

STUDI SEISMOTEKTONIK SEBAGAI INDIKATOR POTENSI GEMPABUMI DI WILAYAH INDONESIA

Supriyanto Rohadi

Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah II Jakarta

ABSTRAK

Distribusi aktivitas kegempaan di suatu wilayah dapat diketahui melalui analisis parameter seismotektonik menggunakan relasi Gutenberg-Richter, analisis ini mampu memberikan informasi penting terkait dengan usaha mitigasi bencana gempabumi. Pada penelitian ini, analisis parameter seismotektonik menggunakan data relokasi gempabumi dari katalog EHB (1964-2005) dan katalog BMKG (2006-2008). Wilayah penelitian meliputi wilayah kegempaan, dengan batas 10° LS - 8° LU dan 92° BT -142° BT, yaitu meliputi wilayah Indonesia dan sekitarnya. Perhitungan parameter seismotektonik menggunakan metode maksimum likelihood dengan software ZMAP. Dari analisis data diperoleh bahwa distribusii spasial nilai-a berkisar 4,0 – 12,1 dan distribusi nilai-b berkisar antara 0,6 – 1,8, sedangkan periode ulang gempabumi Mw 6,5 berkisar 4 – 12 tahun. Pola distribusi nilai-b yang tinggi bersesuaian dengan nilai-a yang tinggi pula, sedangkan periode ulang gempa pendek di wilayah tersebut.

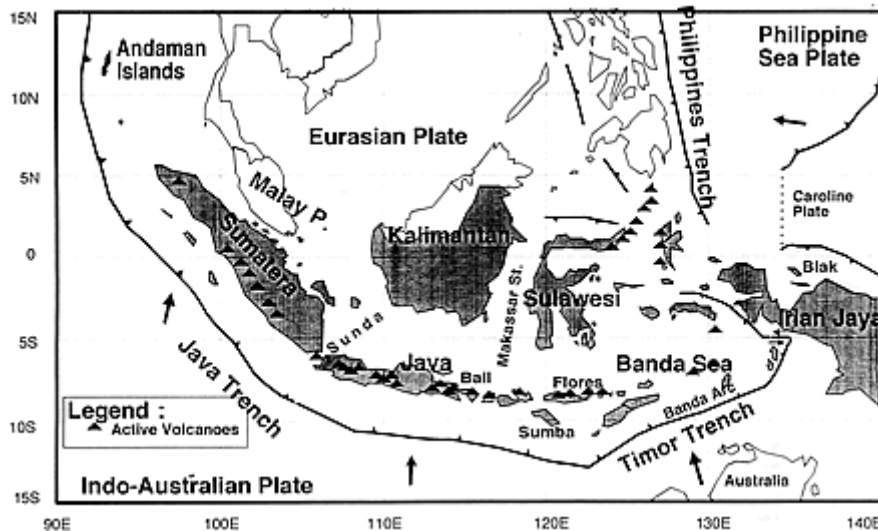
ABSTRACT

Earthquake activity distribution can be inferred from analyzing seismo-tectonic parameter in its region by using Gutenberg-Richter relation. This analysis result important information for earthquake mitigation. This research analyze earthquake relocation data from EHB catalogue (1964-2005) and BMKG catalogue (2006-2008). Area of interest is Indonesia region and its vicinity, 10° S - 8° N dan 92° E -142° W. Maximum likelyhood method to computating of these parameter by using ZMAP software. The b-value relating the number of large to small earthquakes of indonesia region is estimated to be 0,6 – 1,8. From the spatial variability of b-value show that some region with low value have a larger risk of relatively big earthquake. Some region which have higher a-value usually are very active seismicity region. Return periode of relatively big eartquake (M=6,5) are about 2 – 12 years. Temporal variability of b-value show that have decrease before a large earhtquake, but need more ressearh to be used this value as a earhtquake precursor.

1. PENDAHULUAN

Gempabumi di zona subduksi Sumatera dan Jawa, sebagai akibat dari pergerakan Lempeng Indo-Australia yang relatif bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam, Gempabumi *Sumatera-Andaman* tanggal 26 Desember 2004, dengan magnitudo Mw 9,0 termasuk tiga gempabumi terbesar yang terekam dalam sejarah, gempa yang mengakibatkan tsunami ini menelan korban lebih dari 200 ribu jiwa. Gempabumi *Nias-Simeulue*, 28 maret 2005 dengan magnitudo Mw 8,7 merupakan gempabumi terbesar kedua yang terjadi pada dekade ini yang juga menimbulkan tsunami. Gempabumi *Yogyakarta*, 27 Mei 2006, dengan episenter 8.26°LS, 110.31°BT, magnitudo 5.9 merupakan aktivitas sesar Opak. Gempabumi *Pangandaran* 17 Juli 2006, episenter 9.46°LS, 107.19°BT, magnitudo 6.8 yang mengakibatkan tsunami. Gempabumi *Papua* 4 Januari 2009, 02:43 WIB, 7,2 dan gempa pukul 05:33 WIB, 7,6 adalah akibat subduksi muda lempeng Pasifik yang terjadi di zona subduksi megathrust dimana merupakan wilayah yang menimbulkan gempa-gempa besar di dunia.

