

# ANALISA FRAKTAL DAN RASIO SLIP DAERAH BALI-NTB BERDASARKAN PEMETAAN VARIASI PARAMETER TEKTONIK

*Bambang Sunardi*  
Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG

## ABSTRACT

*Earthquake distributions are indirectly considered fractal, and the scaling parameter is called fractal dimension (D). Seismicity is characterized by tectonic parameter (b-value) and fractal dimension (D). Fractal dimension is related to the tectonic parameter (b-value) of the Gutenberg-Richter relation :  $\log N = -bM + a$ . Based on b-value mapping, fractal dimension and slip ratio of Bali-NTB region has been calculated in this research using NEIC catalogue 1973-2008. b-values in those regions which are located between latitudes  $6^{\circ}$  - $12^{\circ}$  S and longitudes  $114^{\circ}$ - $121^{\circ}$ E vary between 0.7-2. b-values are low in southern Sumbawa-Sumba islands and northern Lombok-Sumbawa islands. Fractal dimensions at cluster I and II are close to 2 which indicate that source distribution was in 2D space. Fractal dimension at cluster III is close to 3 which indicates that source distribution was in 3D space. Slip ratios at cluster I and II are close to 0.5 which reveals that about 50 % of the total slip has occurred on primary fault. Slip ratio at cluster III was close to 0 which reveals that all the slips occur on the smaller faults.*

**Keywords:** Fractal dimension, Slip ratio, b-value

## ABSTRAK

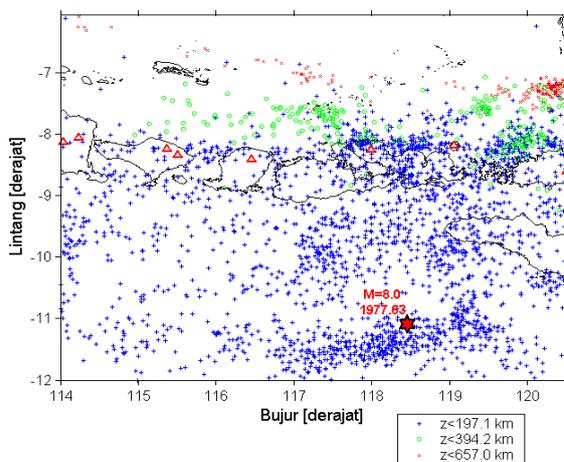
*Distribusi gempa bumi secara tidak langsung dapat dianggap sebagai fraktal dan parameter skalanya biasa dinamakan dimensi fraktal (D). Kegempaan dicirikan oleh parameter tektonik (nilai-b) dan dimensi fraktal (D). Dimensi fraktal berkaitan erat dengan parameter tektonik (nilai-b) dari relasi Gutenberg-Richter :  $\log N = -bM + a$ . Berdasarkan pemetaan nilai-b, dimensi fraktal dan rasio slip daerah Bali-NTB telah dihitung pada penelitian ini menggunakan katalog NEIC 1973-2008. Nilai-b pada daerah yang terletak antara  $6^{\circ}$ - $12^{\circ}$ LS dan  $114^{\circ}$ - $121^{\circ}$ BT bervariasi antara 0,7-2. Nilai-b yang rendah terletak disebelah selatan pulau Sumbawa-Sumba dan sebelah utara pulau Lombok-Sumbawa. Dimensi fraktal pada kluster I dan II mendekati 2 yang mengindikasikan bahwa distribusi sumber 2D. Dimensi fraktal pada kluster III mendekati nilai 3 yang mengindikasikan bahwa distribusi sumber 3D. Rasio slip pada kluster I dan II mendekati nilai 0,5 yang mengindikasikan bahwa sekitar 50 % total slip terjadi pada patahan utama. Rasio slip pada kluster III mendekati nilai 0 yang mengindikasikan semua slip terjadi pada patahan-patahan kecil.*

**Kata kunci:** Dimensi fraktal, Rasio slip, nilai-b

## 1. PENDAHULUAN

Daerah Bali-NTB merupakan salah satu daerah dengan tingkat kegempaan yang cukup aktif karena letaknya yang merupakan bagian dari busur sunda bagian timur. Secara tektonik, busur kepulauan Bali dan Nusa Tenggara berada di antara zona tumbukan lempeng Indo-Australia dengan Eurasia di bagian selatan dan patahan naik busur belakang Bali-Flores di bagian utara.

