

DISTRIBUSI FREKUENSI GEMPABUMI DAN DIMENSI FRAKTAL PADA SEISMIK GAP DI INDONESIA

EARTHQUAKE FREQUENCY-MAGNITUDE DISTRIBUTION AND FRACTAL DIMENSION ON SEISMIC GAP IN INDONESIA

Rahmat Setyo Yuliatmoko*, Yusuf Hadi Perdana, Agustya Adi Martha

Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Jalan Angkasa 1 No. 2 Kemayoran Jakarta Pusat, Jakarta 10720

*E-mail: rahmat.yuliatmoko@gmail.com

Naskah masuk: 19 Juni 2020

Naskah diperbaiki: 18 Oktober 2021

Naskah diterima: 25 Oktober 2021

ABSTRAK

Seismic gap didefinisikan sebagai wilayah potensi gempa tinggi yang seharusnya telah melepaskan energi sebagai gempabumi besar, namun berdasarkan data katalog pelepasan energi tersebut belum terjadi. Identifikasi zona *seismic gap* dapat digunakan dalam meningkatkan kewaspadaan, penentuan prioritas monitoring kegempaan, *warning* tsunami, pertimbangan pembangunan infrastruktur, dan pertimbangan tata kota wilayah sehingga perlunya pemahaman yang akurat tentang karakteristik gempabumi di Indonesia. Dalam penelitian ini, baik *a-value* maupun *b-value* dari hubungan distribusi frekuensi-magnitudo dan *fractal dimension* (*Dc*) diteliti secara bersamaan dari 12 zona *seismic gap* di Indonesia. Dengan menggunakan data parameter gempabumi, perhitungan *b-value* dan *Dc-value* telah menyiratkan adanya variasi *seismotectonic stress*. Hubungan antara *Dc-b value* dan *Dc-(a/b) value* diteliti untuk mengkategorikan tingkatan bahaya gempabumi dari zona sumber seismik, dimana kalibrasi kurva menggambarkan korelasi negatif antara *Dc* dan *b-value* ($Dc=0.1146b-1.9029$) dan korelasi negatif antara *Dc* dan rasio *a/b* ($Dc=0.0443(a/b)-6.825$) dengan koefisien korelasi yang berbeda antara $R^2=0.0011$ dan $R^2=0.0027$ untuk kedua regresi. Berdasarkan hubungan *Dc-b* lebih terpercaya dan lebih efektif, diinterpretasikan secara tektonik bahwa zona West Papua dan Fault Sumatra Selatan menunjukkan akumulasi stress yang rendah sedangkan zona *backthrust* Bali dan Halmahera sebagai wilayah dengan stres tertinggi, yang berpotensi terjadinya gempabumi besar. Oleh karena itu, disarankan untuk di analisa dengan metode yang lain misalnya distribusi akumulasi stress agar lebih detail untuk memahami karakteristiknya sebagai upaya mitigasi bencana gempabumi dan juga peranan dari stakeholder dan BMKG sebagai institusi terkait untuk berkolaborasi sebagai langkah nyata mitigasi bencana gempabumi.

Kata kunci: *Seismic Gap, a-value, b-value, dc value, mitigasi*

ABSTRACT

A seismic gap is defined as an area with a high earthquake potential that should release energy as a major earthquake, but based on catalogue data the energy release has not yet occurred. The identification of seismic gap zones can be used to increase awareness, determine priorities for seismic monitoring, tsunami warnings, infrastructure development considerations, and urban planning considerations so that an accurate understanding of the characteristics of earthquakes in Indonesia is required. In this study, both the *a* value and *b* value of the frequency-magnitude distribution relationship and the fractal dimension (*Dc*) were studied simultaneously from 12 seismic gap zones in Indonesia. By using earthquake parameter data, the calculation of the value of *b* and value of *Dc* shows that there are variations in seismotectonic stresses. The relationship between the value of *Dc-b* and the value of *Dc-(a/b)* was investigated to categorize the level of earthquake vulnerability in the seismic source zone, where the calibration curve depicts a negative correlation between the values of *Dc* and *b* ($Dc=0.1146b-1.9029$) and a negative correlation. Between *Dc* and *a/b* ratio ($Dc=0.0443(a/b)-6.825$) with different correlation coefficients between $R^2=0.0011$ and $R^2=0.0027$ for both regressions. Based on the more reliable and effective *Dc-b* relationship, it is interpreted tectonically that the West Papua and South Sumatra Fault zones show low-stress accumulation, while the Bali and Halmahera backthrust zones are areas with the highest stresses with high earthquake potential. Therefore, it is recommended to analyse with other methods such as the distribution of stress accumulation in order to be more detailed to understand its characteristics as an effort to mitigate earthquake disasters and also the role of the stakeholder and BMKG as related institutions to collaborate. As a real measure of earthquake disaster mitigation.

Keywords: *Seismic Gap, a-value, b-value, dc value, mitigation.*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan daerah seismik aktif rawan terjadinya gempabumi besar terutama di daerah *seismic gap*. *Seismic gap* merupakan daerah berpotensi terjadinya gempabumi besar sebagai contoh di zona Mentawai, zona Sesar Besar Sumatra, zona selatan Jawa bagian barat, zona Selatan Yogya-Jatim, zona Selatan Lombok, zona *backthrust* Bali Lombok, zona Flores, zona Banda, zona Halmahera, zona Perairan Utara Manado, zona Papua Barat, dan zona Papua.

