakan untuk menggambarkan pola distribusi kedalaman gempa, sedangkan kurva FMD memberikan informasi terkait hubungan antara frekuensi kejadian gempa dengan magnitudo serta untuk mengetahui tingkat seismisitas wilayah studi.

A. Histogram Kedalaman Sumber Gempa

Histogram kedalaman sumber gempa dimanfaatkan untuk memetakan serta menggambarkan distribusi frekuensi kejadian gempa berdasarkan variasi kedalaman sumbernya pada suatu wilayah tertentu. Analisis ini memberikan gambaran visual mengenai seberapa sering gempa terjadi pada rentang kedalaman tertentu, sehingga memudahkan interpretasi pola aktivitas seismik di wilayah penelitian. Gambar 4 di bawah ini menyajikan pola distribusi kedalaman sumber gempa yang teridentifikasi di Pulau Sumatera beserta wilayah sekitarnya, dengan pembagian yang dikelompokkan ke dalam enam zona seismik utama yang telah ditentukan sebelumnya sebagai dasar analisis.

Gambar 4. menunjukkan bahwa gempa dangkal (*shallow events*) dengan kedalaman <70 km mendominasi di seluruh zona seismik. Temuan ini sejalan dengan Hutchings and Mooney (2021) yang mencatat bahwa gempa dangkal mendominasi (~80%) kejadian gempa tektonik di Indonesia. Hal ini wajar terjadi, mengingat sebagian besar aktivitas seismik dipicu oleh *interplate earthquake* pada zona subduksi aktif (McCaffrey, 2009; Hill *et al.*, 2012; Simoes *et al.*, 2013). Selain itu, aktivitas pada Patahan Mentawai serta *intraplate earthquake* yang bersumber dari Patahan Besar Sumatera turut berkontribusi pada pola seismisitas di wilayah ini (Collings *et al.*, 2012; Weller *et al.*, 2012).



Gambar 4. Histogram kedalaman sumber terhadap jumlah kejadian gempa N untuk (a) Zona 1; (b) Zona 2; (c) Zona 3; (d) Zona 4; (e) Zona 5; (f) Zona 6

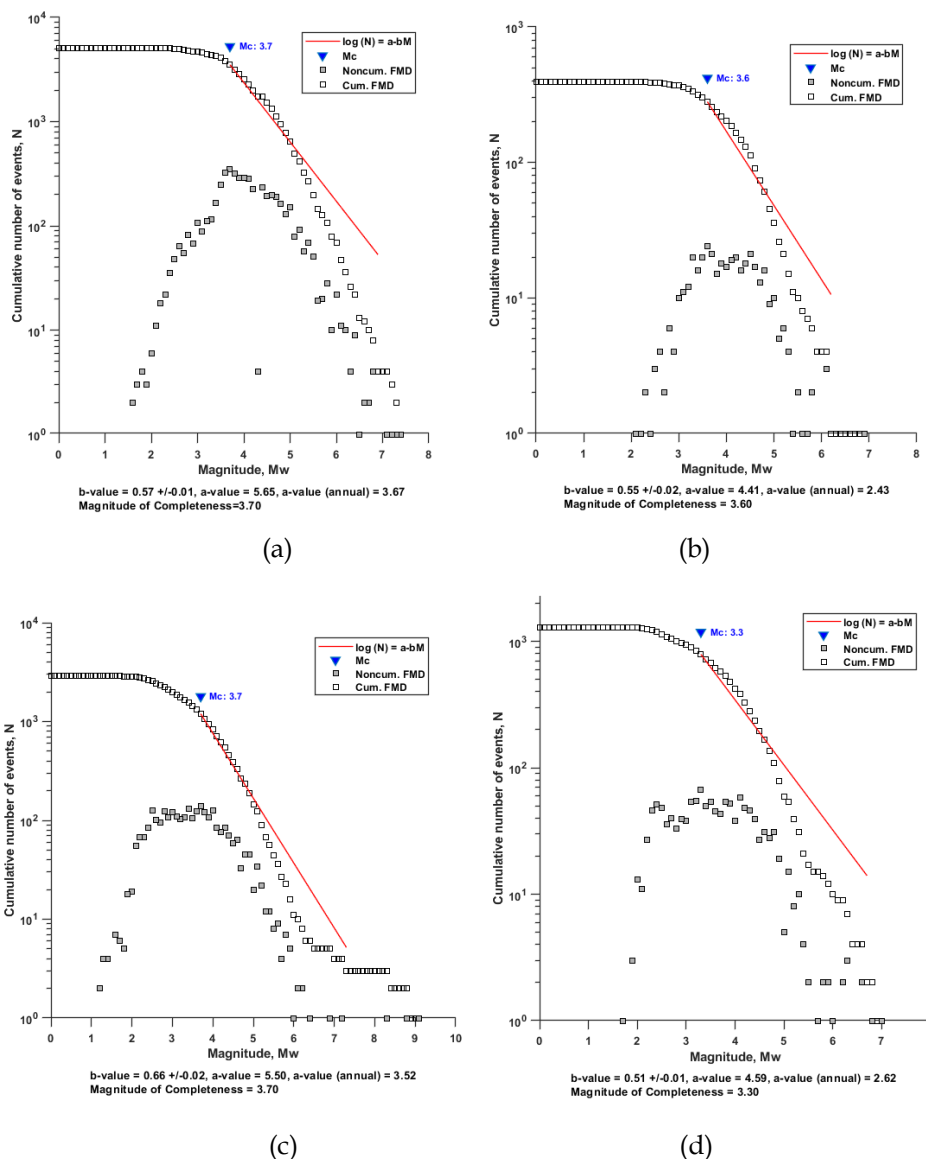
Pada Zona 1, Zona 3, dan Zona 5 didominasi oleh gempa kedalaman dangkal dengan puncak distribusi pada rentang 0–30 km. Pola ini mengindikasikan adanya aktivitas tektonik aktif di kerak atas yang umumnya berkaitan dengan sistem patahan dan zona subduksi dangkal (McCaffrey, 2009; Gunawan *et al.*, 2018). Zona 2 memperlihatkan pola serupa, namun dengan sebaran yang lebih landai menunjukkan variasi kedalaman yang lebih luas. Zona 4 menunjukkan konsentrasi utama pada kedalaman dangkal dengan kejadian tersebar secara sporadis hingga kedalaman menengah. Zona 6 menunjukkan pola distribusi bimodal, yaitu memiliki dua

