

STUDI POTENSI SEISMOTEKTONIK SEBAGAI PRECURSOR TINGKAT KEGEMPAAN DI WILAYAH SUMATERA

Supriyanto Rohadi^{1,2}, Hendra Grandis², Mezak A. Ratag³

¹Balai Besar Meteorologi dan Geofisika Wilayah II Jakarta

²Program Magister Sains Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

³ Puslitbang BMG

Abstrak

Distribusi parameter seismotektonik dari relasi Gutenberg-Richter memegang peranan penting terkait dengan mitigasi bencana gempabumi. Pada penelitian ini, analisis parameter seismotektonik menggunakan data gempabumi dari katalog BMG dan National Earthquake Information Center (NEIC), tahun 1973 - 2008, dengan batas $5,0^{\circ}$ LS - 8° LU dan 92° BT - 106° BT, yaitu meliputi wilayah Sumatera-Andaman. Dari analisis menggunakan software analisis ZMAP diperoleh variasi nilai-b berkisar antara 0.5 - 2.2, variasi nilai-a berkisar antara 4-12 sedangkan periode ulang gempabumi dengan magnitude 6,8 secara umum adalah berkisar antara 5-23 tahun. Gempa-gempa besar pada kurun waktu 2004 - 2008 diindikasikan terjadi di wilayah dengan parameter seismotektonik yang relatif rendah.

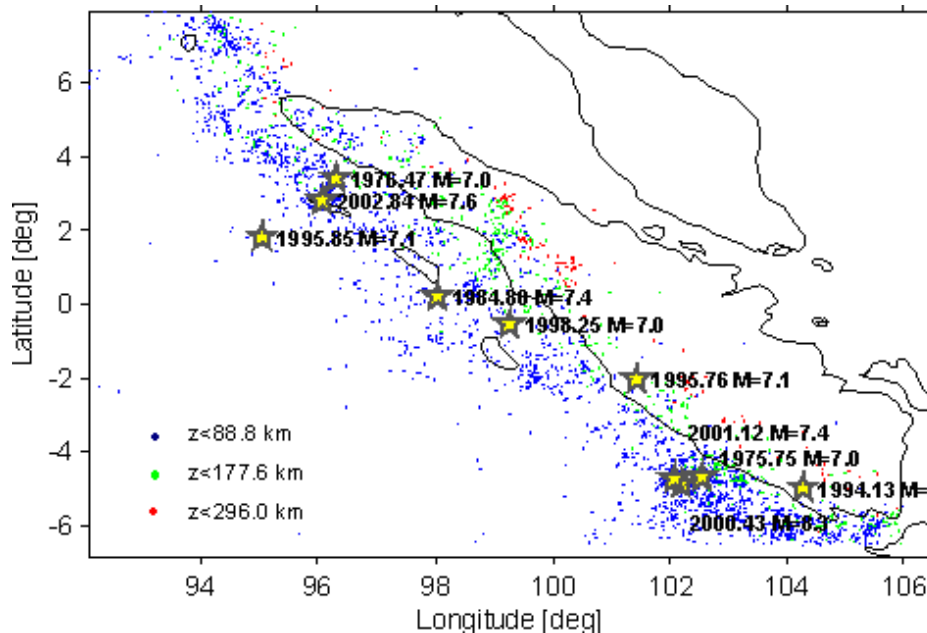
1. PENDAHULUAN

Wilayah Sumatera-Andaman merupakan salah satu wilayah aktif gempa di dunia. Dua gempa besar terjadi, yaitu gempa Aceh, 26 Desember 2004, pukul 07:58:54 (waktu lokal) dengan kekuatan $M_w = 9,0$ dan Nias 28 Maret 2005 dengan kekuatan $M_w = 8,7$. Gempabumi yang terjadi di wilayah ini telah menelan banyak korban jiwa dan harta benda. Tingginya aktivitas kegempaan di wilayah Sumatera dapat dilihat dari peta kegempaan (Gambar 2) dan plot kumulatif gempa (Gambar 3).

