



Seismotektonik Bagian Barat Sumatra ditinjau dari Nilai-b dan Nilai-a yang didapatkan melalui Inversi Matriks dan Regresi Linier

Abraham Arimuko*

Pusat Gempa Bumi dan Tsunami, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta, Indonesia

Abstrak

Wilayah Sumatra bagian barat merupakan wilayah yang memiliki tatanan tektonik yang unik. Terdapat zona subduksi akibat hunjaman lempeng Samudra Hindia ke lempeng Benua Eurasia yang tidak tegak lurus. Selain itu terdapat zona *forearc* yang terbentuk akibat hunjaman, yang menyebabkan terbentuknya zona patahan di Pulau Mentawai dan Pulau Sumatra. Di tengah Pulau Sumatra terdapat Sesar Sumatra yang terbagi menjadi beberapa segmen. Aktivitas tektonik dapat direpresentasikan dari nilai-a dan nilai-b dari koefisien persamaan Guttenberg-Richter. Persamaan ini merupakan hubungan antara jumlah kejadian gempa bumi dengan besar magnitudo. Studi ini membandingkan hasil perhitungan nilai-a dan nilai-b dari metode inversi matriks dan regresi linear dari persamaan Guttenberg-Richter dengan pengkajian secara spasial dan temporal agar terlihat pola aktivitas seismotektonik pada wilayah penelitian. Selisih nilai terbesar pada kedua metode ini 0.31 pada koefisien b temporal.

Masuk:
21 November 2022
Diterima:
13 Desember 2022
Diterbitkan:
30 Desember 2022

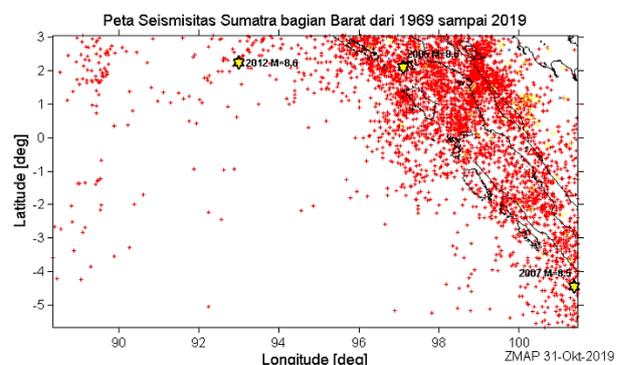
Kata kunci:

Seismotektonik; Nilai-b; Nilai-a; Inversi Matriks; Regresi Linier

PENDAHULUAN

Sumatra bagian barat adalah salah satu wilayah Indonesia yang sering terjadi gempa. Itu karena Sumatra bagian barat memiliki segmen dari Sesar Besar Sumatra, seperti segmen Sumpar, segmen Sianok dan segmen Sidak. Di laut barat Sumatra ada zona subduksi dan termasuk zona subduksi termuda yang ada di Indonesia. Sudut slip landai sehingga memiliki kopling kuat yang berpotensi terjadi gempa-gempa besar. Kejadian gempa bumi magnitudo momen (M_w) lebih dari 8 yang pernah terjadi pada catatan data yang digunakan terjadi 4 kali, dua diantaranya adalah gempa bumi *dupplet* yang terjadi pada 11 April 2012 yang dengan $M_w = 8,6$ dan $M_w = 8,2$. Ini adalah gempa bumi strike-slip di intraplate terbesar yang pernah dicatat dan memicu terjadinya tsunami (Meng, 2012). Dua gempa bumi yang lain terjadi pada 28

Maret 2005 dengan M_w 8,6 yang mengakibatkan tsunami dan M_w 8,5 pada 12 September 2007. Plot Episentrum gempa bumi Sumatra bagian barat dari 1969 sampai dengan 2019 ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Plot episentrum kejadian gempa bumi dari 1969 sampai 2019.

Dalam penelitian ini, hubungan kuadrat terkecil Gutenberg-Richter (1942)

*Korespondensi: Abraham Arimuko ✉ abraham.arimuko@bmgk.go.id 📍 Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta Pusat, DKI Jakarta

digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta a dan b . Ini adalah salah satu metode untuk menghitung aktivitas seismik di wilayah studi. Perhitungan nilai- a dan nilai- b memerlukan syarat dikarenakan pada proses perhitungannya menggunakan kaidah statistik. Data parameter gempa bumi yang akan digunakan dalam proses perhitungan diharuskan memiliki jenis magnitudo yang sama dan tidak mengalami saturasi.

Penggunaan perangkat lunak Zmap selain digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan nilai- a dan nilai- b , digunakan untuk decluster peristiwa gempa. Akurasi nilai nilai- a dan nilai- b akan lebih baik daripada ketika declustering belum dilakukan. Secara umum nilai variabel a akan meningkat setelah *declustering*. Setelah magnitudo seragam dan metode untuk menghilangkan gempa pendahuluan dan gempa susulan adalah faktor yang paling efektif dalam kesimpulan akhir untuk wilayah itu (Amini, 2014). Untuk kasus ini, penulis menggunakan metode Uhrhammer (1986) untuk menguraikan peristiwa-peristiwa ini.