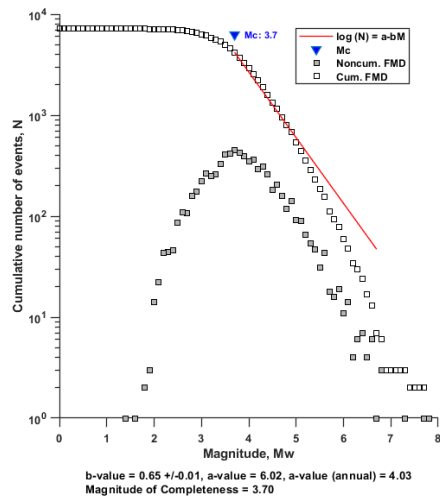
puncak frekuensi kedalaman gempa: puncak utama (0-20 km) dan puncak sekunder (120-160 km) yang mencerminkan aktivitas ganda dari gempa subduksi dangkal dan gempa dalam akibat slab yang tersubduksi lebih dalam, sebagaimana dijelaskan oleh penelitian Špičák *et al.* (2007) dan Nugraha *et al.* (2018) bahwa wilayah ini berada pada zona transisi dari subduksi Sumatera dan Jawa.

Secara kuantitatif, sekitar 82% kejadian gempa terjadi di kedalaman <70 km (*shallow sources*), 17% pada kedalaman 70–300 km (*intermediate sources*), dan kurang dari 1% merupakan kedalaman >300 km (*deep sources*). Sebaran ini mengonfirmasi dominasi zona seismik dangkal di wilayah studi yang juga selaras dengan hasil kurva FMD yang akan dibahas pada subbab 4.2, dimana nilai b dan a cenderung lebih tinggi pada kategori *shallow sources*. Hal ini memperkuat bahwa gempa dangkal merupakan sumber utama aktivitas seismik di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya (Nugraha *et al.*, 2018; Hutchings and Mooney, 2021).

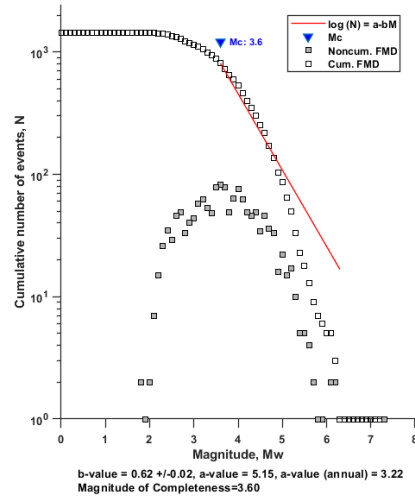
B. Kurva FMD

Kurva distribusi frekuensi-magnitudo (FMD) digunakan untuk memperoleh parameter seismik M_c , b , dan a yang penting dalam memahami karakteristik seismisitas di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya. Gambar 5 menampilkan plot kurva FMD yang berisi hasil perhitungan nilai a -value yang merepresentasikan level seismisitas wilayah studi (Rigo *et al.*, 2018; Amaro-Mellado and Bui, 2020), serta b -value yang mengindikasikan tingkat stres batuan bawah permukaan (Tormann *et al.*, 2014; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Selain itu, kurva FMD juga menyajikan nilai M_c untuk setiap kategori kedalaman, serta nilai a (*annual*) yang menggambarkan level seismisitas tahunan selama periode pengumpulan data.