Daerah dengan batas  $6^{\circ}$ - $12^{\circ}$  LS dan  $114^{\circ}$ -  $121^{\circ}$  BT ini memiliki karakteristik gempabumi yang beruntun, dimulai dengan gempa pendahuluan, gempa utama dan selanjutnya diikuti oleh gempa-gempa susulan (Sulaiman, dkk., 2002). Distribusi Gempabumi yang terjadi pada umumnya berkedalaman dangkal di bagian selatan sementara distribusi gempa menengah dan dalam tersebar di bagian tengah dan utara dengan magnitudo terbesar yang tercatat sebesar 8 SR yang terjadi pada tahun 1977 pada posisi  $118,46$  BT dan  $11,09$  LS.



**Gambar 1.** Seismisitas daerah Bali-NTB berdasarkan Katalog NEIC 1973-2008.

Distribusi gempabumi secara tidak langsung dapat dianggap sebagai fraktal (Turcotte, dkk., 1997). Oleh karena distribusi gempabumi dianggap sebagai fraktal, maka parameter skalanya disebut dengan dimensi fraktal. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa fraktal senantiasa dicirikan oleh dimensinya ( $D$ ). Dengan demikian secara tidak langsung dimensi fraktal itu sendiri akan memberikan informasi tentang stabilitas daerah tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa dimensi fraktal serta rasio *slip* berdasarkan pemetaan variasi spasial parameter tektonik daerah Bali-NTB. Dengan mengetahui dimensi fraktal serta rasio *slip* diharapkan dapat diketahui karakteristik retakan serta berapa persen total pergeseran relatif (*slip*) yang terjadi pada patahan utama (primer) daerah penelitian. Diharapkan studi dan analisa fraktal dapat menjadi salah satu studi prekursor gempa-gempa berskala besar.

## 2. METODOLOGI

### 2.1. Distribusi Frekuensi-Magnitudo

Relasi antara frekuensi dan magnitudo oleh Gutenberg-Richter (1954) dinyatakan dalam suatu hubungan yang sederhana sebagai :

$$\log_{10}(N) = -bM + a \quad \dots (1)$$

$N$  merupakan jumlah gempabumi dengan magnitudo lebih besar atau sama dengan  $M$ .  $a$  dan  $b$  adalah konstanta. Konstanta  $a$  merupakan parameter aktivitas seismik yang secara umum mencerminkan tingkat seismisitas pada suatu wilayah selama periode tertentu dan biasa disebut juga sebagai index seismisitas. Nilai- $a$  bervariasi untuk suatu daerah dengan daerah lainnya bergantung pada periode pengamatan serta ukuran ruangannya.

### 2.2. Nilai- $b$

Konstanta  $b$  biasa dikenal dengan nilai- $b$  merupakan parameter tektonik. Banyak ahli menyatakan bahwa nilai- $b$  bergantung pada karakter tektonik dan tingkat stress atau struktur material suatu wilayah (Scholz, 1968; Hatzidimitriou, 1985; Tsapanos, 1990). Variasi nilai- $b$  suatu wilayah berhubungan dengan heterogenitas struktur dan distribusi stress wilayah tersebut (Scholtz, 1968; Biswas, 1988). Nilai- $b$  dapat diperkirakan dengan cara statistik, salah satunya yang dikemukakan oleh Utsu (1965) yang dikenal dengan metode estimasi maksimum likelihood (MLE) sebagaimana persamaan berikut :

$$b = \frac{1}{M - M_{\min}} \log_{10} e \quad \dots (2a)$$

$$b = \frac{0,4343}{\bar{M} - M_{\min}} \quad \dots (2b)$$

dimana  $\bar{M}$  merupakan magnitudo rata-rata dan  $M_{\min}$  merupakan magnitudo minimum. Nilai standar deviasinya dapat ditentukan menggunakan formula dari *Shi and Bolt* (1982) sebagai berikut :