Untuk memahami proses yang mengontrol gempa besar memerlukan pengetahuan mengenai karakteristik seismotektonik dan variasi spasialnya. Pada umumnya nilai-b secara global yang diperoleh di berbagai wilayah aktif gempa adalah satu. Secara regional, perubahan nilai-b dipercaya berbanding terbalik dengan perubahan tingkat stress (Bufe, 1970; Gibowicz, 1973). Nilai-b yang rendah dapat disimpulkan bahwa stress tinggi di wilayah tersebut. Nuannin et. al, 2005 melakukan penelitian variasi spasial dan temporal nilai-b untuk wilayah Sumatera-Andaman, diperoleh variasi terhadap waktu dari 1,1 hingga 1,78. Dari pemetaan nilai-b secara spasial mengindikasikan wilayah dengan nilai-b rendah merupakan wilayah konsentrasi stres. Hasil penelitiannya mendukung hipotesa potensi nilai-b sebagai potensi precursor. Dari pengamatan variasi ruang nilai-b, diketahui bahwa nilai-b mencerminkan aktivitas stress lokal, dimana perubahan nilai-b yang signifikan telah teramati di beberapa *regime stress* seperti zona subduksi lempeng dan zona patahan. Penelitian ini difokuskan pada variasi distribusi seismotektonik sebagai informasi potensi kegempaan dalam hubungannya dengan mitigasi bencana gempabumi.



Gambar 1. Peta Lempeng utama yang berperan sebagai pembangkit aktivitas kegempaan di Indonesia, yaitu lempeng Eurasian, Australia, Pasifik dan lempeng laut Philippina (<http://www.drs.dpri.kyoto.u.ac.jp/eqtap/report/indonesia>)

2. TEKTONIK SETING

Kegempaan di wilayah Indonesia merupakan konsekuensi dari aktivitas empat lempeng utama yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik dan lempeng laut Phillipina (Gambar 1). Sedangkan struktur tektonik busur sunda terbentuk akibat tumbukan lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia sekitar 50 juta tahun yang lalu. Lempeng Indo-Australia yang relatif bergerak ke utara bertemu dengan lempeng Eurasia yang relatif diam dan diperkirakan kecepatan pergerakannya sekitar 5,5 cm/th di Sumatera dan sekitar 6,5 di Jawa. Bagian timur Indonesia, aktivitas kegempaan merupakan aktivitas pada batas kontinen Australia, Asia Tenggara dan lempeng Samudera Pasifik serta lempeng Philipina bertemu dengan kecepatan 8cm/th hingga 11 cm/th.

Kepulauan Indonesia khususnya telah mengalami proses tektonik aktif yang menghasilkan fenomena seperti pembentukan gunung api, penghancuran kontinen, zona subduksi dan penutupan basin. Sebagian besar gunung api di Indonesia merupakan bagian dari busur Sunda, yang panjangnya sekitar 3000 km dari Sumatera bagian utara hingga ke Laut Banda. Sebagian besar gunung api ini merupakan hasil subduksi Lempeng Australia di bawah Lempeng Eurasia.

3. METODOLOGI

Hubungan frekuensi-magnitudo (*Frequency-Magnitude Distribution, FMD*) merupakan salah satu cara untuk mengetahui aktivitas kegempaan di suatu wilayah (gambar 2). 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 magnitudo.

Relasi Getenberg-Richter

Metode untuk mengetahui parameter seismik dan tektonik suatu wilayah adalah dengan hubungan Gutenberg-Richter dituliskan sebagai :

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

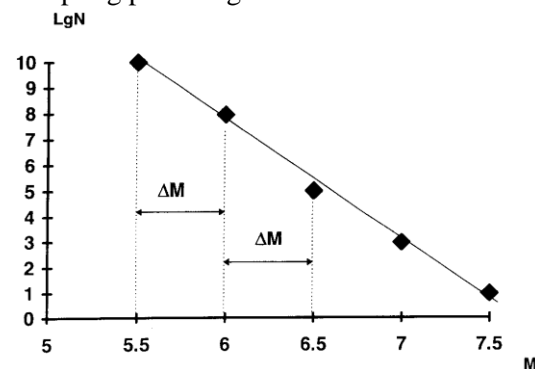
dimana $n(M)$ adalah jumlah gempabumi dengan magnitudo M . Nilai- a merupakan parameter seismik yang besarnya bergantung banyaknya gempa dan untuk wilayah tertentu bergantung pada penentuan volume dan *time window*. Nilai- b merupakan parameter tektonik biasanya mendekati 1 dan menunjukkan jumlah relatif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

$$b = \frac{0.434}{\bar{M} - M_{\min}} \quad \dots (2)$$

dimana \bar{M} adalah magnitudo rata-rata dan M_{\min} adalah magnitudo minimum atau *magnitude completeness*. Perhitungan Standar deviasi menggunakan formula dari Shi dan Bolt (1982) sebagai berikut :

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

dimana n adalah jumlah gempa pada sampling perhitungan.