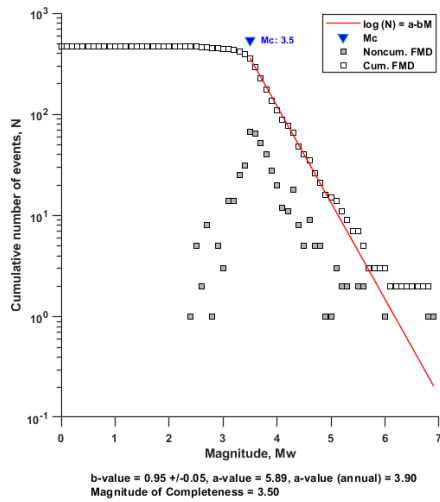




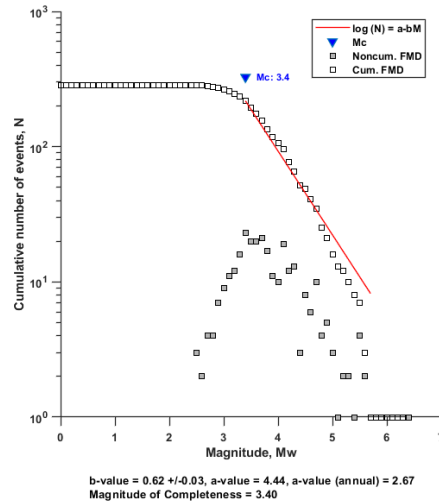
(e)



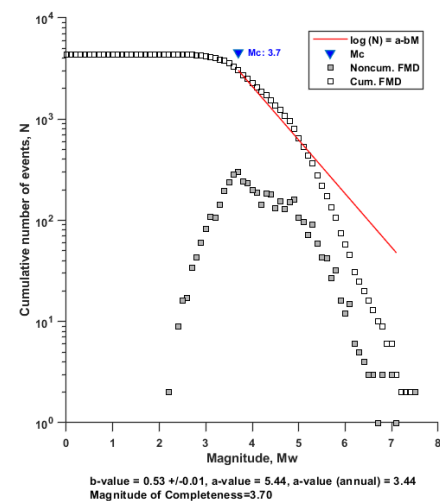
(f)



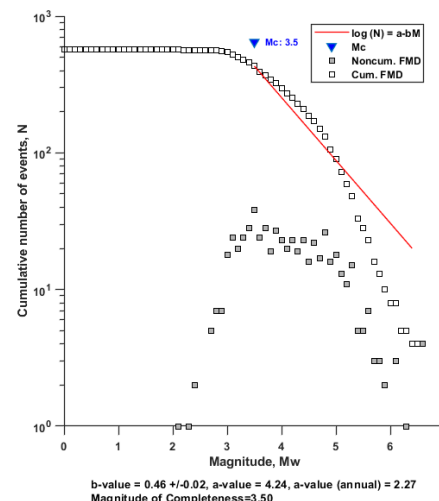
(g)



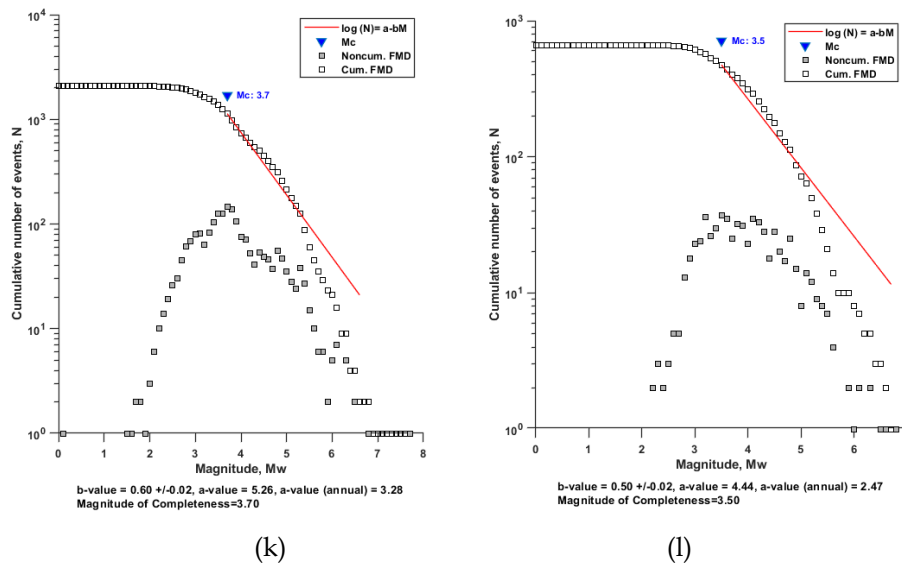
(h)



(i)



(j)



Gambar 5. Plot kurva FMD berisi estimasi nilai M_c , b -value, dan a -value untuk (a) Zona 1: *shallow sources*; (b) Zona 1: *intermediate sources*; (c) Zona 2: *shallow sources*; (d) Zona 2: *intermediate sources*; (e) Zona 3: *shallow sources*; (f) Zona 3: *intermediate sources*; (g) Zona 4: *shallow sources*; (h) Zona 4: *intermediate sources*; (i) Zona 5: *shallow sources*; (j) Zona 5: *intermediate sources*; (k) Zona 6: *shallow sources*; (l) Zona 6: *intermediate sources*.