Berbagai cara yang berbeda-beda telah dilakukan untuk meneliti proses gempabumi. Hubungan frekuensi-magnitud (*Frequency-Magnitude Distribution*, *FMD*) merupakan salah satu cara untuk menguji aktivitas kegempaan di suatu wilayah. FMD dari gempabumi, pertama kali dikemukakan oleh Ishimoto dan Iida (1939) dan Gutenberg-Richter (1964), dimana merupakan hubungan pangkat (*power law*). Secara global nilai-b mendekati 1, yang berarti 10 kali penurunan aktivitas terkait dengan kenaikan dalam tiap

unit magnitud. Penelitian variasi spatial nilai-b telah dilakukan oleh beberapa peneliti di sejumlah daerah aktif gempa. Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa nilai tersebut tidak bervariasi secara sistematis pada berbagai regim aktif gempa. Tetapi Schorlemmer et al. (2004) dan beberapa peneliti lain menunjukkan bahwa nilai-b bervariasi secara signifikan di beberapa zona patahan (misalnya Wesnousky, 1983; Schorlemmer et al, 2004) dan juga pada tempat dan jangka waktu tertentu (misalnya Nuannin et al, 2005). Dari pengamatan variasi ruang nilai-b, diketahui bahwa nilai-b mencerminkan aktivitas stress lokal, dimana secara statistik perubahan nilai-b yang signifikan telah teramati di beberapa *regime stress* seperti zona subduksi lempeng dan zona patahan.

Penelitian ini difokuskan pada penentuan parameter seismo-tekonik, periode ulang, dan potensinya sebagai *precursor* kegempaan terkait dengan usaha mitigasi bencana gempabumi.



Gambar 1. Plot gempabumi dengan kedalaman sumber dangkal dan menengah di wilayah Sumatera-Andaman, tahun 1973 - 2007, dari katalog BMG & NEIC.

2. TEKTONIK SETING

Wilayah Sumatera merupakan bagian dari busur kepulauan Sunda, yang terbentang dari kepulauan Andaman-Nicobar hingga busur Banda (Timor). Busur Sunda merupakan busur kepulauan hasil dari interaksi lempeng samudera (lempeng Indo-Australia bergerak ke utara dengan kecepatan 7 cm pertahun) yang menunjam di bawah lempeng benua (Lempeng Eurasia). Penunjaman lempeng terjadi di selatan busur Sunda berupa palung (*trench*). Disamping itu, penunjaman lempeng juga menghasilkan busur vulkanik dan non-vulkanik. Busur vulkanik terdiri dari rangkaian gunung berapi yang menjadi tulang punggung pulau-pulau busur Sunda, sedangkan busur nonvulkanik merupakan rangkaian pulau-pulau yang terletak di sisi samudera busur vulkaniknya. Pada zona kovergensi ini terdapat aktivitas tektonik dan vulkanisme akibat penunjaman lempeng, dimana kedalaman zona Benioff di bawah Sumatera mencapai kedalaman sekitar 100 - 170 km.

3. METODOLOGI

3.1 Relasi Gutenberg-Richter

Metode untuk mengetahui parameter seismik dan tektonik suatu wilayah adalah dengan hubungan Gutenberg-Richter atau *magnitude-*

frequency relation (MFR) yang dituliskan sebagai :

$$\log n(M) = a - bM \quad \dots\dots\dots (1)$$

dimana $n(M)$ adalah jumlah gempabumi dengan magnitudo M . Nilai- a merupakan parameter seismik yang besarnya bergantung banyaknya gempa dan untuk wilayah tertentu bergantung pada penentuan volume dan *time window*. Nilai- b merupakan parameter tektonik biasanya mendekati 1 dan menunjukkan jumlah relatif dari getaran yang kecil dan yang besar. Nilai- b dapat ditentukan dengan metode *least square* atau maksimum likelihood. Metode maksimum likelihood menggunakan persamaan yang diberikan Utsu (1965) yaitu

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_{\min}} = \frac{0.4343}{\bar{M} - M_{\min}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana $\bar{M}$ adalah magnitudo rata-rata dan $M_{\min}$ adalah magnitudo minimum. Standar deviasi menggunakan formula dari Shi dan Bold (1982) sebagai berikut :