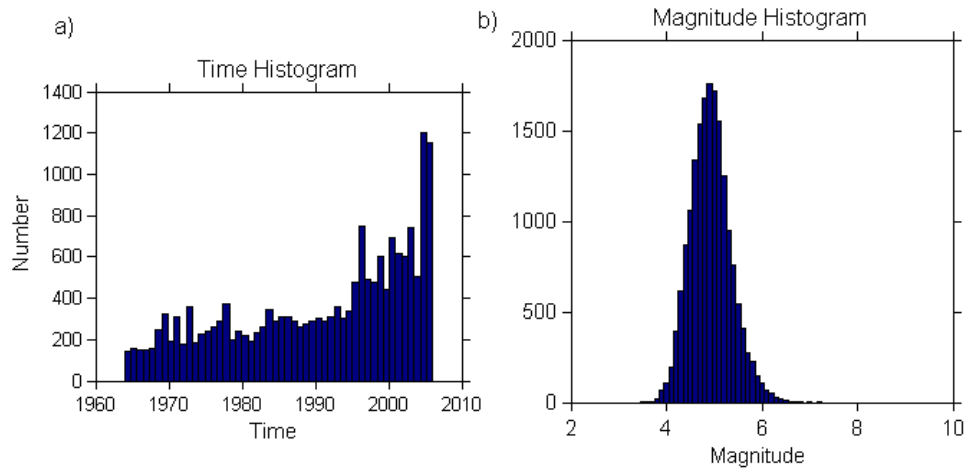
Gambar 2. Relasi Gutenberg-Richter yang menggambarkan hubungan logaritma jumlah gempa dan magnitudo.

4. DATA DAN PENGOLAHAN

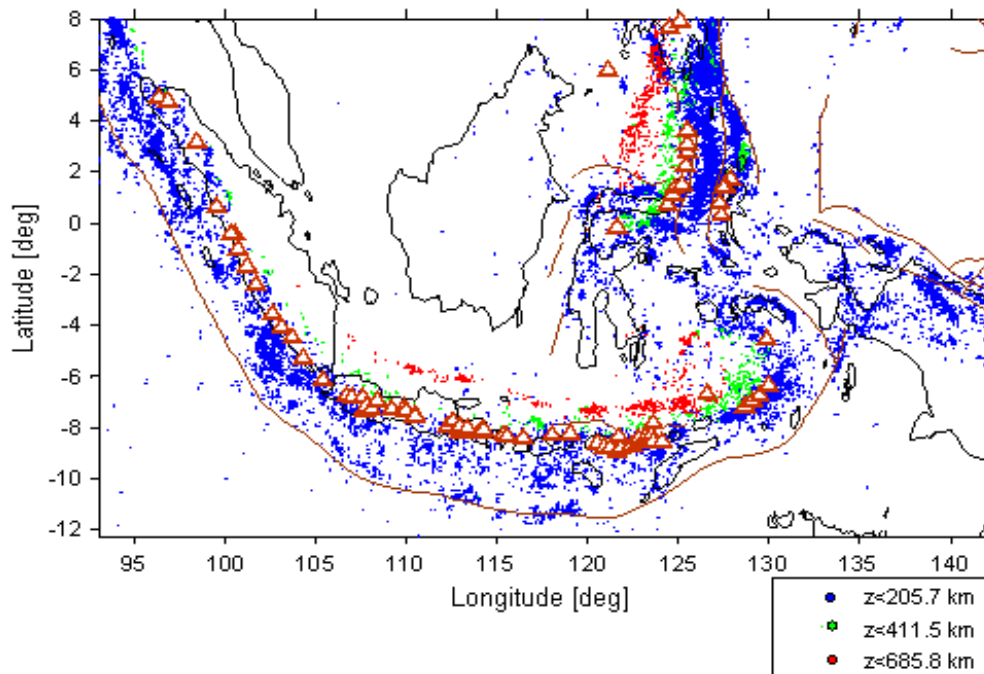
4.1. Data

Data gempa bumi (1964-2005) dari katalog reanalisis *EHB* (Engdahl *et al.*, 1998) dan katalog BMKG (2006-2008) wilayah Indonesia dan sekitarnya, meliputi batas $12,0^{\circ}$ LS - $8,0^{\circ}$ LU dan 92° BT - 142° BT. Data berjumlah 18289 gempa setelah

dilakukan seleksi data untuk magnitudo lebih besar nol diperoleh 17768 gempa, dengan magnitudo moment (M_w) antara 3,5 hingga 7,2 (Gambar 3 a,b dan 4). Dekluster secara manual dengan membuang gempa susulan sehingga diperoleh gempa bumi yang *independent*.



Gambar 3. a) Histogram jumlah gempa vs tahun, b) Histogram magnitudo vs jumlah gempa, katalog *EHB*(1964 - 2005), Engdahl *et al.* (1998)



Gambar 4. Peta plot kegempaan di wilayah Indonesia dengan magnitudo M_w 3,5-7,2 katalog *EHB*(1964 - 2005), Engdahl *et al.* (1998).