Nilai- b adalah sekitar 1, itu berarti 10 kali penurunan aktivitas dengan peningkatan setiap satuan besarnya (Prawirodikromo, 2012). Variasi nilai- b spasial dalam penelitian ini, diperoleh dari analisis inversi matriks yang divalidasi dengan perangkat lunak Zmap. Variasi nilai- b spasial tidak terjadi secara sistematis pada berbagai sumber gempa bumi tetapi studi lain menunjukkan nilai- b berbeda secara signifikan dalam sesar juga pada area dan spesifik dalam rentang waktu (Rohadi, 2008). Pengamatan variasi nilai- b spasial menunjukkan stres aktivitas lokal. Dalam metode statistik, perubahan signifikan dari nilai- b pada segmen lokal, seperti segmen Sumpar, segmen Sianok dan segmen Sidak. Sumatra bagian barat terdapat zona subduksi akibat hasil berinteraksi Lempeng Indo-Australia bergerak 7 cm / tahun ke utara. Ini adalah subduksi di bawah lempeng benua (Eurasia Plate). Subduksi terjadi di bagian barat Sumatra sejajar dengan garis pantai

dengan orientasi tenggara-barat laut. Selain itu, subduksi menghasilkan busur vulkanik dan barisan pegunungan bagian barat Pulau Sumatra. Penelitian ini berfokus pada perbandingan hasil penghitungan spasial dan temporal nilai- a dan nilai- b menggunakan metoda inversi matrik dan perangkat lunak Zmap di wilayah sumber-sumber gempa.

Bagian tepi yang aktif *Sundaland*, terutama di daerah antara busur dan palung, tersusun atas kompleks prisma akresi dan cekungan muka busur. Wilayah dengan kondisi geologi seperti itu salah satunya adalah perairan di sekitar Pulau Mentawai. Tataan struktur seperti itu telah dikaji pada penelitian terdahulu (Deighton dkk., 2014). Penelitian tentang ilmu kebumiharian telah banyak dilakukan, terutama yang mengkaji zona sesar Sumatra (Daryono, 2016). Di daerah busur muka Sumatra terdapat sesar-sesar *strike-slip* yang merupakan karakteristik wilayah ini akibat evolusi tektonik yang berkaitan dengan subduksi miring sepanjang batas lempeng (Hall dkk., 1993).

Catatan gempa bumi besar yang disebabkan aktifitas gerakan lempeng di subduksi bagian barat Sumatra telah banyak teramati dari beberapa penelitian sebelumnya. Selain itu, berdasarkan hasil pengukuran modern, secara umum zona subduksi Sumatra sedang mengakumulasi energi (Chileh dkk., 2008). Hal ini sejalan dengan data yang digunakan dalam penelitian ini. Gempa bumi dengan $M_w > 7,0$ terjadi sekali pada 2 Maret 2016 dengan magnitudo $M_w 7,8$ sejak kejadian gempa bumi *dupplet* 2012.

Pada studi ini digunakan jenis magnitudo momen (M_w) karena jenis magnitudo ini dapat merepresentasikan dengan baik skala energi yang dilepaskan ketika terjadi proses penyesaran. Selain itu, magnitudo ini tidak terpengaruh oleh jenis alat dan medium yang dilewatinya. Pendekatan magnitudo momen langsung merepresentasikan bidang yang mengalami patahan (Kanamori, 1977).

Kanamori (1983) meringkas hubungan antara berbagai skala magnitudo dalam bentuk grafik (Gambar

3). Hal ini juga memberikan rentang ketidakpastian untuk berbagai skala Magnitude karena kesalahan pengamatan dan variasi intrinsik dalam parameter sumber yang terkait dengan perbedaan penurunan stress, kompleksitas, geometri dan ukuran sesar, kedalaman sumber, dll. Rentang periode Magnitude dapat ditentukan yaitu, mb: ≈ 1 s; ML: $\approx 0,1-3$ s; mB: $\approx 0,5-15$ s; Ms: ≈ 20 s; dan Mw: $\approx 10 \rightarrow \infty$ s. Tim revisi peta gempa 2012 telah membuat rumusan empiris untuk konversi magnitudo gelombang tubuh (mb) dan magnitudo gelombang permukaan (Ms) ke magnitudo momen (Mw) (Pusgen, 2017).

$$Mw = 1,0107*mb + 0,0801; 3,7 \leq mb \leq 8,2 \quad (1)$$

$$Mw = 0,6016*Ms + 2,476; 2,8 \leq Ms \leq 6,1 \quad (2)$$

$$Mw = 0,9239*Ms + 0,5671; 6,2 \leq Ms \leq 8,7 \quad (3)$$

METODE PENELITIAN

Pada studi ini, digunakan data dari katalog IRIS dengan rentang 50 tahun, dari 1969 sampai 2019. Batas wilayah studi ini pada $5,67^\circ$ LS- $3,07^\circ$ LU dan $88,34^\circ$ BT- $101,48^\circ$ BT. Koordinat ini melingkupi zona subduksi bagian barat Sumatra, zona akresi busur depan Sumatra, dan segmen dari sesar Sumatra. Bentuk matriks diperoleh dengan mengklasifikasikan data berdasarkan besarnya gempa yang dicatat dalam katalog IRIS dengan rentang antara magnitudo 0,1 Mw. Magnitudo akan menjadi nilai sumbu x dan jumlah gempa bumi selama periode 1969 - 2019 menjadi nilai sumbu y dalam grafik Cartesien. Matriksnya seperti persamaan (4).

$$\begin{bmatrix} \log N(M_1) \\ \dots \\ \log N(M_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & M_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (4)$$