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

Nilai-b dapat ditentukan juga dengan metode *weighted least-squares* (wLS). Nilai konstanta b dengan metode wLS dapat dihitung dengan persamaan :

$$b = - \frac{\sum_{i=1}^n M_i \log N_i - \log N \sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n M_i^2 - M \sum_{i=1}^n M_i} \quad \dots (4)$$

### 2.3. Fraktal dan Dimensi Fraktal

Fraktal banyak dijumpai di alam dan sistem matematis. Fraktal berasal dari kata latin *fractus* yang memiliki arti patah atau rusak atau tidak teratur. Ciri khas dari fraktal adalah memiliki dimensi. Dimensi fraktal dinyatakan dalam  $D$  (Mandelbrot, 1982). Dimensi fraktal mengukur geometri dari distribusi dan kemungkinan variasinya sebagai fungsi ruang dan waktu.

Gempabumi berkaitan erat dengan patahan, sementara patahan tersusun oleh retakan-retakan batuan dan dapat dianggap sebagai sistem fraktal (Hirata, dkk., 1987; Kagan, 1982). Variasi dimensi fraktal secara spasial kemungkinan berhubungan erat dengan heterogenitas kondisi geologi (Aviles, dkk., 1987).

### 2.4. Hubungan Antara Nilai-b dan D

Hubungan antara nilai-b dan dimensi fraktal telah banyak diteliti oleh para ahli. Aki (1981) menyatakan hubungan yang sederhana antara nilai-b dengan dimensi fraktal  $D$  dimana

memiliki korelasi yang positif dan dinyatakan dalam persamaan :

$$D = \frac{3b}{c} \quad \dots (5)$$

Dimana  $D$  adalah dimensi fraktal,  $b$  adalah nilai-b dari relasi Gutenberg-Richter serta  $c$  merupakan kemiringan antara log *moment* versus magnitudo, nilainya  $\approx 1,5$ . Beberapa ahli menyatakan bahwa korelasi antara  $D$  dan  $b$  adalah negatif (Hirata, 1989; Henderson, dkk., 1994; Oncel, dkk., 1996; Wang and Lee, 1996). Namun Dalam beberapa kasus korelasi bisa berubah antara negatif dan positif (Henderson, dkk., 1999; Mandal, dkk., 2005).

### 2.5. Rasio Slip

*Slip* memiliki arti sebagai pergeseran relatif. *Slip* (pergeseran relatif) bila diukur dari blok satu ke yang lain pada bidang sesar dan merupakan pergeseran titik-titik yang sebelumnya berimpit. Rasio antara *slip* yang terjadi pada patahan utama dengan total *slip* dinamakan rasio *slip*, dan dapat dihitung dari dimensi fraktal dengan rumus (Khatri, 1995):

$$S_p / S = 1 - 2^{-(3-D)} \quad \dots (6)$$

dimana  $S_p$  adalah slip yang terjadi pada patahan utama dan  $S$  merupakan total slip. Untuk  $D = 3$ , semua slip terjadi pada patahan-patahan kecil, sementara untuk kasus tertentu dimana  $D = 0$ , kurang lebih 88% slip terjadi pada patahan utama. (Khatri, 1995).

## 3. DATA DAN PENGOLAHAN

### 3.1. Data

Data yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah data gempabumi dari katalog NEIC tahun 1973-2008. Data katalog NEIC diambil pada daerah dengan batas  $6^\circ$  LS -  $12^\circ$  LS dan  $114^\circ$  BT -  $121^\circ$  BT.

### 3.2. Pengolahan Data

Metode dalam tahapan pengolahan data pada penelitian ini meliputi :

Penyiapan data katalog gempa bumi sekaligus penyeragaman magnitudo. Selanjutnya melihat kelengkapan data dengan cara penentuan *magnitude completeness* ( $M_c$ ) dari plot distribusi frekuensi- magnitudo.

Data gempa bumi perlu dibebaskan dari pengaruh gempa-gempa susulan sehingga langkah *declustering* katalog gempa perlu diterapkan.