Setiap kurva pada Gambar 5 menunjukkan pola penurunan logaritmik jumlah kejadian gempa seiring dengan meningkatnya magnitudo. Zona bagian barat Sumatera (Zona 1, 3, dan 5) menunjukkan pola kurva yang relatif lebih landai disertai nilai b -value yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan dominasi kejadian gempa bermagnitudo besar dan akumulasi stres tektonik yang tinggi (Tormann *et al.*, 2014; Rafie *et al.*, 2019). Sebaliknya, zona bagian timur Sumatera (Zona 2, 4, dan 6) menunjukkan kurva lebih curam dengan nilai b lebih tinggi yang mencerminkan dominasi gempa kecil dan kondisi tektonik yang stabil (Sahara *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019; Rafie *et al.*, 2019). Perbedaan karakteristik ini menegaskan pola seismik di zona barat Sumatera secara tektonik lebih aktif dan menyimpan potensi gempa besar yang lebih signifikan dibandingkan zona timur Sumatera (Hutchings and Mooney, 2021).

Kategori *deep sources* tidak disertakan dalam analisis lebih lanjut karena gempa kedalaman >300 km umumnya tidak mempengaruhi deformasi kerak atas yang berkaitan langsung dengan potensi bahaya permukaan. Aktivitas seismik di zona subduksi Sumatera juga lebih didominasi oleh kedalaman dangkal hingga menengah yang berhubungan dengan deformasi kerak atas (Nugraha *et al.*, 2018; McCaffrey, 2009). Selain itu, karakteristik fisik dan mekanisme sumber gempa dalam kurang representatif untuk evaluasi seismisitas lokal (Warren *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2021). Sebagai contoh, gempa dalam pada 19 September 2019 (M_w 6,0) dengan kedalaman 620 km di bawah Laut Jawa menunjukkan bahwa meskipun gempa dalam memiliki energi besar, gempa tersebut tidak cukup kuat untuk menyebabkan deformasi yang mempengaruhi permukaan. Untuk mempermudah analisis kurva FMD pada Gambar 5, berikut disajikan hasil perhitungan tiga parameter seismik pada masing-masing zona, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.1–4.6.

Tabel 1. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 1.

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,70	0,57	5,65
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-300 km)	3,60	0,55	4,41

Tabel 2. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 2.

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,70	0,66	5,50
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-300 km)	3,30	0,51	4,59

Tabel 3. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 3.

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,70	0,65	6,02
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-300 km)	3,60	0,62	5,15

Tabel 4. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 4.

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,50	0,95	5,89
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-300 km)	3,40	0,62	4,44

Tabel 5. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 5.

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,70	0,53	5,44
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-300 km)	3,50	0,46	4,24

Tabel 6. Nilai ketiga parameter seismik untuk Zona 6.

No	Kedalaman Sumber Gempa	Parameter Seismik		
		M_c	b	a
1	<i>Shallow Sources</i> (0-70 km)	3,70	0,60	5,26
2	<i>Intermediate Sources</i> (70-300 km)	3,50	0,50	4,44

Tabel 4.7–4.12 menyajikan nilai parameter seismik M_c , b , dan a untuk keenam zona seismik, baik pada kategori *shallow sources* maupun kategori *intermediate sources*. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai b -value dan a -value cenderung lebih tinggi pada kategori *shallow* dibandingkan dengan *intermediate* yang mengindikasikan aktivitas seismik di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya didominasi gempa dangkal yang umumnya berkaitan dengan dinamika tektonik di bagian atas kerak bumi (Nugraha *et al.*, 2018; Hutchings and Mooney, 2021). Selain itu, hal ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa zona kerak atas lebih aktif secara seismik dan berkontribusi langsung terhadap potensi bahaya permukaan (Aki and Richards, 2002; Gunawan *et al.*, 2018).

Nilai M_c yang diperoleh pada enam zona seismik berada di rentang 3,3–3,7 mencerminkan tingkat konsistensi yang baik antar zona. Konsistensi ini mengindikasikan bahwa data gempa dengan magnitudo di atas nilai tersebut tercatat secara andal dan seragam, sehingga dapat dijadikan dasar yang valid untuk analisis parameter seismik (Han *et al.*, 2015; Mignan and Woessner, 2012; Nava *et al.*, 2017). Keandalan estimasi nilai

M_c sangat penting untuk menjamin ketepatan estimasi parameter b dan a dalam Hukum Gutenberg-Richter (Mignan, 2012; Mignan and Woessner 2012).

Zona barat Sumatera (Zona 1, 3, dan 5) memiliki nilai a lebih tinggi, terutama pada kedalaman dangkal di Zona 3 (6,02), diikuti oleh Zona 1 (5,65) dan Zona 5 (5,44). Kondisi ini mencerminkan aktivitas seismik yang intens di wilayah tersebut (Collings *et al.*, 2017; Bradley *et al.*, 2017). Aktivitas ini dipengaruhi oleh tiga sumber utama deformasi tektonik, yaitu zona subduksi, busur muka, dan Patahan Besar Sumatera (Rafie *et al.*, 2019; Ratnasari *et al.*, 2020; Triyoso *et al.*, 2020). Zona subduksi sebagai sumber utama gempa besar *interplate* (Lay and Ye, 2018), sementara busur muka sebagai Patahan Mentawai berperan dalam sistem *backthrust* yang sering menghasilkan gempa dangkal (Singh *et al.*, 2010; Mukti *et al.*, 2012), serta Patahan Besar Sumatera yang membentang di daratan Pulau Sumatera juga turut berkontribusi dalam meningkatkan kompleksitas dan seismisitas di zona barat maupun zona timur (Ito *et al.*, 2012; Weller *et al.*, 2012; Sahara *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019; Salman *et al.*, 2020).