Proses penghilangan gempa pendahuluan dan gempa susulan pada penelitian ini menggunakan metoda Uhrhammer. Persamaan empiris Uhrhammer (1986) menghubungkan antara jarak terhadap magnitudo dan waktu terhadap magnitudo (Amini, 2014). Hubungan antara jarak terhadap magnitudo dinyatakan persamaan (5)

$$e^{-1.024+0.804M} \quad (5)$$

Hubungan antara waktu terhadap magnitudo ditunjukkan persamaan (6)

$$e^{-2.87+1.235M} \quad (6)$$

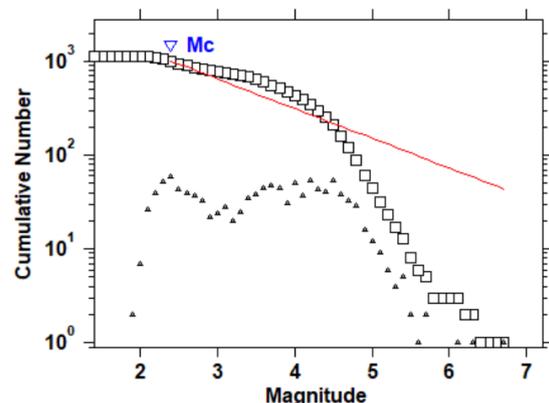
Metode untuk mengetahui parameter seismik dan tektonik area penelitian menggunakan hubungan Gutenberg-Richter seperti pada persamaan 7 (Guttenberg-Richter, 1942)

$$\log n(M) = a - bM \quad (7)$$

Dengan $\log N(M_n)$ adalah logaritmik basis 10 jumlah data M_n , M_n adalah nilai magnitudo yang diklasifikasikan, serta a dan b adalah koefisien yang dicari. Hasil perhitungan nilai-a dan nilai-b dari proses inversi matrik dibandingkan dengan hasil dari pengolahan dengan perangkat lunak Zmap.

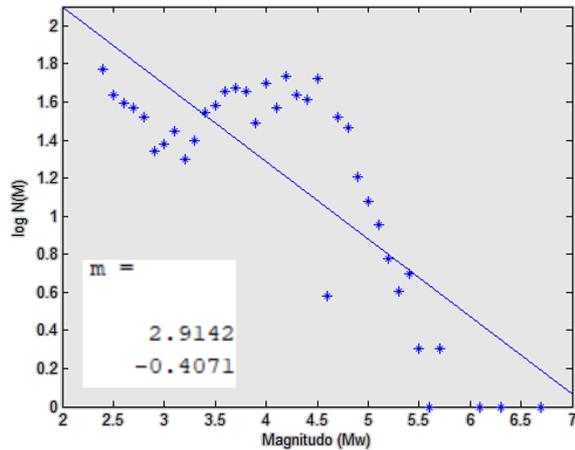
HASIL DAN PEMBAHASAN

Fokus dari studi seismotektonik ini adalah untuk mengetahui berapa nilai-a dan nilai-b pada tiga sumber gempa yang diklasifikasi. Nilai-a merupakan interpretasi dari logaritmik basis 10 dari jumlah kejadian gempa bumi di wilayah tersebut. Sedangkan nilai-b merupakan gradien dari grafik hubungan antara jumlah gempa bumi terhadap magnitudonya. Semakin kecil nilai-b maka di wilayah tersebut jarang terjadi gempa bumi.



Maximum Likelihood Solution
b-value = 0.317 +/- 0.006, a value = 3.76, a value (annual) = 2.07
Magnitude of Completeness = 2.4

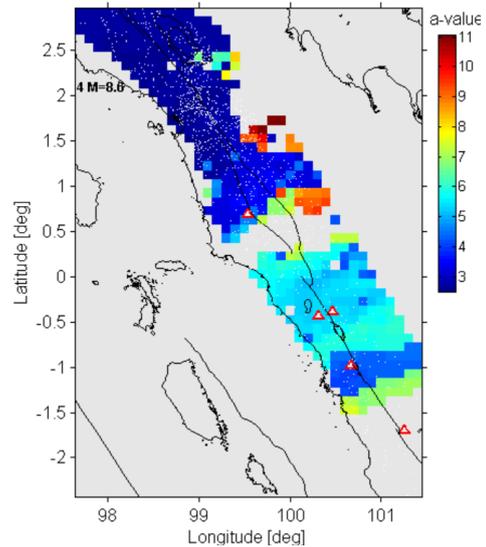
Gambar 2. Hasil nilai-a dan nilai-b di segmen Sesar Sumatra dari pengolahan di Zmap.



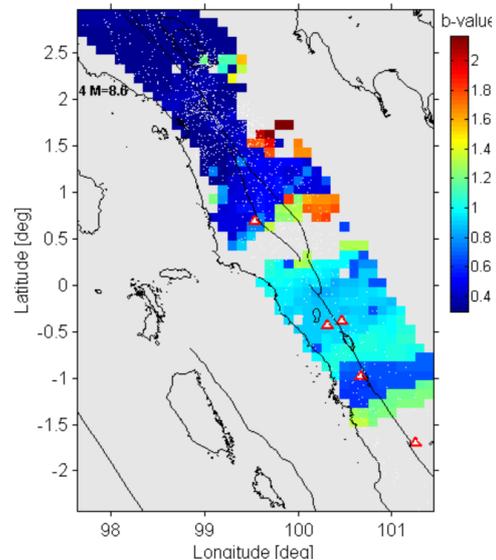
Gambar 3. Hasil nilai-a dan nilai-b di segmen Sesar Sumatra dari pengolahan metode inversi matriks.

Gambar 2 dan Gambar 3 adalah hasil dari semua kejadian gempa bumi akibat aktifitas di segmen Sesar Sumatra. Gambar 3 menunjukkan nilai-a adalah 2.9142 dan nilai-b adalah 0.4071. Tanda negatif menunjukkan arah dari gradien. Untuk pembuatan plot nilai-a dan nilai-b secara spasial memerlukan beberapa kriteria agar dapat menghasilkan nilai a dan b di *grid* yang dibuat. Jumlah kejadian gempa bumi yang digunakan dalam perhitungan nilai-a dan nilai-b di segmen Sesar Sumatra sebanyak 1135 kejadian gempa bumi dari tahun 1969 sampai tahun 2017.