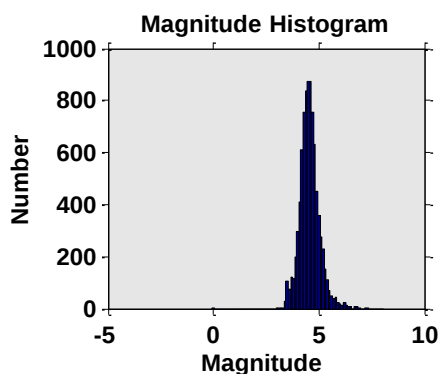
$$\delta b = 2.30b^2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 / n(n-1)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

dimana n adalah jumlah gempa pada sampling perhitungan.

4. DATA DAN PENGOLAHAN

4.1 Data

Data gempabumi dari katalog BMG dan *NEIC* wilayah Sumatera-Andaman, meliputi batas $6,5^{\circ}$ LS - $8,0^{\circ}$ LU dan 92° BT - 106° BT, kurun waktu Januari 1973 - Juni 2008. Katalog kegempaan Sumatera didominasi gempabumi dengan magnitudo sekitar 5 (Gambar 2). Data berjumlah 10140 gempa setelah dilakukan de-kluster katalog jumlahnya menjadi 4185 gempa. Dekluster katalog bertujuan untuk menghilangkan pengaruh *aftershok* sehingga diperoleh gempa yang *independent*. Selain dekluster dilakukan juga konversi magnitudo menjadi magnitudo moment (M_w), karena magnitudo ini tersaturasi pada skala yang lebih tinggi dibandingkan tipe magnitudo lain.



Gambar 2. Histogram magnitud vs jumlah gempa, katalog BMG dan *NEIC* (1973 - 2008).

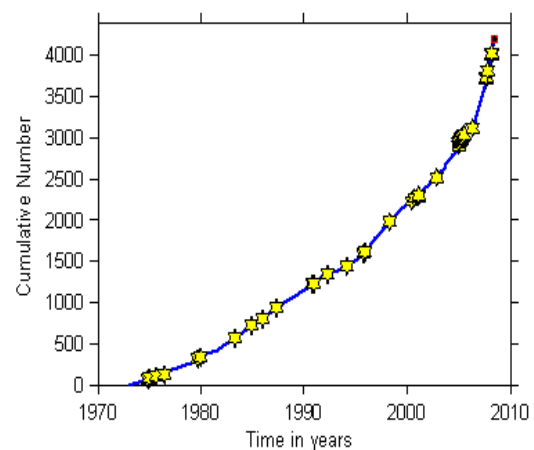
4.2 Pengolahan Data

Tahapan utama pengolahan data meliputi :

- Seleksi data dan penyeragaman magnitudo ke magnitudo moment (M_w) dan dekluster katalog.
- Plot distribusi frekuensi magnitudo untuk melihat kelengkapan data sehingga diketahui kelengkapan magnitudo (M_c).
- Perhitungan nilai- b , nilai- a , periode ulang menggunakan program *ZMAP* (Wiemer&Wyss, 2002).

Perhitungan Nilai- b menggunakan metode *maximum likelihood* dan *weighted least*

square. Berdasarkan plot kumulatif kegempaan (Gambar 3), selanjutnya periode kegempaan dibagi menjadi dua, yaitu Januari 1973 - November 2004 sebagai *periode observasi* dan Januari 1973 - Juni 2008 sebagai *periode analisis*. Pemetaan spasial nilai- b , wilayah penelitian dibagi menjadi grid-grid dan parameter seismotektonik dihitung untuk tiap titik grid dalam radius konstan atau jumlah gempa konstan. Bila menggunakan metode ini, radius tidak divariasikan terhadap densitas gempa di wilayah tersebut. Dalam analisis ini dipilih kriteria yaitu jumlah gempa $N=80$ atau radius konstan 110 km dan grid pengolahan data $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$.



Gambar 3. Plot kumulatif gempabumi dan gempa magnitud lebih besar 6,8 (warna kuning).