Sebaliknya, zona timur Sumatera (Zona 2, 4, dan 6) menunjukkan nilai a (4,44–4,59) relatif lebih rendah, terutama di kedalaman menengah mencerminkan tingkat seismisitas yang rendah akibat frekuensi kejadian gempa yang lebih jarang (Ashadi *et al.*, 2015; Haridhi *et al.*, 2018). Meski demikian, wilayah ini tetap dipengaruhi oleh aktivitas Patahan Besar Sumatera, terutama Zona 2 dan Zona 4 yang dekat dengan segmen aktif seperti Renun dan Siulak (Natawidjaja, 2002; Natawidjaja and Triyoso, 2007; Weller *et al.*, 2012). Sementara itu, Zona 6 juga berpotensi mengalami deformasi *intraplate* akibat aktivitas segmen selatan dari Patahan Besar Sumatera, seperti segmen Semangko, serta interaksi dengan zona subduksi di barat daya Sumatera (McCaffrey, 2009; Muzli *et al.*, 2018).

Nilai b pada keenam zona seismik berada dalam rentang $\approx 0,4$ – $0,9$ yang mengindikasikan struktur batuan bawah permukaan mengalami stres tektonik yang tinggi (Tormann *et al.*, 2014; Prasad and Singh, 2015; Scholz, 2015; Yeken, 2016). Secara umum, zona timur Sumatera menunjukkan nilai b yang lebih tinggi, terutama pada kedalaman dangkal di Zona 4 ($b = 0,95$), diikuti oleh Zona 2 ($b = 0,66$) dan Zona 6 ($b = 0,60$) yang mencerminkan heterogenitas batuan tinggi dan tingkat akumulasi stres tektonik yang relatif rendah (Bora *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019). Sebaliknya, zona barat Sumatera didominasi oleh nilai b rendah, terutama pada Zona 5 ($b = 0,46$ – $0,53$) dan Zona 1 ($b = 0,55$ – $0,57$) yang mengindikasikan potensi akumulasi energi seismik yang besar. Meskipun Zona 3 memiliki nilai b yang sedikit lebih tinggi ($b = 0,62$ – $0,65$), dominasi nilai rendah di zona bagian barat tetap menegaskan adanya potensi akumulasi energi seismik yang besar (Singh *et al.*, 2010; Dahm *et al.*, 2011; Mukti *et al.*, 2012). Temuan ini juga sejalan dengan Rafie *et al.* (2019) yang melaporkan bahwa nilai b yang relatif rendah ($0,4$ – $0,6$) di sepanjang jalur subduksi Bengkulu.

Secara spasial, zona bagian barat Sumatera (Zona 1, 3, dan 5) yang letaknya berada dekat dengan zona subduksi dan Patahan Mentawai cenderung menunjukkan nilai b yang mencerminkan kompleksitas struktur geologi dan tingginya aktivitas tektonik (Natawidjaja and Triyoso, 2007; McCaffrey, 2009; Collings *et al.*, 2012; Lange *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019). Sebaliknya, zona di bagian timur Sumatera (Zona 2, 4, dan 6) yang letaknya lebih jauh dari sumber deformasi utama, menunjukkan nilai b yang bervariasi dan cenderung dipengaruhi oleh kondisi tektonik yang lebih stabil (McCaffrey, 2009; Sahara *et al.*, 2018; Gui *et al.*, 2019; Salman *et al.*, 2020). Perbandingan hasil penelitian ini konsisten dengan kawasan seismik lain di Indonesia yang menunjukkan kesesuaian pola seismisitas pada zona subduksi aktif. Nilai b -value rendah di segmen barat Sumatera sejalan dengan temuan di zona selatan Jawa hingga Bali–Nusa Tenggara yang mengindikasikan adanya *locked zone* dengan potensi gempa besar dan tsunami (Špičák *et al.*, 2007; Ashadi *et al.*, 2015; Nugraha *et al.*, 2018). Sementara itu, karakter seismisitas yang lebih stabil di zona timur Sumatera sejalan dengan pola *intraplate* di wilayah Kalimantan dan Papua bagian utara yang relatif kurang aktif secara tektonik (Irsyam *et al.*, 2017).

Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting dalam mendukung mitigasi bencana di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya. Zona dengan nilai b -value rendah, seperti segmen Mentawai dan pesisir barat Sumatera, perlu diprioritaskan dalam kebijakan penguatan infrastruktur vital, penyusunan tata ruang berbasis risiko, serta perencanaan jalur evakuasi tsunami. Sementara itu, karakter seismisitas yang lebih stabil di zona *intraplate* timur Sumatera dapat menjadi dasar diferensiasi kebijakan mitigasi antara kawasan pesisir berisiko tinggi dan wilayah daratan. Dengan demikian, penelitian ini dapat berfungsi untuk memperkaya

pemahaman ilmiah tentang dinamika seismotektonik dan landasan ilmiah perumusan strategi pengurangan risiko seismik di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya. Keterkaitan antara parameter M_c , b -value, dan a -value juga memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat seismisitas dan karakteristik sumber gempa di setiap zona, sehingga dapat dijadikan dasar dalam penilaian potensi bahaya seismik secara lebih terperinci.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan analisis parameter a -value dan data gempa (1924–2024), aktivitas seismik di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya didominasi oleh gempa dangkal dengan kedalaman <70 km yang merupakan sumber utama aktivitas seismik. Zona barat Sumatera (Zona 1, 3, dan 5) menunjukkan nilai a lebih tinggi, terutama di Zona 3 (6,02), diikuti Zona 1 (5,65) dan Zona 5 (5,44) yang menandakan tingkat seismisitas lebih intens. Hal ini dipengaruhi oleh aktivitas zona subduksi, busur muka, dan Patahan Besar Sumatera. Sebaliknya, zona timur Sumatera (Zona 2, 4, dan 6) memiliki nilai a lebih rendah, terutama di kedalaman menengah (4,24–4,59) yang mencerminkan aktivitas seismik yang relatif lebih stabil dibanding zona barat. Nilai b -value di seluruh zona seismik berada dalam rentang $\approx 0,4$ – $0,9$ mengindikasikan struktur batuan bawah permukaan mengalami stres tektonik yang relatif tinggi. Secara umum, zona timur menunjukkan nilai b lebih tinggi, terutama pada kedalaman dangkal di Zona 4 ($b = 0,95$), diikuti Zona 2 ($b = 0,66$) dan Zona 6 ($b = 0,60$) mencerminkan tingkat heterogenitas batuan yang tinggi dan akumulasi stres tektonik yang relatif rendah. Sebaliknya, zona barat Sumatera didominasi oleh nilai b yang rendah, terutama di Zona 5 ($b = 0,46$ – $0,53$), serta Zona 1 ($b = 0,55$ – $0,57$) yang mengindikasikan potensi akumulasi energi seismik yang besar. Meskipun Zona 3 memiliki nilai b sedikit lebih tinggi ($b = 0,62$ – $0,65$), dominasi nilai rendah di barat menegaskan potensi energi seismik yang signifikan.

B. Saran

Penelitian lebih lanjut dapat mengintegrasikan analisis temporal terhadap kejadian gempa guna memantau perubahan pola dan intensitas seismisitas dalam jangka waktu yang lebih panjang, sehingga dinamika aktivitas seismik dapat dianalisis secara lebih komprehensif. Selain itu, penggunaan metode lain seperti model numerik atau analisis geofisika lainnya untuk mendalami lebih lanjut hubungan antara stres tektonik dan aktivitas gempa di Pulau Sumatera dan wilayah sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K. 1965. Maximum likelihood estimated of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of Earthquake Research*, Vol. 43, pp. 237–239.
- Amaro-Mellado, J.L., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G. and Martínez-Álvarez, F. 2017. Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, Vol. 717, pp. 449–472.
- Amaro-Mellado, J.L. and Bui, D.T. 2020. GIS-based mapping of seismic parameters for the Pyrenees. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, No. 452, pp. 1–21.
- Ashadi, A.L., Harmoko, U., Yuliyanto, G. and Kaka, S.I. 2015. Probabilistic seismic-hazard analysis for Central Java Province, Indonesia. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 3, pp. 1711–1720.
- Bradley, K.E., Feng, L., Hill, E.M., Natawidjaja, D.H. and Sieh, K. 2017. Implications of the diffuse deformation of the Indian Ocean lithosphere for slip partitioning of oblique plate convergence in Sumatra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, No. 1, pp. 572–591.
- Collings, R., Lange, D., Rietbrock, A., Tilmann, F., Natawidjaja, D., Suwargadi, B., Miller, M., dan Saul, J. 2012. Structure and seismogenic properties of the Mentawai segment of the Sumatra subduction zone revealed by local earthquake travel time tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117, No. B1.
- 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.
- Dahm, T., Tilmann, F., dan Morgan, J.P. 2011. Seismic broadband ocean-bottom data and noise observed on the Mentawai fault zone, offshore Sumatra. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 12, No. 12.