Nilai-a dan nilai-b secara spasial ditunjukkan Gambar 4 dan Gambar 5. Gambar 4 menunjukkan bahwa bagian atas lebih kecil nilai-a dan nilai-b dibandingkan bagian bawah. Bagian atas mengindikasikan tidak banyak kejadian gempa bumi. Pada bagian bawah segmen, ternyata nilai-b didominasi oleh nilai 0,97. Berarti segmen Sesar Sumatra bagian bawah lebih banyak terjadi gempa. Banyaknya kejadian gempa di bagian bawah disebabkan oleh adanya sesar di busur muka Sumatra bagian barat (sebelah timur Pulau Mentawai). Segmen Sesar Sumatra dapat ter-*trigger* oleh aktifitas di busur muka.



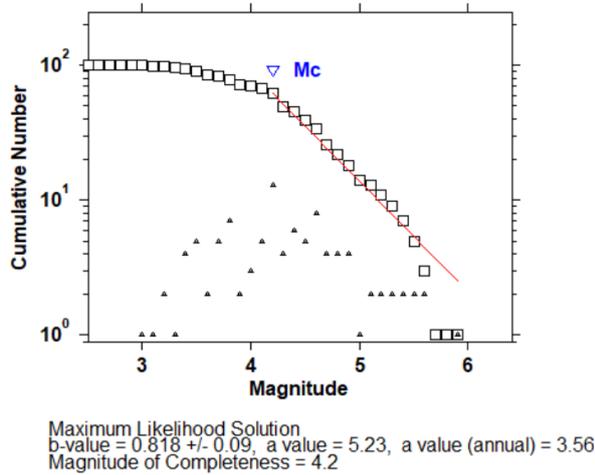
Gambar 4. Nilai-a secara spasial di segmen Sesar Sumatra.



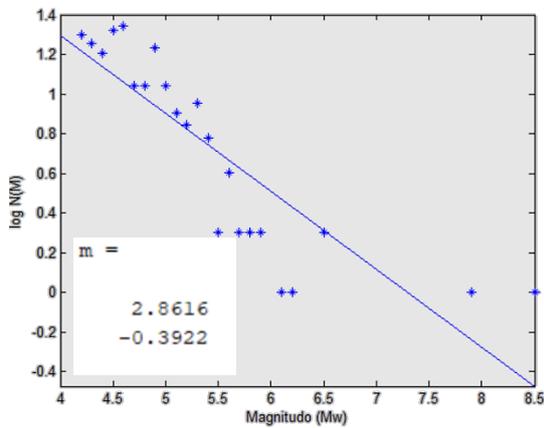
Gambar 5. Nilai-b secara spasial di segmen Sesar Sumatra.

Hasil pengolahan Zmap untuk nilai-a dan nilai-b busur muka Sumatra ditunjukkan Gambar 6. Sementara hasil pengolahan menggunakan metode inversi matriks pada busur muka Sumatra ditunjukkan Gambar 7. Nilai-a dan nilai-b dari Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa Sesar Mentawai ini sangat aktif memicu terjadinya gempa bumi. Pada tahun 2007 terjadi gempa besar dengan magnitudo M_w 8,5 ditunjukan dengan simbol bintang pada gambar di bawah. Sesar Mentawai ini memiliki mekanisme sumber *thrusting* yang

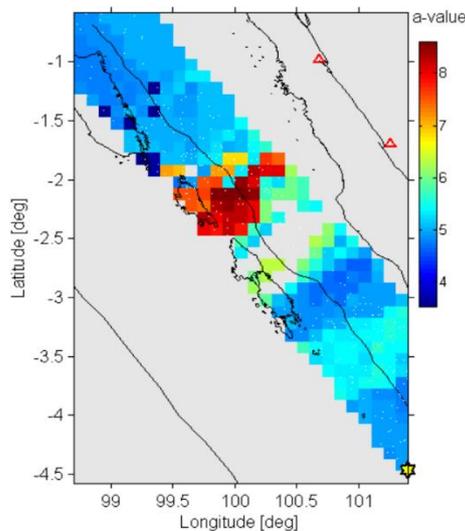
dipengaruhi oleh zona subduksi di Sumatra bagian barat (lihat Gambar. 9)



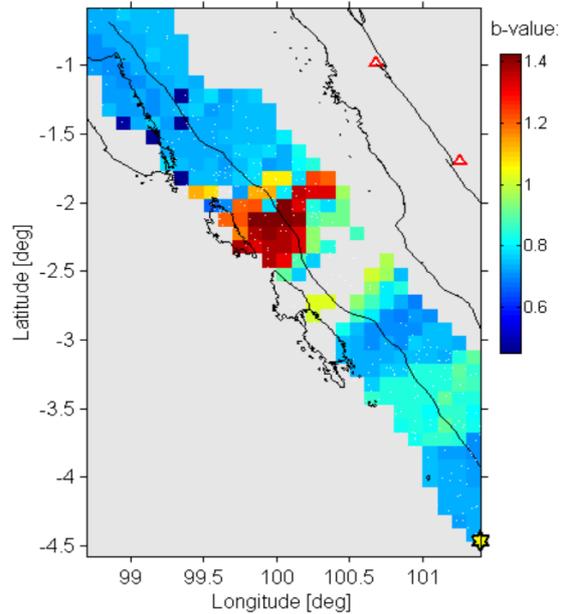
Gambar 6. Hasil pengolahan Zmap untuk nilai-a dan nilai-b pada busur muka Sumatra.



Gambar 7. Hasil metode Inversi matriks untuk nilai-a dan nilai-b busur muka Sumatra.

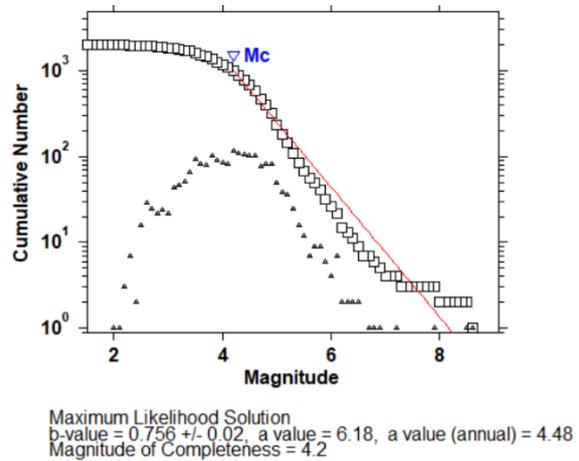


Gambar 8. Nilai-a secara spasial di sesar pada busur muka Sumatra.