4.2. Pengolahan Data

Berdasarkan katalog Engdahl yaitu tahun 1964-2005 diasumsikan sebagai *periode observasi*. Dari katalog BMKG untuk validasi potensi kegempaan yang disiratkan dari variasi spasial nilai-b. Tahapan utama pengolahan data meliputi :

- i. Seleksi data dan dekluster katalog.
- ii. Plot distribusi frekuensi magnitudo untuk melihat kelengkapan data sehingga diketahui kelengkapan magnitudo (Mc).
- iii. Perhitungan Nilai-b menggunakan metode *maximum likelihood*, menggunakan program *ZMAP* (Wiemer&Wyss, 2002).
- iv. Pemetaan spasial nilai-b, wilayah penelitian dibagi menjadi grid-grid dan parameter seismotektonik dihitung untuk tiap titik grid dengan kombinasi radius konstan atau jumlah gempa konstan.

Dalam analisis ini dipilih kriteria yaitu jumlah gempa $N=50$ dan grid pengolahan data $0,1^\circ \times 0,1^\circ$.

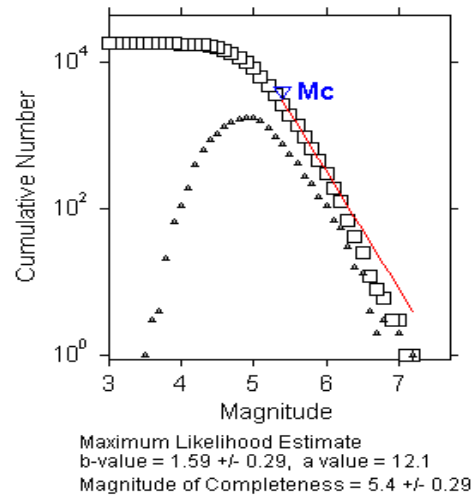
5. HASIL DAN ANALISIS

Dari perhitungan dan pemetaan parameter seismotektonik selanjutnya diperoleh peta distribusi spasial seismotektonik dan periode ulang gempabumi.

5.1. Distribusi Frekuensi-Magnitudo

Distribusi frekuensi magnitudo pada Gambar 5, menggambarkan hubungan magnitudo dan jumlah gempa yang terjadi. Disini kurva ini diperoleh *magnitude completeness* (Mc) dengan cukup akurat dari data observasi dengan mengasumsikan sebuah *power-law distribution*. Nilai Mc di wilayah Indonesia dari katalog *EHB* didapatkan sekitar 5,4. Dari nilai Mc ini dapat disimpulkan bahwa katalog *EHB* hanya memuat gempabumi yang relatif besar. Dari kurva ini pula diperoleh secara umum nilai b menggunakan metode

maksimum likelihood berkisar 1,59, sedangkan nilai-a berkisar antara 12,1.



Gambar 5. Plot distribusi frekuensi-magnitudo kegempaan di wilayah Indonesia dengan metode Maksimum Likelihood.

5.2. Analisis

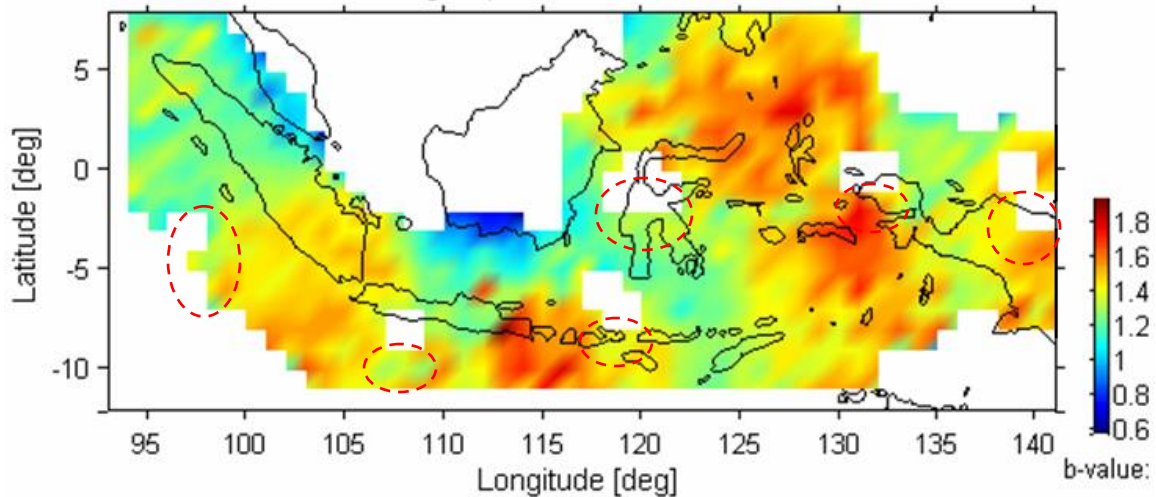
Berdasarkan distribusi spasial seismotektonik variasi nilai-b berkisar dari 0,6-1,8, sedangkan variasi nilai-a sekitar 4,0-12,1. Distribusi spasial seismotektonik yang relatif tinggi (Gambar 6), meliputi pantai barat Sumatera (Bengkulu) hingga bagian selatan Jawa Barat, sebelah selatan Jawa timur dan selatan Bali, laut Banda dan utara Sulawesi. Wilayah dengan parameter seimotektonik yang tinggi ini dapat disimpulkan sebagai daerah sangat aktif gempabumi.