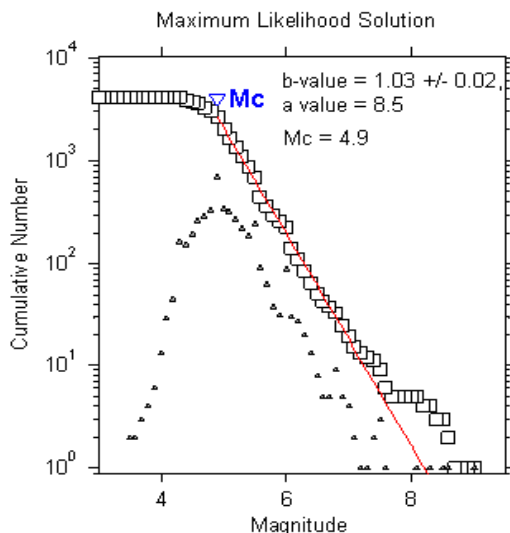
5. HASIL DAN ANALISIS

Perhitungan dan pemetaan parameter seismotektonik dilakukan dengan *software ZMAP*, dengan memilih radius konstan, jumlah gempa yaitu 80, dan M_c yang digunakan. Selanjutnya nilai- b dihitung menggunakan luasan lingkaran yang berpusat pada node (pusat grid).

5.1 Distribusi Frekuensi-Magnitudo

Distribusi frekuensi magnitudo (Gambar 4) menggambarkan distribusi katalog tentang bagaimana hubungan magnitudo dan jumlah gempa yang terjadi. Parameter paling penting dalam menentukan nilai- b dan nilai- a adalah *magnitude completeness* (M_c) dimana diperlukan deskripsi akurat dari M_c lokal karena M_c pada wilayah penelitian sangat

bervariasi. M_c ini dapat diperoleh dengan cukup akurat dari data observasi dengan mengasumsikan sebuah *power-law distribution* sehingga kehilangan data diujung katalog dapat dimodelkan. Nilai M_c di wilayah penelitian seperti pada Gambar 4, dimana M_c sekitar 4,6. Nilai M_c ini sangat berpengaruh terhadap penentuan nilai- b dengan metode maksimum likelihood.



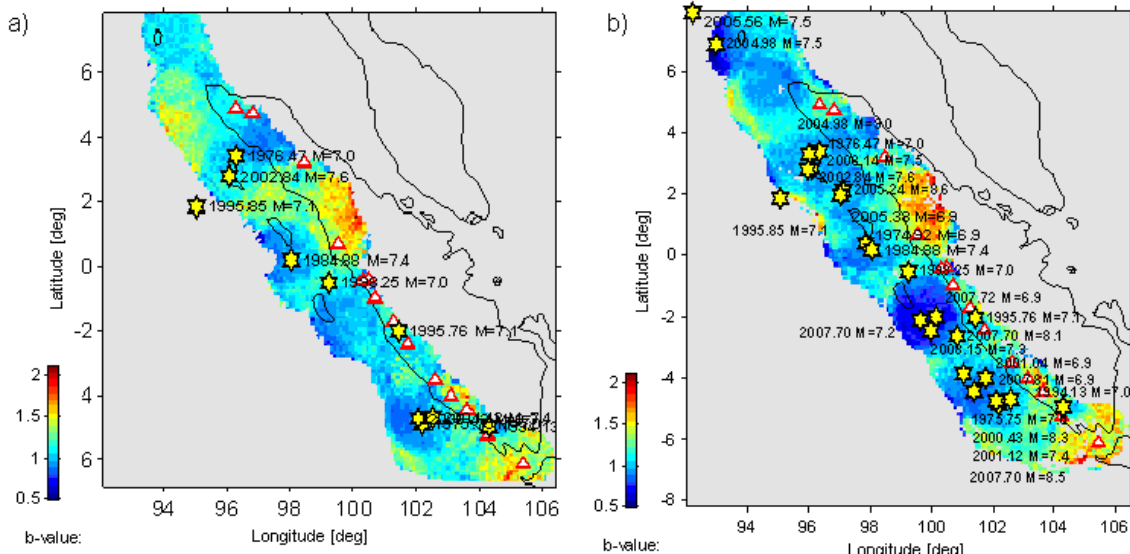
Gambar 4. Distribusi frekuensi-magnitudo kegempaan di wilayah Sumatera, slope dari kurva merupakan nilai- b dari relasi Gutenberg-Richter.