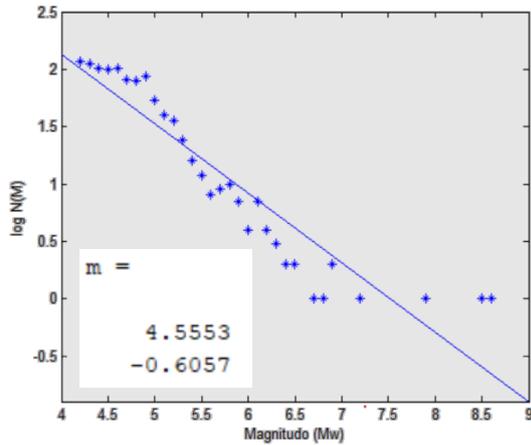
Gambar 9. Nilai-b secara spasial di sesar pada busur muka Sumatra.

Jika dibandingkan dengan nilai dari segmen Sesar Sumatra, nilai-a dan nilai-b di sesar busur muka Sumatra lebih tinggi Seperti ditunjukkan Gambar 8 dan Gambar 9. Pada bagian atas memiliki nilai 0,74, bagian tengah 1,39 dan bagian bawah 0,82. Nilai yang tinggi pada bagian tengah Sesar Mentawai disebabkan oleh aktifitas pada zona subduksi.



Gambar 10. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan di Zmap.

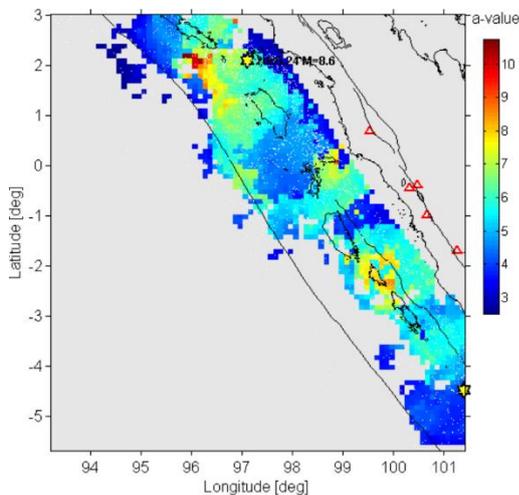
Hasil nilai-a dan nilai-b pada zona subduksi menggunakan Zmap ditunjukkan Gambar 10. Hasil menggunakan Zmap diperoleh nilai-a 4.48 dan nilai-b 0.756 +/- 0.02.



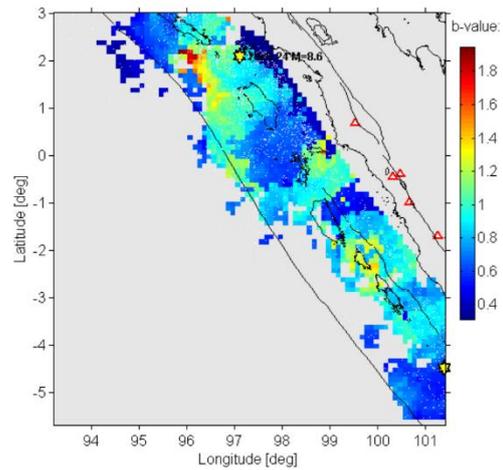
Gambar 11. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dengan metode inversi matriks.

Hasil nilai-a dan nilai-b pada zona subduksi menggunakan metode inversi matriks ditunjukkan Gambar 11. Hasil menggunakan Zmap diperoleh nilai-a 4.5553 dan nilai-b 0.6057.

Wilayah yang dimasukkan ke dalam klasifikasi sumber gempa akibat aktifitas di zona subduksi lebih luas dibandingkan dengan sesar. Hal tersebut diakibatkan oleh bidang patahan zona subduksi lebih luas dibandingkan sesar. Bagian timur laut lebih luas wilayah yang diambil dan gempa yang terjadi karena gerakan lempeng Samudera Hindia bergerak ke timur laut. Gambar di atas juga menunjukkan bahwasannya zona subduksi memicu aktifitas seismik di Sesar Mentawai. Pada bagian tengah Sesar mentawai, nilai-a dan nilai-b tertinggi seperti Gambar 12 dan Gambar 13.