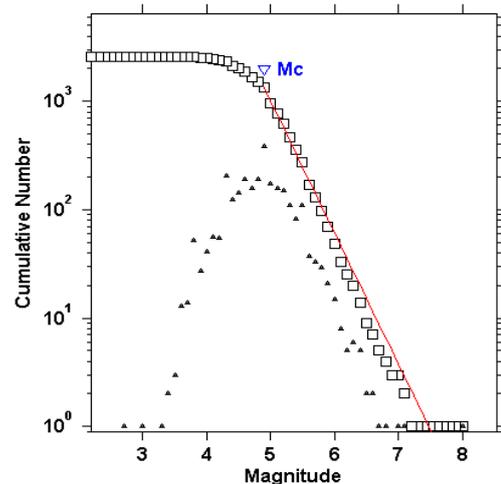
Setelah mendapatkan data-data gempa bumi yang *independent*, perhitungan dan pemetaan variasi parameter tektonik (nilai- $b$ ) daerah penelitian dilakukan dengan membagi daerah penelitian ke dalam ukuran grid  $0,2^\circ \times 0,2^\circ$  untuk setiap grid dengan radius konstan 110 km dan  $N=40$  dengan bantuan software ZMAP (Wiemer, 2001). Dari perhitungan dan pemetaan variasi nilai- $b$  secara spasial akan dapat ditentukan *clustering* nilai- $b$  secara kualitatif.

Langkah berikutnya adalah penentuan  $D$  dan  $Sp/S$  untuk setiap kluster yang telah ditentukan selanjutnya dianalisa hasil pemetaan variasi nilai- $b$ , penentuan  $D$  serta  $Sp/S$  pada masing-masing kluster yang telah didapat.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Distribusi Frekuensi – Magnitudo (FMD)

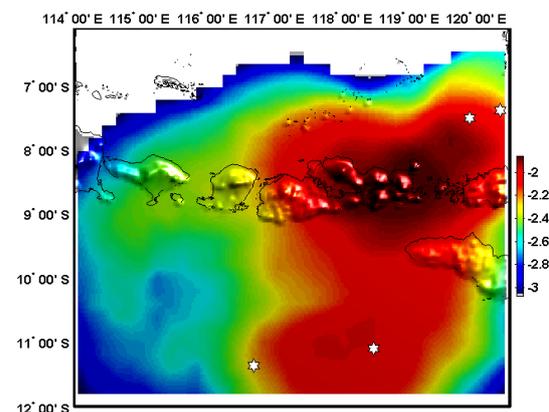
Parameter yang penting dalam penentuan dan pemetaan parameter tektonik adalah *magnitude completeness* ( $M_c$ ).  $M_c$  pada daerah penelitian seperti terlihat pada Gambar 2. adalah sekitar 4,9.



**Gambar 2** FMD daerah Bali-NTB berdasarkan katalog NEIC 1973-2008. *Slope* dari garis menyatakan relasi yang dikemukakan oleh Gutenberg-Richter  $\log N = a - bM$ .

### 4.2. Densitas Kegempaan

Hasil pemetaan densitas gempa bumi daerah Bali-NTB dapat dilihat pada Gambar 3. Secara kualitatif berkisar antara  $-3$  s/d  $-1.8 \log (N/km^2)$  dimana  $N$  adalah jumlah gempa. Daerah di sekitar pulau Sumbawa yang berwarna merah memiliki tingkat kerapatan gempa bumi yang relatif lebih besar dibanding daerah lainnya.