5.2 Analisis

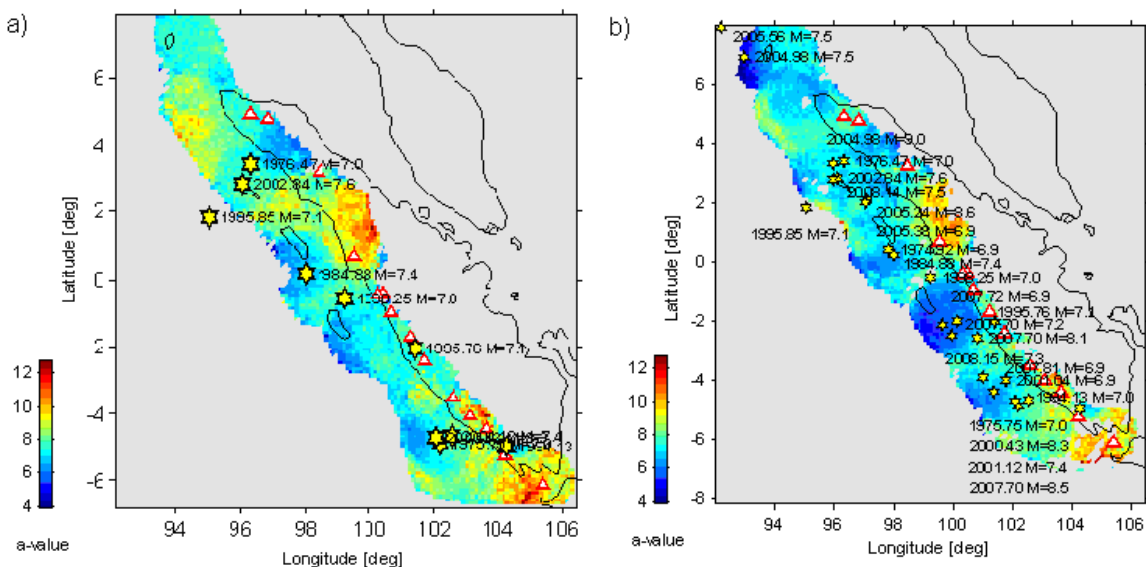
Plot kumulatif gempabumi dimana menunjukkan adanya perubahan arah slope sekitar tahun 2004 (Gambar 3), yang menunjukkan adanya peningkatan aktivitas kegempaan setelah mulai tahun 2004 terutama setelah gempa Aceh (26 Desember 2004). Dari distribusi frekuensi magnitudo (Gambar 4) diketahui kelengkapan magnitudo (M_c) dari

katalog 4,9, hal ini menunjukkan kombinasi katalog BMG dan *NEIC* merekam dengan baik gempa dengan magnitudo terkecil 4,9. Dari distribusi frekuensi magnitudo diperoleh parameter seismotektonik secara umum, nilai b yaitu 1,03, sedangkan nilai- a yaitu 8,5. Dengan wilayah kegempaan Sumatera yang relatif luas besarnya nilai- b seperti hasil penelitian sebelumnya di beberapa wilayah lain (misal Wyss, 1973) didapatkan nilai- b mendekati satu. Nilai- a menunjukkan tingkat keaktifan gempabumi, dengan nilai- a 8,5 berarti wilayah Sumatera memiliki keaktifan kegempaan yang tinggi. Besarnya parameter ini bergantung banyaknya kejadian dan untuk wilayah tertentu bergantung pada penentuan volume dan *time window*.