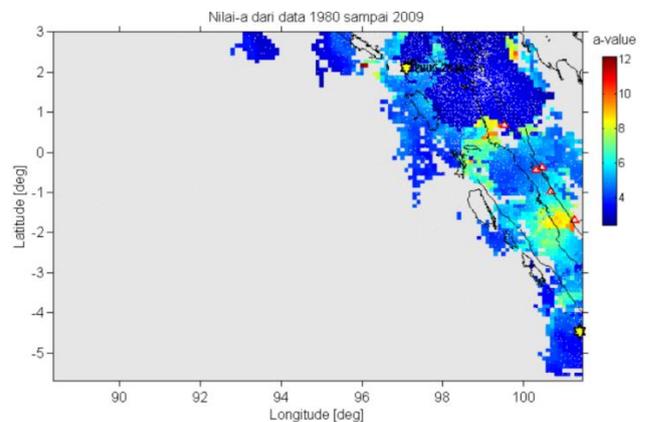


Gambar 12. Nilai-b secara spasial Zona Subduksi

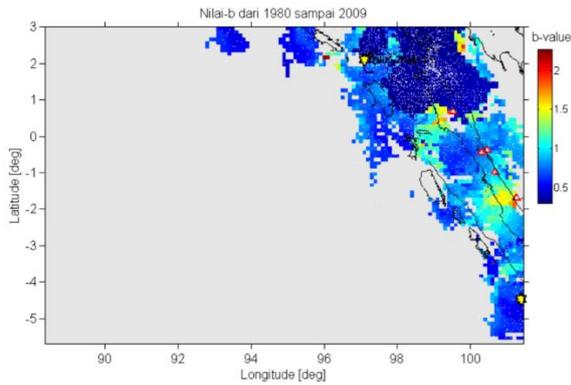


Gambar 13. Nilai-b secara spasial Zona Subduksi

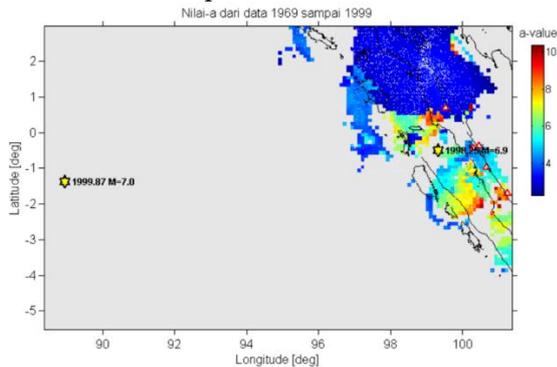
Plot perbandingan nilai-a dan nilai-b dengan rentang data 30 tahun dengan selisih antar tahun pengolahan 10 tahun ditunjukkan oleh Gambar 14 sampai dengan Gambar 19. Dari 10 tahun pertama hingga 10 tahun ketiga, terlihat bahwa sebelum terjadi gempa dengan magnitudo $M_w > 8$ nilai-a dan nilai-b relatif kecil pada zona sumber seismik. Setelah terjadi gempa besar maka nilai-a dan nilai-b menunjukkan peningkatan. Hal itu terlihat pada segmen Sesar Sumatra dan sesar di busur muka Sumatra. Namun pada wilayah subduksi terlihat ada perbedaan yang terpadat pada 10 tahun ketiga. Saat terjadi gempa 2012 dengan $M_w = 8,6$ nilai-a dan nilai-b rendah. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa terjadi pengakumulasian energi lagi pada zona tersebut.



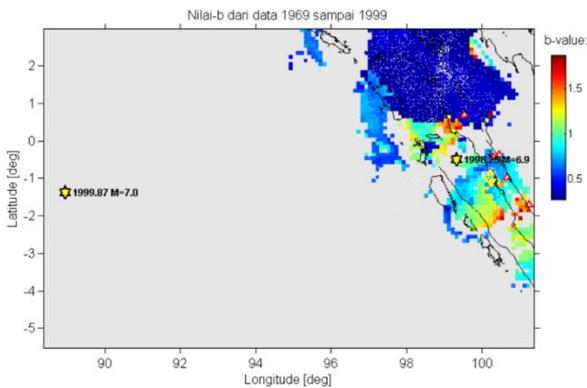
Gambar 14. Nilai-a secara spasial dari 1980 sampai 2009



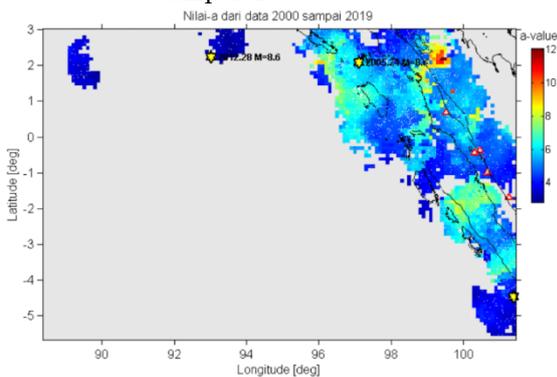
Gambar 15. Nilai-b secara spasial dari 1980 sampai 2009



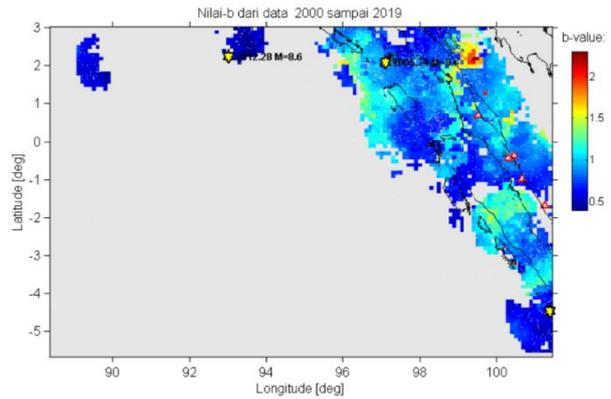
Gambar 16. Nilai-a secara spasial dari 1969 sampai 1999