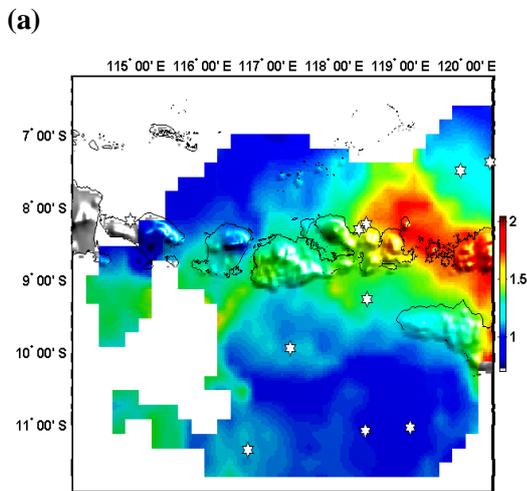


**Gambar 3.** Densitas kegempaan daerah Bali-NTB berdasarkan katalog NEIC 1973-2008.

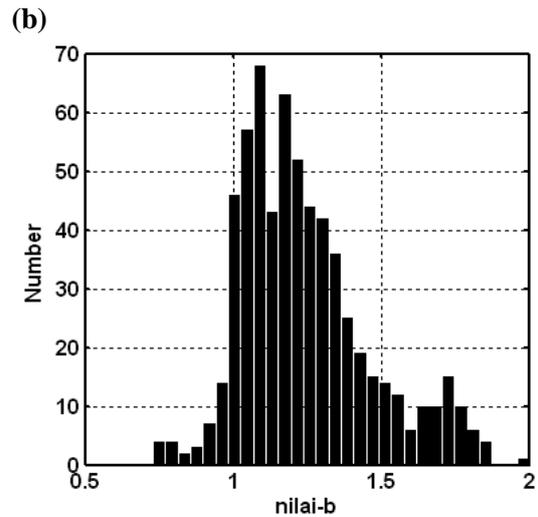
### 4.3. Pemetaan nilai-b, Analisa $D$ dan $Sp/S$

Variasi spasial nilai-b untuk daerah Bali-NTB dapat dilihat pada Gambar 4(a). Nilai-b terdistribusi seperti pada histogram Gambar 4(b).

Variasi spasial nilai-b daerah Bali-NTB berkisar antara 0,7-2. Berdasarkan hasil penelitian para ahli sebelumnya, nilai-b yang rendah memberikan korelasi pada tingkat *stress* yang tinggi, sedangkan nilai-b yang tinggi akan berkorelasi sebaliknya. Pada Gambar 4(a), secara kualitatif dapat dilihat bahwa nilai-b yang rendah terlihat di bagian selatan pulau Sumbawa dan sebagian sebelah utara pulau Lombok dan Sumbawa. Hal ini menunjukkan bahwa daerah tersebut akan memiliki kemungkinan yang lebih besar untuk terjadinya gempa bumi dengan magnitudo yang besar karena tingkat *stress* pada daerah ini terbilang tinggi. Daerah di sebelah utara memiliki tingkat *stress* yang cukup tinggi namun demikian gempa-gempa bumi yang berpeluang terjadi mayoritas berupa gempa menengah dan dalam.



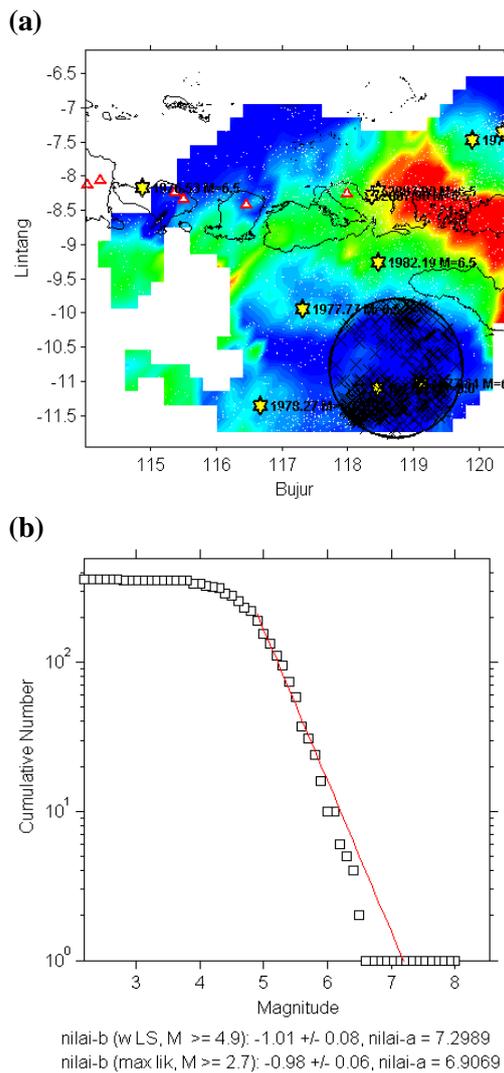
**Gambar 4a.** Variasi spasial nilai-b untuk daerah Bali-NTB berdasarkan katalog NEIC 1973-2008,