Pada *periode observasi* (Januari 1973 - November 2004), variasi parameter seismotektonik secara spatial dapat dilihat pada gambar 5.a dan gambar 6.a. Pada Gambar 5.a tampak variasi spatial nilai- b hingga bulan November 2004, terlihat adanya nilai- b yang relatif rendah, yaitu di sekitar Andaman, pulau Simeuleu, Nias, kepulauan Mentawai dan sekitar Bengkulu. Korelasi stress yang tinggi dengan nilai- b yang relatif rendah jelas terlihat, hal ini dibuktikan dengan terjadinya gempa-gempa besar pada wilayah dengan nilai- b yang rendah pada tahun berikutnya. Berdasarkan hasil penelitian para ahli sebelumnya bahwa nilai- b yang rendah biasanya bekorelasi dengan tingkat stress yang tinggi, sedangkan nilai- b tinggi sebaliknya. Selain itu, wilayah dengan heterogenitas yang besar berkorelasi dengan harga nilai- b yang tinggi (Mogi, 1962).



Gambar 5. a) Peta variasi spasial nilai-b wilayah Sumatera, periode observasi (1973 - 2004),
b) Peta variasi nilai-b, periode analisis (1973 - 2008).



Gambar 6. a) Peta variasi spasial nilai-a wilayah Sumatera, periode observasi (1973 - 2004),
b) Peta variasi nilai-a, periode analisis (1973 - 2008).

Distribusi spasial nilai-a (Gambar 6.a) tampak mirip dengan sebaran nilai-b, dimana nilai-a yang rendah juga terjadi di wilayah sekitar Andaman, pulau Simeuleu, Nias, kepulauan Mentawai dan sekitar Bengkulu. Nilai-a yang rendah menunjukkan aktivitas kegempaan yang relatif rendah, yang berarti adanya akumulasi energi (*asperity*) di wilayah-wilayah tersebut, demikian sebaliknya wilayah dengan nilai-a yang rendah. Nilai absolut dari b dan variabilitasnya, sangat bergantung pada akurasi dari katalog gempa bumi, homogenitas dan panjang

katalog, teknik perhitungan dan algoritma yang digunakan.

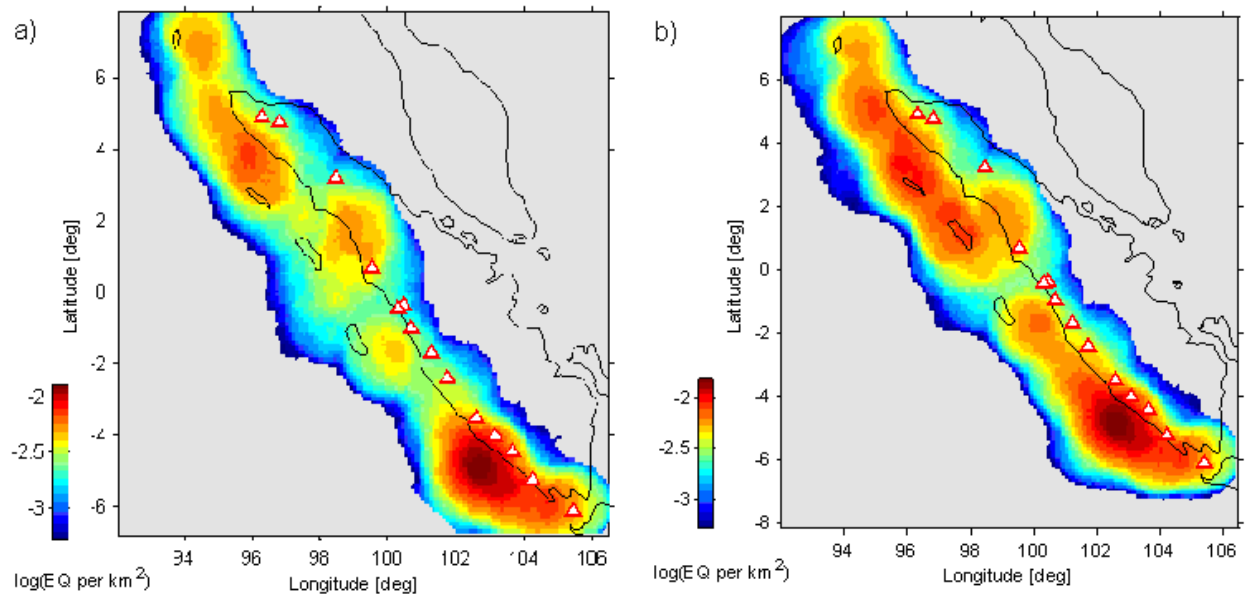
Parameter seismotektonik pada *periode analisis* (Januari 1973 - Juni 2008) secara spasial tampak pada Gambar 5.b dan 6.b, pada Gambar 5.b tampak nilai-b yang rendah di sekitar Andaman, Aceh, pulau Simeuleu, Nias, kepulauan Mentawai dan sekitar Bengkulu. Dari analisis sebelumnya dapat ditafsirkan di wilayah ini masih berpeluang terjadi gempa besar di waktu yang akan datang. Indikasi tersebut juga tampak dari