Gambar 17. Nilai-b secara spasial dari 1969 sampai 1999

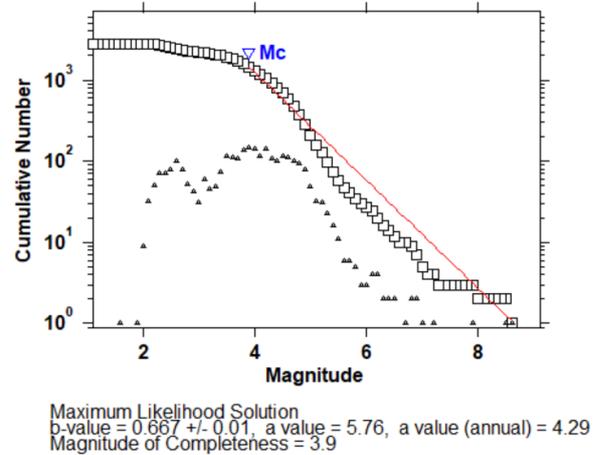


Gambar 18. Nilai-a secara spasial dari 2000 sampai 2019

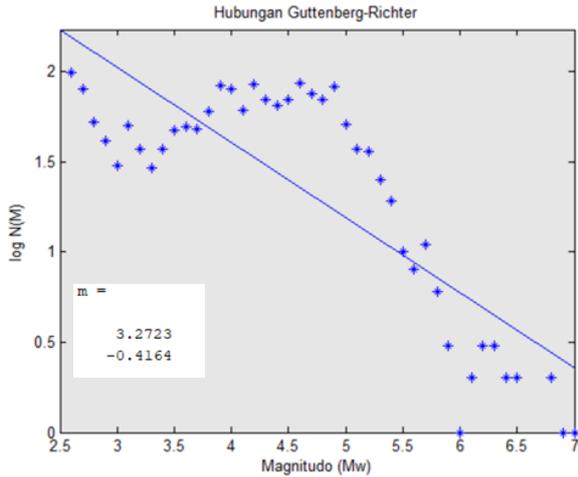


Gambar 19. Nilai-b secara spasial dari 2000 sampai 2019

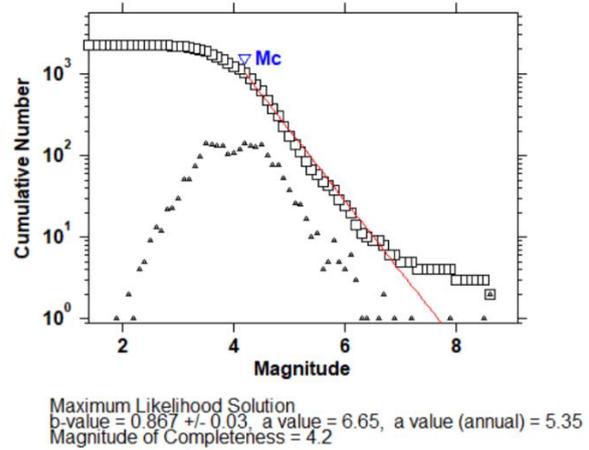
Perbandingan nilai-a dan nilai-b dengan menggunakan Zmap dan Metode Inversi dengan rentang data 30 tahun dengan selisih antar tahun pengolahan 10 tahun ditunjukkan oleh Gambar 20 sampai dengan Gambar 25. Nilai-b temporal menunjukkan kenaikan ketika pada rentang 10 tahun tersebut terjadi gempa bumi besar yang $M_w > 8$. Pada data tahun 1969 sampai 1999 nilai-b dan a paling kecil dibandingkan dengan 2 rentang data yang lain. Nilai-b dan a yang kecil menunjukkan bahwa terdapat sedikit kejadian gempa bumi yang direpresentasikan nilai-a dan sedang terjadi pengakumulasian *stress* yang ditunjukkan oleh nilai-b yang kecil. Nilai-nilai ini hanya merupakan asumsi bahwa proses akumulasi energi di lapisan batuan pada masa lalu dengan masa depan tetap sama (Arimuko, 2018).



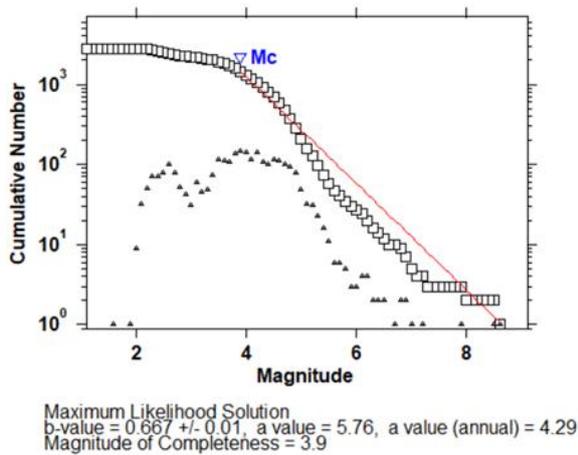
Gambar 20. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan Zmap



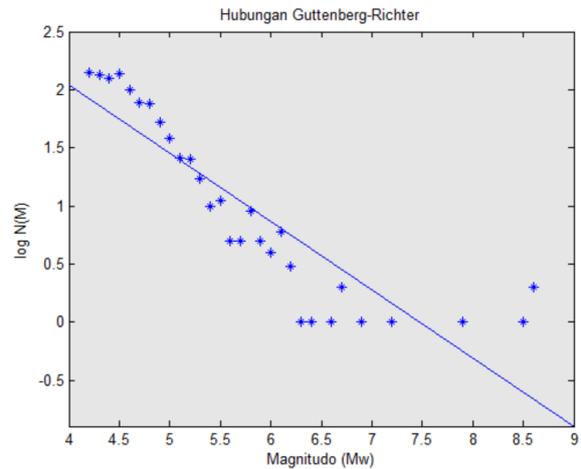
Gambar 21. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan Metode Inversi



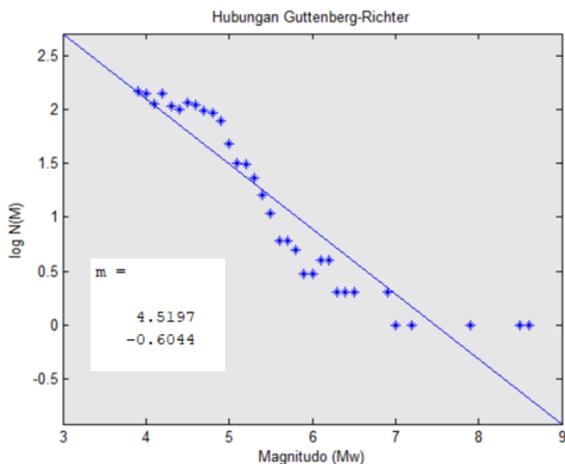
Gambar 23. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan Zmap



Gambar 22. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan Zmap.