Selain itu terdapat wilayah yang tidak dapat dihitung parameter seismotektoniknya karena kurangnya jumlah gempa di wilayah tersebut, seperti di sekitar Simeleu, selatan Sukabumi, sekitar Palu, Manokwari Papua dan sekitar Jayapura, wilayah ini berpotensi gempa yang relatif besar. Korelasi stres 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 atau wilayah yang memiliki gap kegempaan setelah tahun 2005 (Gambar 6 - 9). Berdasarkan hasil penelitian para ahli

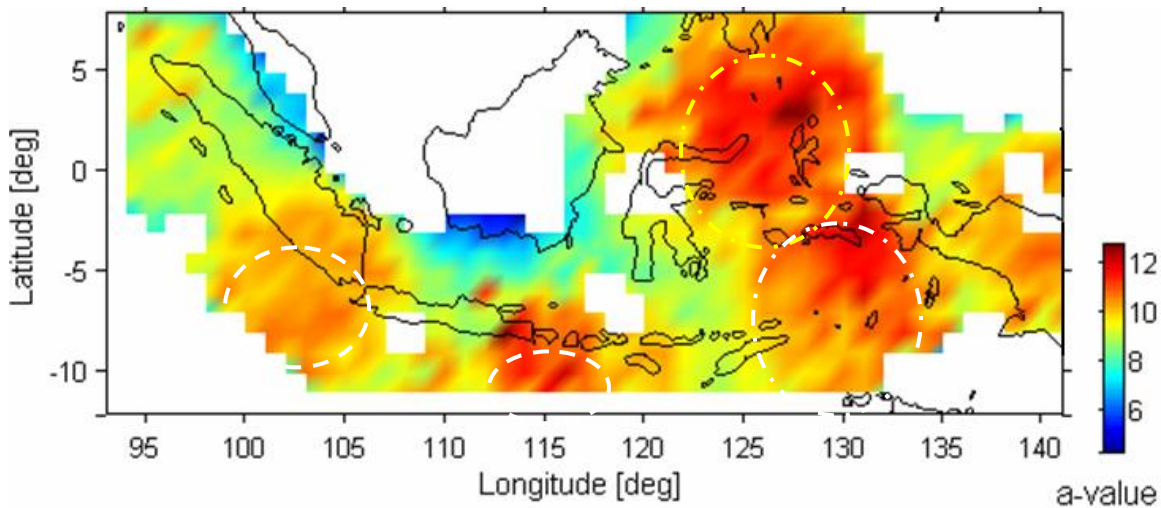
sebelumnya bahwa nilai-b yang rendah biasanya berkorelasi dengan tingkat stres yang tinggi, sedangkan nilai-b tinggi sebaliknya. Scholz (1968) mengamati bahwa terdapat penurunan b dengan kenaikan stres di dalam batuan.

Nilai-a yang rendah di zona aktif gempa menunjukkan aktivitas kegempaan yang relatif rendah (Gambar 7), yang dapat ditafsirkan adanya akumulasi energi

(*asperity*) di wilayah-wilayah tersebut. Namun demikian di wilayah Indonesia akumulasi stress tetap tinggi di wilayah aktivitas kegempaan tinggi (nilai-a tinggi), hal ini dibuktikan dengan masih terjadinya gempa besar di wilayah dengan nilai-a yang tinggi, yaitu Bengkulu, laut Banda dan di utara Sulawesi.



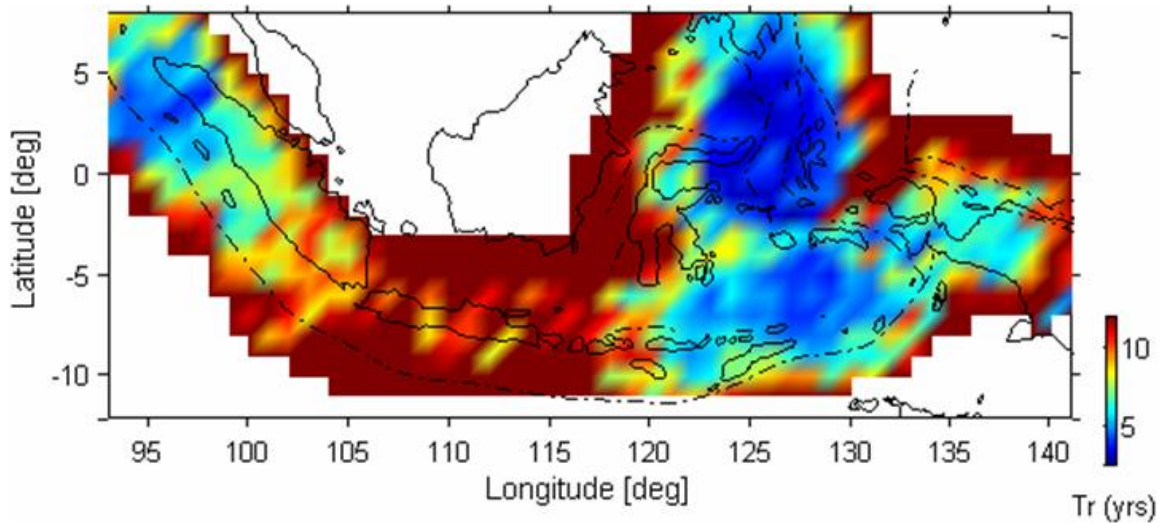
Gambar 6. Peta distribusi spasial nilai-b wilayah Indonesia dari katalog kegempaan *EHB*, dari tahun 1964 - 2005.