variasi spasial parameter seismik atau nilai-a, dimana pada wilayah tersebut memiliki nilai-a yang relatif rendah. Dari variasi spasial parameter seismotektonik dan densitas kegempaan (Gambar 8) juga mengindikasikan adanya zona gap kegempaan (*seismic gap*) di wilayah sebelah barat Padang, hal ini juga perlu diwaspadai sebagai zona yang berpotensi gempa besar. Fenomena kekosongan gempa pada wilayah ini dimungkinkan juga sebagai akibat kelemahan program analisis parameter gempa yang tidak pernah ada lintang episenter bernilai tepat nol.

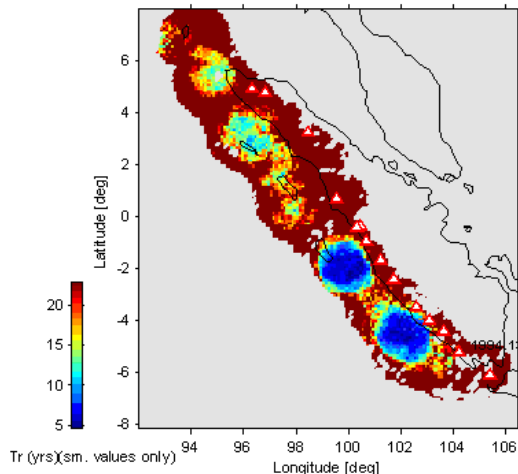
Menurut Scholz (1968) menyatakan bahwa nilai-b memiliki hubungan yang jelas terhadap stress di dalam suatu volume batuan. Dalam eksperimennya, ia mengamati bahwa penurunan b berhubungan dengan kenaikan stress di dalam batuan. Pada penelitian akhir-akhir ini pada katalog global dan katalog regional yang berbeda menunjukkan bahwa nilai-b secara signifikan lebih rendah untuk

gempa yang terkait dengan thrust dibandingkan dengan normal dan patahan strike-slip (Schorlemmer et al., 2005). Karena tipe patahan secara langsung dibangkitkan oleh orientasi dan magitude pada regime stress suatu wilayah, hal ini membuktikan bahwa stress memiliki pengaruh pada b.

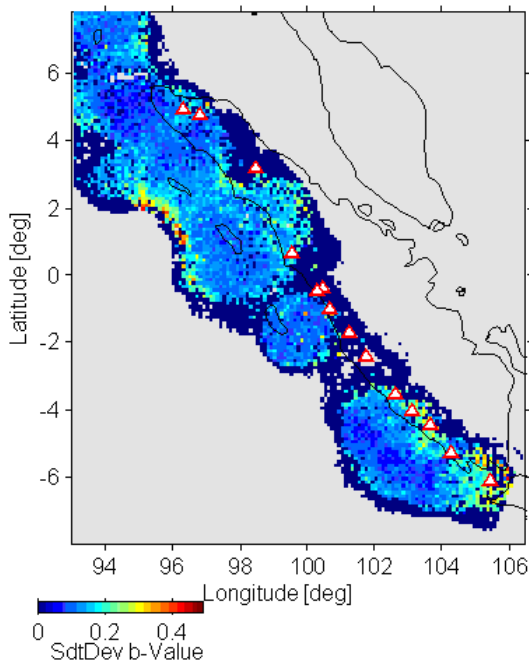
Pada Gambar 8, tampak bahwa gempabumi dengan magnitud 6,8 di wilayah ini memiliki periode ulang yang berbeda-beda yaitu sekitar 5 hingga sekitar 23 tahun. Periode ulang sekitar lima tahun meliputi sekitar pulau Enggano dan kepulauan Mentawai, sedangkan periode ulang sekitar 8 tahun meliputi Aceh dan pulau Simeuleu. Periode ulang yang pendek biasanya berkorelasi dengan nilai-b dan nilai-a yang rendah. Periode ulang gempabumi yang pendek berkorelasi dengan wilayah dengan aktivitas kegempaan yang relatif tinggi.