Gambar 24. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan Metode Inversi.



Gambar 23. Hasil nilai-a dan nilai-b di zona subduksi dari pengolahan Metode Inversi

Dalam satu sistem tatanan tektonik, setiap segmen dapat mempengaruhi aktifitas sumber gempa yang lain. Ketika terjadi pelepasan energi di suatu bidang sumber gempa bumi, maka energi yang diradiasikan dalam bentuk gelombang akan memicu segmen sumber lainnya. Sumber gempa utama diidentifikasi sebagai nilai-b yang lebih rendah atau zona tertekan pada ujung patahan. Sedangkan gempa-gempa yang berasal dari sumber berbeda yang dipicunya memiliki nilai-b tinggi karena aktivitas seismiknya juga tinggi.

Pada zona subduksi lebih berpotensi terjadi gempa bumi Mw > 8. Hal tersebut terlihat dari plot pengelompokan tiga jenis sumber gempa. Pada zona subduksi terjadi gempa besar. Gerak tunjangan lempeng

menghasilkan energi yang besar dan energi tersebut tidak langsung dilepaskan sebagai gempa namun dapat terakumulasi karena terdapat asperiti. Zona asperiti terdapat pada kerak bagian bawah. (Singh, 2013).

SIMPULAN

Suatu wilayah yang terjadi pengakumulasi energi ditandai dengan nilai-a dan nilai-b yang rendah pada zona sumber seismik. Pada wilayah tersebut jarang terjadi gempa, yang lebih dikenal dengan zona seismic gap. Hal tersebut sejalan dengan Rohadi (2015), temporal nilai-b berkisar antara 0,8-1,5, nilai-b secara umum menurun sebelum terjadinya gempa bumi besar.

Pada pengolahan menggunakan inversi linear dan regresi linear menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan dari nilai-a dan nilai-b yang dihasilkan. Namun kedua metoda tersebut tidak dapat mendapatkan nilai yang sama persis karena perhitungan inversi linear menggunakan kaidah perhitungan matriks dan regresi linier menggunakan kaidah statistika. Meskipun seharusnya hasilnya sama, pembulatan angka dalam perhitungan membuat nilai-a dan nilai-b tidak dapat sama persis.

REFERENSI

- Amini, H. (2014). Comparing Reasenberg and Gruenthal declustering methods for north of Iran. Second European conference on earthquake engineering and seismology.
- Arimuko, A., Yoan, F., Rohadi S., and Wulur, K.H.C. (2018). a-Value and b-Value as Basic Calculation Seismicity Index, Repeated Period, and Vulnerability of Earthquakes. EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering, EarthDoc. doi:10.3997/2214-4609.201800362
- Chileh, M., Avouac, J.P., Sieh, K., Natawidjaja, D.H. & Galetzka, J. (2008). Heterogenous Coupling of the Sumatra Megathrust Constrained by Geodetic and Paleogeodetic Measurements. *J. Geophys. Res.* 113, B05305, doi:10.1029/2007JB004981.
- Daryono, M.R. (2016). Paleoseismology Tropis Indonesia: Dengan Studi Kasus di Sesar Sumatra, Sesar Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang. Disertasi Program Doktorat, ITB.
- Deighton, I., M. M. Mukti, S. Singh, T. Travis, A. Hardwick, and K. Herson (2014). Nias Basin, NW Sumatra - New Insight into Forearc Structure and Hydrocarbon Prospectivity from Long-Offset 2D Seismic Data. In proceedings, Indonesian Petroleum Association, 38th Annual Convention&Exhibition, May 2014. p. Ipa14-G-299, Jakarta.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F., (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 32, pp. 163-191.
- Hall, R., B. Duff, M. Courbe, B. Seubert, M. Siahaan, and A. Wirabudi. (1993). The Southern Forearc Zone of Sumatra: Cainozoic Basin-Forming Tectonism and Hydrocarbon Potential. In proceedings Indonesia Petroleum Association, 22nd Annual Convention, Oktober 1993, pp. 319-344, Jakarta.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* 82, 2981-2987.
- Kanamori, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, 93, 185-199.
- Meng, L., Ampuero, J.-P., Stock, J., Duputel, Z., Luo, Y., Tsai V. C. (2012) Earthquake in a Maze: Compressional Rupture Branching During the 2012 Mw 8.6 Sumatra Earthquake. *Science* 337, 724 doi:10.1126/science.1224030.
- Pawirodikromo, W. (2012). Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan. Pustaka Pelajar, Yogyakarta.
- Pusat Studi Gempa Nasional. "Konversi Magnitudo" in Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun

- 2017 1 Ed. Puslitbang PUPR. 2017. hal. 90-91.
- Rohadi S, Grandis H, Ratag M, A. (2008). Studi Potensial Seismotektonik Sebagai Precursor Tingkat Kegempaan di Wilayah Sumatera. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* vol. 9 no. 2 pp 101-108. Publikasi Puslitbang BMKG.
- Rohadi S. (2015). Distribusi Spasial dan Temporal Parameter Seismotektonik sebagai Indikasi Tingkat Aktivitas Kegempaan di Wilayah Papua. *Jurnal Meteorologi Geofisika* pp 189-198. Publikasi Puslitbang BMKG.
- Singh, A. P.,Indrajit G. Roy, Kumar S., Kayal, J. R. (2013). Seismic source characteristics in Kachchh and Saurashtra regions of Western India: b-value and fractal dimension mapping of aftershock sequences. *Nat. Hazard. Springer* doi:10.1007/s11069-013-1005-3
- Uhrhammer, R. (1986), Characteristics of Northern and Central California Seismicity, *Earthquake Notes*, 57(1), 21.