Gambar 7. Peta distribusi spasial nilai-a wilayah Indonesia dari katalog *EHB*, tahun 1964- 2005

Pada Gambar 8 ditunjukkan bahwa di wilayah ini gempabumi dengan magnitudo 6,5 memiliki periode ulang yang bervariasi, yaitu sekitar 4 hingga 12 tahun. Periode ulang yang rendah biasanya berhubungan

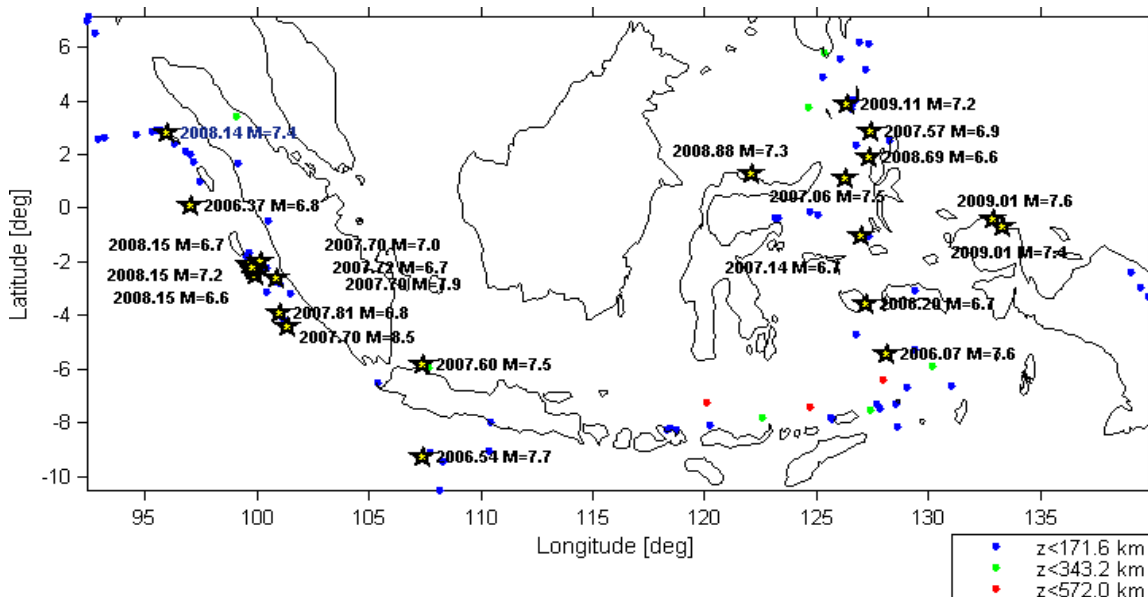
dengan wilayah yang memiliki parameter seismotektonik tinggi. Dengan kata lain periode gempabumi yang pendek berkorelasi dengan wilayah yang memiliki aktivitas kegempaan yang tinggi.



Gambar 8. Peta periode ulang gempa bumi dengan magnitudo M_w 6,5 di wilayah Indonesia, dengan *time recurrence* (T_r) berkisar 2 hingga sekitar 12 tahun.

Pola distribusi spasial nilai-a dan nilai-b memiliki pola yang sama, di mana wilayah dengan nilai-b tinggi juga memiliki nilai-a yang tinggi pula. Nilai absolut dari seismotektonik dan variabilitasnya sangat

bergantung pada akurasi dari katalog gempa bumi, homogenitas dan panjang katalog, teknik perhitungan dan algoritma yang digunakan



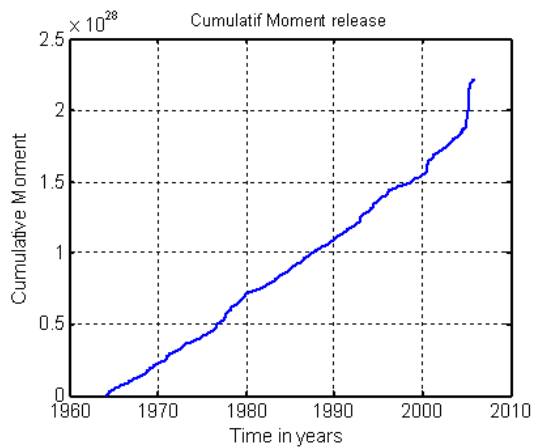
Gambar 9. Kegempaan Indonesia dengan magnitudo lebih dari 6, dari Januari 2006 hingga Mei 2009 dari katalog BMKG.