**Gambar 4b.** Histogram nilai-b.

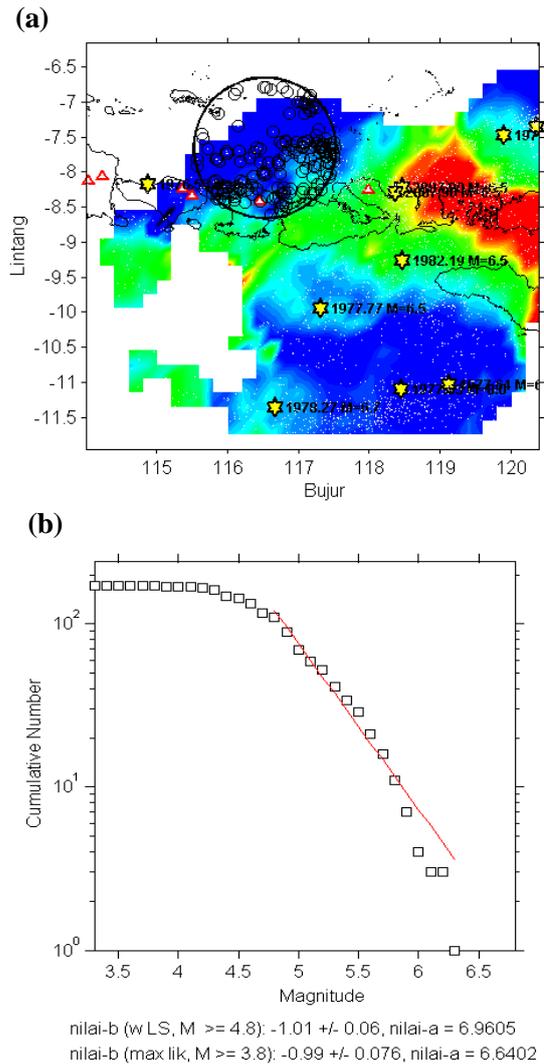
Dari variasi spasial parameter tektonik diatas secara kualitatif daerah Bali-NTB dapat dibagi menjadi 3 kluster. Pembagian kluster dan nilai-b untuk untuk masing-masing kluster dapat dilihat pada gambar 5-7.

Kluster I meliputi daerah selatan pulau Sumbawa dan Sumba (Gambar 5a). Nilai parameter tektonik pada kluster I ini dapat ditentukan dengan metode wLS berkisar 1,01 sementara dengan metode MLE berkisar 0,98 (Gambar 5b). Dimensi fraktal untuk kluster ini mendekati nilai 2 yang memberikan indikasi bahwa distribusi sumber berupa 2D. Rasio *slip* untuk kluster I memiliki nilai kisaran 0,5 yang memiliki arti bahwa sekitar 50 (lima puluh) persen total *slip* terjadi pada sistem patahan utama (primer) sementara sisanya lagi terjadi pada patahan-patahan sekunder.



**Gambar 5** (a) Kluster I, (b) Nilai-b untuk kluster I dengan metode wLs dan MLE.

Kluster II meliputi daerah utara pulau Bali, Lombok dan Sumbawa (Gambar 6a). Nilai parameter tektonik (nilai-b) pada kluster ini dapat ditentukan dengan metode wLS berkisar 1,01 sementara dengan metode MLE berkisar 0,99 (Gambar 6b). Dimensi fraktal pada kluster ini terhitung nilainya mendekati 2. Dengan nilai dimensi fraktal 2 maka mengindikasikan bahwa pada kluster ini distribusi sumber berupa 2D. Rasio *slip* untuk kluster II mendekati nilai kisaran 0,5. Dengan demikian sekitar 50 (lima puluh) persen total *slip* terjadi pada sistem patahan utama (primer) dan selebihnya lagi pada patahan-patahan sekunder sebagaimana juga pada kluster I.



**Gambar 6** (a) Kluster II, (b) Nilai-b untuk kluster II dengan metode wLs dan MLE.

Kluster III meliputi daerah sekitar pulau Sumbawa (Gambar 7a). Nilai parameter tektonik pada kluster III ini dihitung dengan metode wLS berkisar 1,42 sementara dengan metode MLE berkisar 1,5 (Gambar 7b). Dimensi fraktal untuk kluster ini terhitung mendekati nilai 3 yang mengindikasikan bahwa distribusi sumber berupa 3D. Dengan demikian dapat diketahui bahwa semua *slip* terjadi pada patahan-patahan kecil (rasio *slip* mendekati 0). Nilai-b, dimensi fraktal dan rasio *slip* untuk masing-masing kluster dapat dilihat pada tabel 1.