- Daryono, M.R. and Tohari, A. 2016. Surface rupture and geotechnical features of the July 2, 2013 Tanah Gayo earthquake. *Indonesian Journal on Geoscience*, Vol. 3, No. 2, pp. 95–105.
- Gui, Z., Bai, Y., Wang, Z. and Li, T. 2019. Seismic b -value anomalies in the Sumatran region: seismotectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 173, pp. 29–41.
- Gunawan, E., Widiyantoro, S., Rosalia, S., Daryono, M.R., Meilano, I., Supendi, P., Ito, T., Tabei, T., Kimata, F., Ohta, Y. and Ismail, N. 2018. Co-seismic slip distribution of the 2 July 2013 M_w 6.1 Aceh, Indonesia, earthquake and its tectonic implication. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 108, No. 4, pp. 1918–1928.
- Gutenberg, R. and Richter, C.F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 34, pp. 185–188.
- Han, Q., Wang, L., Xu, J., Carpinteri, A. and Lacidogna, G. 2015. A robust method to estimate the b -value of the magnitude-frequency distribution of earthquakes. *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 81, Part A, pp. 103–110.
- Haridhi, H.A., Huang, B.S., Wen, K.L., Denzena, D., Prasetyo, R.A. and Lee, C.S. 2018. A study of large earthquakes sequences in the Sumatra subduction zone and its possible implications. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 29, No. 6, pp. 635–652.
- Hill, E.M., Borrero, J.C., Huang, Z., Qiu, Q., Banerjee, P., Natawidjaja, D.H. and Sieh, K. 2012. The 2010 M_w 7.8 Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117, No. B6.
- Hong, T.K., Park, S., Lee, J. and Kim, W. 2020. Spatiotemporal seismicity evolution and seismic hazard potentials in the western East Sea (Sea of Japan). *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, pp. 3761–3774.
- Hui, C., Cheng, C., Shen, S., Gao, P., Chen, J., Yang, J. and Zhao, M. 2021. The effect of the Wenchuan and Lushan earthquakes on the size distribution of earthquakes along the Longmenshan Fault. *Applied Science*, Vol. 11, No. 8534.
- Hutchings, S.J. and Mooney, W.D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, pp. 1–42.
- Irsyam, M.I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D.H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N.R., Djarwadi, D., Faizal, L. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*, pp. 1–376. Bandung: Penerbit Pusat Studi Gempa Nasional dan Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian PUPR.
- Ito, T., Gunawan, E., Kimata, F., Tabei, T., Simons, M., Meilano, I., Agustan., Ohta, Y., Nurdin, I. and Sugiyanto, D. 2012. Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117.
- Kusumawati, D., Sahara, D.P., Widiyantoro, S., Nugraha, A.D., Muzli, M., Imran, I., Puspito, N.T. and Zulfakriza, Z. 2021. Fault instability and its relation to static coulomb failure stress change in the 2016 M_w 6.5 Pidie Jaya earthquake, Aceh, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 8.
- Lange, D., Tilmann, F., Henstock, T., Rietbrock, A., Natawidjaja, D. and Kopp, H. 2018. Structure of the central Sumatran subduction zone revealed by local earthquake travel-time tomography using an amphibious network. *Solid Earth*, Vol. 9, No. 4, pp. 1035–1049.
- Lay, T., and Ye, L. 2018. The giant M_w 8.6 intraplate 2012 Sumatra earthquake: A surprise downward continued rupture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 123, No. 11, pp. 9932–9948.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Heuret, A. and Funicello, F. 2016. Where giant earthquakes may come. *AGU Publications, Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, No. 10, pp. 7322–7336.
- McCaffrey, R. 2009. The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 37, pp. 345–366.
- Mignan, A. and Woessner, J. 2012. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi: 10.5078/corssa-00180805.
- Mukti, M.M., Singh, S.C., Deighton, I., Hananto, N.D., Moeremans, R. and Permana, H. 2012. Structural evolution of backthrusting in the Mentawai fault zone, offshore Sumatran forearc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 13, No. 12.
- Muzli, M., Umar, M., Nugraha, A.D., Bradley, K.E., Widiyantoro, S., Erbas, K., Jousset, P., Rohadi, S., Nurdin, I. and Wei, S. 2018. The 2016 M_w 6.5 Pidie Jaya, Aceh, North Sumatra, earthquake: reactivation of an unidentified sinistral fault in a region of distributed deformation. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 5, pp. 1761–1772.
- Natawidjaja, D.H. 2002. *Neotectonics of the Sumatran Fault and Paleogeodesy of the Sumatran subduction zone*. Thesis. California: California Institute of Technology at Pasadena. pp. 1–289.