Dari plot kumulatif *moment release* (Gambar 10) menunjukkan bahwa perubahannya relatif konstan kecuali setelah gempa Aceh tahun 2004. Hal ini

menunjukkan ada peningkatan energi yang dilepaskan dalam bentuk gempa bumi.

Histogram periode ulang gempa bumi (Gambar 11) menunjukkan bahwa di seluruh wilayah Indonesia gempa dengan magnitudo

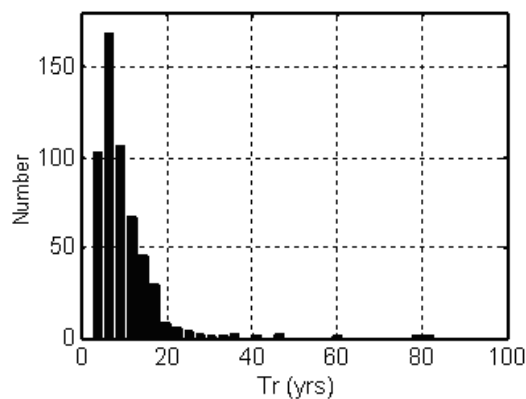
Mw 6,5 sebgaiian besar memiliki periode ulang yang relatif pendek yaitu sekitar 10 tahun.



Gambar 10. Plot kumulatif *moment release* dari tahun 1964-2005 wilayah Indonesia dari katalog *EHB*.

Tingkat densitas kegempaan wilayah Indonesia seperti ditunjukkan pada Gambar 12 (LAMPIRAN). Sumatera, Jawa bagian barat, laut Banda, utara Sulawesi dan sebagian wilayah Irian merupakan wilayah dengan densitas kegempaan yang tinggi.

Perhitungan parameter seismotektonik metode maksimum likelihood dengan 50 gempa per grid menunjukkan hasil dengan standar deviasi berkisar 0 hingga 0,6 (Gambar 13). Perhitungan dengan jumlah minimum 50 untuk mengurangi efek bias dari perhitungan parameter seismotektonik.



Gambar 11. Histogram periode ulang vs jumlah gempabumi Mw 6,5 dari seluruh

wilayah Indonesia dari katalog *EHB*.

6. KESIMPULAN

Dari hasil studi distribusi spasial parameter seismotektonik di wilayah Indonesia dapat disimpulkan bahwa :

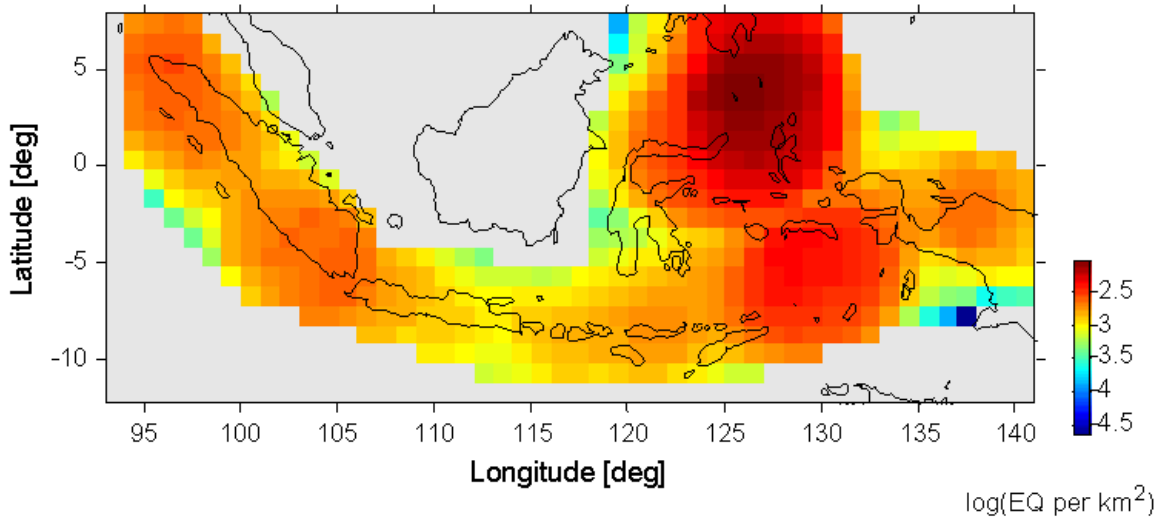
- 1 Distribusi spasial seismotektonik variasinya dari 0,6-1,8, sedangkan variasi nilai-a sekitar 4,0-12,1. Periode ulang gempabumi dengan magnitudo Mw 6,5 berkisar antara 4 hingga 12 tahun.
- 2 Distribusi spasial seismotektonik yang relatif tinggi, meliputi pantai timur Sumatera (Bengkulu) hingga bagian selatan Jawa Barat, sebelah selatan Jawa Timur dan selatan Bali, laut Banda dan utara Sulawesi.
- 3 Kumulatif *moment release* menunjukkan bahwa tidak terdapat perubahan yang drastis, kecuali setelah gempa Aceh tahun 2004.
- 4 Perlu studi lebih lanjut dengan katalog kegempaan yang lebih lengkap sehingga dapat mendukung metode variasi seismotektonik sebagai indikator tingkat potensi gempabumi suatu wilayah.