Gambar 7. a) Peta densitas kegempaan wilayah Sumatera, periode observasi (1973-2004).
b) Peta densitas kegempaan wilayah Sumatera, periode analisis (1973-2008).



Gambar 8. Peta periode ulang gempabumi, $M=6,8$ di wilayah Sumatera.



Gambar 9. Peta standar deviasi nilai-b berkisar antara 0 hingga 0,5.

6. KESIMPULAN

Berdasarkan studi variasi parameter seismotektonik di wilayah Sumatera-Andaman dapat disimpulkan bahwa :

- 1 Berdasarkan distribusi spasial seismotektonik pada *periode observasi*, (Januari 1973 - November 2004) mengindikasikan bahwa wilayah dengan nilai-b yang rendah berpotensi terjadi gempa besar, hal ini terjadi di wilayah Andaman, pulau Simeuleu, Nias, kepulauan Mentawai dan sekitar

Bengkulu yang memiliki nilai-b rendah sebelum gempa-gempa besar pada tahun berikutnya.

- 2 Parameter seismotektonik pada *periode analisis*, (Januari 1973 – Juni 2008) secara spasial didapatkan nilai-b yang rendah di sekitar Andaman, Aceh, pulau Simeuleu, Nias, kepulauan Mentawai dan sekitar Bengkulu. Dari analisis sebelumnya dapat ditafsirkan di wilayah ini masih berpeluang terjadi gempa besar di waktu yang akan datang.
- 3 Periode ulang gempabumi dengan magnitude 6,8 di wilayah Sumatera bervariasi sekitar 5 hingga sekitar 23 tahun. Periode ulang sekitar lima tahun diantaranya meliputi sekitar pulau Enggano dan kepulauan Mentawai.

DAFTAR PUSTAKA

1. Aki, K. 1965, Maksimum likelihood estimate of b-values in the formula $\log N = A - bM$ and its confidence limits, *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokio Univ.* 43, 237- 240.
2. Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1964. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 32: 163-191.
3. Hamilton, W., 1979, Tectonics of Indonesian Region, *U.S Geol. Survey, Prof. Paper*, 1078, Washington, 345 pp.
4. Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 84: 2348-2350.
5. Ishimoto, M. and Iida, K., 1939. *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo* 17: 443-478 (in Japanese with French abstract).
6. Mogi, K., 1962. Magnitude-frequency relationship for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 40: 831-883.
7. Nuannin, P.-, Kulhanek, O. and Persson, L., 2005. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L11307.

8. Shi, Y., and B.A. Bolt (1982), The standard error of the magnitude-frequency b value, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1677-1687.
9. Scholz, C. H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58: 399-415.
10. Schorlemmer, D., S. Wiemer, and M. Wyss (2004), Earthquake statistics at Parkfield, Stationarity of b -values, *J. of Geophys. Res.* 109, B12307, doi10.1029/2004-JB003234.
11. Ustu, T. (1965), A method in determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude frequency for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 13, 99-103.
12. Wesnouski, S.G., Scholz, C.H., Shimazaki, K. and Matsuda, T., 1983. Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *J. Geophys. Res.*, 88: 9331-9340.
13. Wiemer S., and M. Wyss, (2002), Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes, *Adv. Geophys.*, 45, 259–302.
14. Wyss, M., (1973), Towards a physical understanding of earthquake frequency distribution. *Geophys. J. R. astron. Soc.*, 31, 341– 359.