## 5. KESIMPULAN

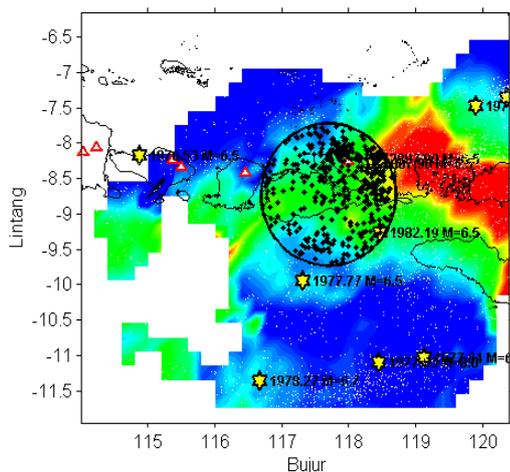
Berdasarkan pemetaan variasi spasial parameter tektonik, analisa dimensi fraktal dan rasio *slip* daerah Bali-NTB dapat disimpulkan bahwa :

- Nilai-*b* daerah Bali-NTB secara spasial bervariasi dari 0,7 sampai 2. Secara kualitatif nilai-*b* yang rendah berada di sebelah selatan pulau Sumbawa-Sumba serta sebagian daerah di sebelah utara pulau Bali-Lombok dan Sumbawa. Hal Ini menunjukkan bahwa daerah ini memiliki kemungkinan yang lebih besar untuk terjadi gempa bumi dengan magnitudo yang besar karena tingkat *stress* nya yang tinggi.
- Daerah Bali-NTB dapat dibagi menjadi 3 kluster dengan kluster I sebelah selatan pulau Sumbawa dan Sumba, kluster II sebelah utara pulau Bali-Lombok dan Sumbawa serta kluster III meliputi daerah di sekitar pulau Sumbawa.
- Kluster I di daerah sebelah selatan pulau Sumbawa dan Sumba memiliki dimensi fraktal *D* mendekati nilai 2 yang mengindikasikan bahwa pada daerah ini distribusi sumber berupa 2D. Rasio *slip* sekitar 0,5 yang berarti kurang lebih 50% total pergeseran relatif (*slip*) terjadi pada patahan utama (primer).
- Kluster II di daerah sebelah utara pulau Bali-Lombok dan Sumbawa memiliki dimensi fraktal *D* mendekati 2 yang mengindikasikan bahwa pada daerah ini distribusi sumber berupa 2D. Rasio *slip* mendekati 0,5 yang berarti kurang lebih 50% total pergeseran relatif (*slip*) terjadi pada patahan utama (primer).
- Kluster III di daerah sekitar pulau Sumbawa memiliki dimensi fraktal *D* mendekati 3 yang mengindikasikan bahwa pada daerah ini distribusi sumber berupa 3D. Rasio *slip* mendekati 0 yang berarti semua *slip* terjadi pada patahan-patahan kecil.

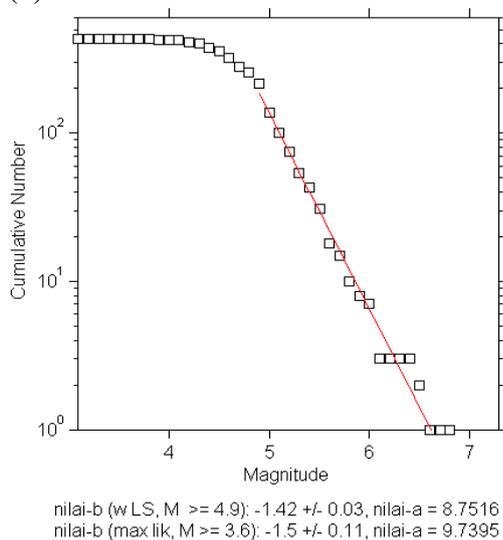
## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. Aki, K., 1981. *A Probabilistic Synthesis of Precursory Phenomena Earthquake Prediction*, Amer Geophys Union, 556-574.