7. DAFTAR PUSTAKA

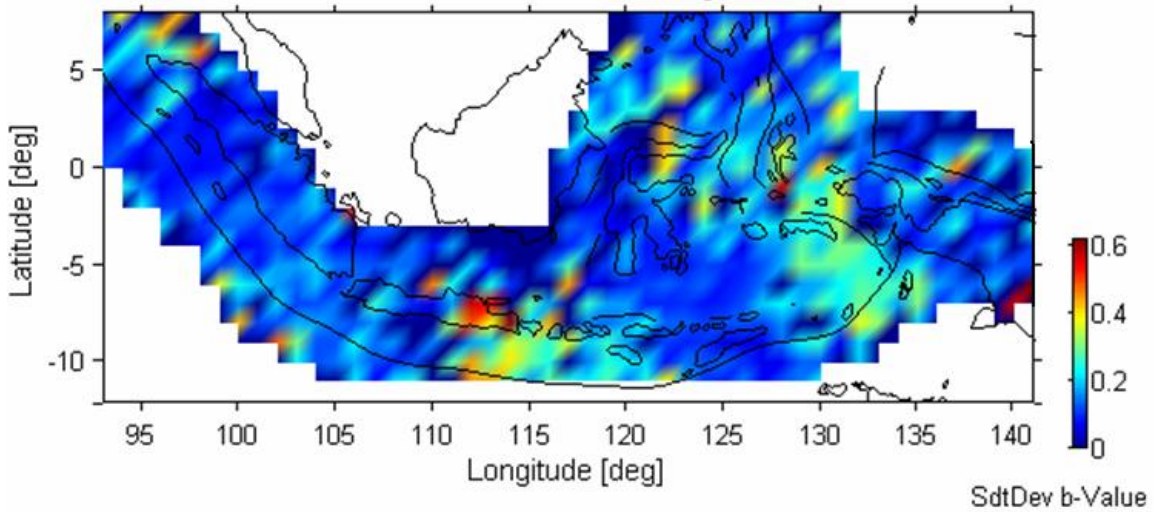
1. Aki, K. 1965, *Maksimum likelihood estimate of b-values in the formula $\log N = A - bM$ and its confidence limits*, Bull. Earthquake Res. Inst., Tokio Univ. 43, 237- 240.
2. Bufe, C.G. (1970), *Frequency-magnitude variations during the 1970 Danville earthquake swarm*, Earthquake Notes, 41, 3-6.
3. Gibowicz, S.J. (1973), *Variation of the frequency-magnitude relation during earthquake sequences in New Zealand*, Bull. Seismol. Soc. Am., 63, 517-528.
4. Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1942. *Earthquake magnitude, intensity, energy*

- and acceleration.* Bull. Seismol. Soc. Am., 32: 163-191.
5. Hamilton, W., 1979, *Tectonics of Indonesian Region*, U.S Geol. Survey, Prof. Paper, 1078, Washington, 345 pp.
 6. Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979. *A moment magnitude scale.* J. Geophys. Res., 84: 2348-2350.
 7. Ishimoto, M. and Iida, K., 1939. *Observations sur les seismes enregistres par le microsismographe construit dernièrement* (1). Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo 17: 443-478 (in Japanese with French abstract).
 8. 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.
 9. 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. Let., 32, L11307.
 10. Shi, Y., and B.A. Bolt (1982), The standard error of the magnitude-frequency b value, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1677-1687.
 11. Scholz, C. H. 1968. *The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes.* Bull. Seismol. Soc. Am., 58: 399-415.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Wiemer S., and M. Wyss, (2002), *Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes*, Adv. Geophys., 45, 259–302.
 16. Wyss, M., (1973), *Towards a physical understanding of earthquake frequency distribution.* Geophys. J. R. astron. Soc., 31, 341– 359.
 17. Data gempabumi (1964-2005) dari katalog reanalisis EHB (Engdahl et al., 1998) .
 18. Data gempabumi katalog BMKG (2006-2008).
 19. <http://www.drs.dpri.kyoto.u.ac.jp/eqtap/report/indonesia>

LAMPIRAN :



Gambar 12. Peta densitas kegempaan wilayah Indonesia, Sumatera, Jawa bagian barat, laut Banda, utara Sulawesi dan sebagian wilayah Irian merupakan wilayah dengan densitas kegempaan yang tinggi.



Gambar 13. Peta standar deviasi perhitungan nilai b dengan metode maksimum likelihood, standar deviasi berkisar 0 hingga 0,6.