- Natawidjaja, D.H. and Triyoso, W. 2007. The Sumatran fault zone from source to hazard. *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 1, No. 1, pp. 21–47.
- Natawidjaja, D.H., Bradley, K., Daryono, M.R., Aribowo, S. and Herrin, J. 2017. Late quaternary eruption of the Ranau caldera and new geological slip rates of the Sumatran Fault Zone in the southern Sumatra, Indonesia. *Geoscience Letters*, Vol. 21, No. 4.
- Nava, F.A., Ávila-Barrientos, L., Márquez-Ramírez, V.H., Torres, I. and Zúñiga, F.R. 2017. Sampling uncertainties and source b likelihood for the Gutenberg-Richter b value from the Aki-Utsu method. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 315–324.
- Nugraha, A.D., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Thurber, C.H., Pesicek, J.D., Zhang, H., Wiyono, S.H., Ramdhan, M., Wandono and Irsyam, M. 2018. Hypocenter relocation along the Sunda Arc in Indonesia, using a 3D seismic-velocity model. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A.
- Prasad, S. and Singh, C. 2015. Evolution of b -values before large earthquakes of $m_b \geq 6.0$ in the Andaman region. *Geologica Acta*, Vol. 13, No. 3, pp. 205–210.
- Rafie, M.T., Sahara, D.P., Widiyantoro, S. and Nugraha, A.D. 2019. Impact on the 2004 Sumatra-Andaman earthquake to the stress heterogeneity and seismicity pattern in northern Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 318.
- Ratnasari, R.N., Tanioka, Y. and Gusman, A.R. 2020. Determination of source models appropriate for tsunami forecasting: application to tsunami earthquakes in central Sumatra, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, pp. 2551–2562.
- Rigo, A., Souriau, A. and Sylvander, M. 2018. Spatial variations of b -value and crustal stress in the Pyrenees. *Journal of Seismology*, Vol. 22, pp. 337–352.
- Rusdy, I., Idris, Y., Mulkal, Muksin, U., Cummins, P., Akram, M.N. and Syamsidik. 2020. Shallow crustal earthquake models, damage, and loss predictions in Banda Aceh, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 7, No. 8.
- Sahara, D.P., Widiyantoro, S. and Irsyam, M. 2018. Stress heterogeneity and its impact on seismicity pattern along the equatorial bifurcation zone of the Great Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Asian Earth Science*, Vol. 164, pp. 1–8.
- Salman, R., Hill, E.M., Feng, L., Lindsey, E.O., Mele Veedu, D., Barbot, S., Banerjee, P., Hermawan, I., & Natawidjaja, D.H. 2017. Piecemeal rupture of the Mentawai patch, Sumatra: The 2008 M_w 7.2 North Pagai earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, No. 11, pp. 9404–9419.
- Salman, R., Lindsey, E.O., Feng, L., Bradley, K., Wel, S., Wang, T., Daryono, M.R. and Hill, E.M. 2020. Structural controls on rupture extent of recent Sumatran Fault Zone earthquakes, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 125, No. 2.
- Scholz, C. H. 2015. On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letter*, Vol. 42, pp. 1399–1402.
- Sieh, K. and Natawidjaja, D. 2000. Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B12, pp. 28295–28326.
- Simoes, M., Avouac, J.P., Cattin, R., and Henry, P. 2013. The Sumatra subduction zone: A case for a locked fault zone extending into the mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 118, No. 10, pp. 5240–5257.
- Singh, S.C., Hananto, N.D., Chauhan, A.P.S., Permana, H., Denolle, M., Hendriyana, A. and Natawidjaja, D. 2010. Evidence of active backthrusting at the NE margin of Mentawai Islands, SW Sumatra. *Geophysical Journal International*, Vol. 180, pp. 703–714.
- Špičák, A., Hanuš, V. and Vaněk, J. 2007. Earthquake occurrence along the Java trench in front of the onset of the Wadati-Benioff zone: Beginning of a new subduction cycle. *The American Geophysical Union*, Vol. 26.
- 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 the Maldives. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, pp. 3313–3341.
- Tormann, T., Wiemer, S. and Mignan, A. 2014. Systematic survey of high-resolution b value imaging along Californian faults: inference on asperities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 119, pp. 2029–2054.
- Triyoso, W., Suwondo, A., Yudistira, T. and Sahara, D.P. 2020. Seismic hazard function (SHF) study of coastal sources of Sumatra Island: SHF evaluation of Padang and Bengkulu cities. *Geosciences Letters*, Vol. 7, No. 2.

- Triyoso, W., Kongko, W., Prasetya, G.S., dan Suwondo, A. 2024. Study on earthquake and tsunami hazard: evaluating probabilistic seismic hazard function (PSHF) and potential tsunami height simulation in the coastal cities of Sumatra Island. *Frontiers in Built Environment*, Vol. 10.
- Utsu, T. 1966. A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups. *Journal of Physics of The Earth*, Vol. 14, No. 2, pp. 37–40.
- Wang, K., and Bilek, S.L. 2014. Invited review paper: Fault creep caused by subduction of rough seafloor relief. *Tectonophysics*, Vol. 610, pp. 1–24.
- Warren, L.M., Baluyut, E.C., Osburg, T., Lisac, K. and Kokkinen S. 2015. Fault plane orientations of intermediate-depth and deep-focus earthquakes in the Japan-Kuril-Kamchatka subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 120, Issue 12, pp. 8366–8382.
- Weller, O., Lange, D., Tilmann, F., Natawidjaja, D., Rietbrock, A., Collings, R. and Gregory, L. 2012. The structure of the Sumatran Fault revealed by local seismicity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L01306.
- Wiseman, K., Banerjee, P., Sieh, K., Bürgmann, R. and Natawidjaja, D.H. 2011. Another potential source of destructive earthquake and tsunami offshore of Sumatra. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 10.
- Woessner, J. and Wiemer, S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 2, pp. 684–698.
- Yeken, T. 2016. Spatial analysis of b-value variability in Armutlu Peninsula (NW Turkey). *Open Geoscience*, Vol. 8, pp. 548–555.
- Zhang H, van der Lee, S., Bina, C. R. and Ge, Z. 2021. Deep dehydration as a plausible mechanism of the 2013 M_w 8.3 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, No. 521220, pp. 1–13.
- Zhu, S. 2021. Estimation of seismic hazard around the Ordos block of China based on spatial and temporal variations of b-values. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 12, No. 1, pp. 2048–2069.