(a)



(b)



**Gambar 7** (a) Kluster III, (b) Nilai-*b* untuk kluster III dengan metode wLS dan MLE.

Tabel 1. Nilai-*b*, dimensi fraktal serta rasio *slip* untuk masing-masing kluster daerah Bali-NTB.

Parameter	Kluster I	Kluster II	Kluster III
nilai- <i>b</i> (MLE)	0,98	0,99	1,5
<i>D</i>	1,96	1,98	3,0
<i>Sp/S</i>	0,51	0,51	0
nilai- <i>b</i> (WLS)	1,01	1,01	1,42
<i>D</i>	2,02	2,02	2,84
<i>Sp/S</i>	0,49	0,49	0,1

2. Aviles, C.A., Scholz, C.H. and Boatwright, J., 1987. *Geophys. Res.*, 92, 331-344.
3. Biswas, S. and Majumkar, R.K., 1988. *Geofizika*, 5, 107-119.
4. Gutenberg, B., and Richter, C. F., *seismicity of Earth and Associated Phenomenon*, Princeton Univ. Press.
5. Hatzidimitriou, P., D., Papadimitriou Mountrakis and B. Papazachos, 1985. *The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece*, *Tectonophysics*, 120, 141-151.
6. Henderson, J.R., Barton, D.J. and Foulger, G.R., Fractal clustering of induced seismicity in the Geysers geothermal area, California, *Geophys.J. Int.*, 139, 317-324, 1999.
7. Henderson, J.R, Main, I.G., Pearce, R.G. and Takeya, M., 1994. *Seismicity in north-eastern Brazil—fractal clustering and the evolution of the b-value*, *Geophys. J. Int.*, 116, 217-226.
8. Hirata, T., Takashi, S. and Ito, K., 1987. *Fractal structure of spatial distribution of microfracture in rock*, *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 90, 369-374,.
9. Hirata, T., 1989. *A correlation between the b-value and the fractal dimension of earthquakes*, *J. geophys. Res.*, 94, 7507-7514.
10. Kagan, Y. Y., 1982. *Stochastic model of earthquake fault geometry*, *Geophys. J. R., Astron. Soc.*, 71, 659-691.
11. Khatri, K. N., 1995. *Fractal description of seismicity of India and inferences regarding earthquake hazard*. *Curr. Sci.*, 69, 361-366.
12. Mandal, P., Mabawonku, A.O. and Dimri, V.P., 2005. *Self-organized fractal seismicity of reservoir triggered earthquakes in the Koyna-Warna seismic zone, western India*, *Pure appl. Geophys.*, 162, 73-90.
13. Mandelbrot, B. B., 1982. *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, san fransisco.
14. Oncel, A.O., Main, I., Alptekin, O. and Cowie, P., 1996. *Temporal variations in the fractal properties of seismicity in the north Anatolian fault zone between 31°E and 41°E*, *Pure appl. Geophys.*, 147, 147-159.
15. Scholz, C.H., 1968. *The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 399-415.
16. Shi, Y., and B.A. Bolt, 1982. *The standard error of the magnitude-frequency bvalue*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1677-1687.
17. Sulaiman, R., Muzli, Nugroho.S., , 2002. *Karakteristik Gempabumi di sumba dan sekitarnya*, Prosiding HAGI.
18. Tsapanos, T., 1990. *b-value of two tectonic parts in the circum-Pacific belt*, *Pageoph*, 143, 229-242.
19. Turcotte, D. L., 1997. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press.
20. Utsu, T., 1965. *A method for determining the value of b in a formula of  $\log N=a-bM$  showing the magnitude frequency relation for earthquakes*, *Geophys, Bull. Hokkaido Univ.*, 13, 99-103.
21. Wang, J.H. and Lee, C.W., 1996. *Multifractal measures of earthquakes in west Taiwan*, *Pure appl. Geophys.*, 146, 131-145.
22. Wiemer, S., 2001. *A software package to analyze seismicity: ZMAP*, *Seis. Res. Lett.*, 72, 374-383.