Seismic Gap di Indonesia perlu di monitor mengingat potensinya akan terjadi gempabumi besar. Kegiatan prekursor sebagai langkah upaya kedepan untuk memprediksi terjadinya gempabumi. Prekursor gempabumi perlu berbagai metode salah satunya *b value* berdasarkan waktu (*b value with time*). Hasil *b value* perlu di kuatkan dengan metode yang lain sehingga lebih komprehensif misalnya konsentrasi radon, GPS, ULF dll.

Untuk memahami karakteristik kegempaan di suatu wilayah maka beberapa pendekatan. Pendekatan karakteristik kegempaan misalnya teknik statistik kegempaan distribusi frekuensi-magnitudo dan *fractal dimension/Dc*. Metode ini dianggap sebagai pendekatan yang efektif digunakan untuk memahami aktivitas seismotektonik lokal [1][2].

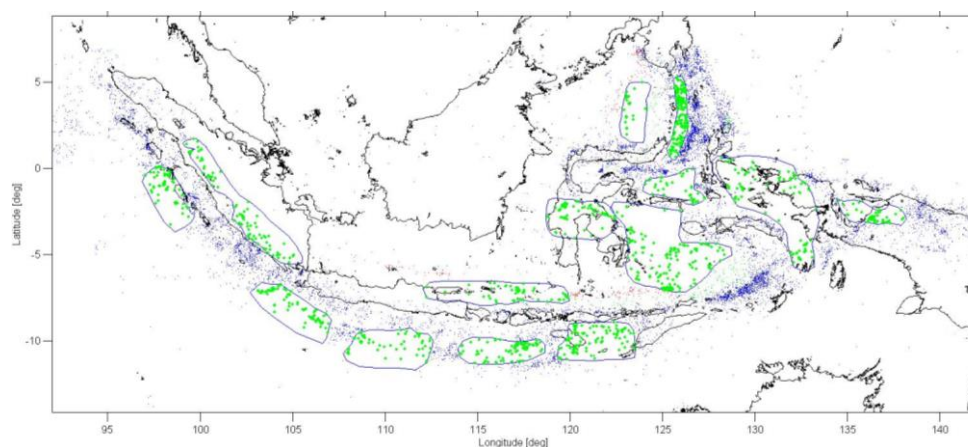
Baik *b-value* maupun *Dc-value* secara signifikan berhubungan dan dikontrol secara langsung oleh seismisitas serta *tectonic stress* di suatu daerah [3,4,5]. Hubungan *b-value* dan *Dc-value* ternyata saling berkolaborasi [6][7], dan rasio *Dc/b* digunakan sebagai indikator bahaya gempabumi [8]. Hubungan antara *b-value*, *a-value* serta *Dc-b* dan *Dc-(a/b)* di wilayah MLSEA [9], Hubungan antara *b-value*, *a-value* serta *Dc-b* dan *Dc-(a/b)* di wilayah North of Central-East Iran Blocks (NCEIB) [10].

Nilai *b value* selalu mencapai maximum dan minimum sebelum dan sesudah terjadinya

gempabumi besar. Beberapa hari sebelum terjadinya gempabumi besar, *b value* mulai meningkat yang dipengaruhi oleh gempa pendahuluan. Banyak faktor untuk menjelaskan variasi *b value* termasuk *stress* disekitarnya, heterogenitas kerak, kedalaman gempa, tekanan pori, gradien panas bumi, dan faktor lainnya [11]. Besarnya *b value* sangat dipengaruhi oleh diskontinuitas *slip rate* di sepanjang patahan yang mungkin terkait dengan batas segmen [12].

Indonesia dikelilingi oleh empat lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik. Zona tektonik tersebut membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks [13]. Gempabumi sebagai salah satu efek dari proses tektonik menjadi perhatian khusus karena bahaya yang ditimbulkannya besar, walaupun tidak secara langsung karena kebanyakan korban terjadi akibat bahaya kelanjutan yang di sebabkan gempabumi. Berdasarkan teori lempeng tektonik, deformasi kerak terjadi pada daerah bidang kontak lempeng, pelebaran lempeng samudra, dan transformasi sesar sehingga perlu memahami karakteristik kegempaan di suatu wilayah dan merancang langkah mitigasi untuk meminimalisasi korban.

Untuk menganalisis bahaya gempabumi *seismic gap* di Indonesia, penelitian ini telah menetapkan 12 zona *seismic gap* di Indonesia yaitu zona Mentawai, zona Sesar Besar Sumatra, zona selatan Jawa bagian barat, zona Selatan Yogya-Jatim, zona Selatan Lombok, zona *back thrust* Bali Lombok, zona Flores, zona Banda, zona Halmahera, zona Perairan Utara Manado, zona Papua Barat, dan zona Papua, yang dapat dilihat pada **Gambar 1**. Oleh karena itu evaluasi *a-value*, *b-value*, dan *Dc-value*, merupakan fokus utama pada penelitian ini. Hasil dari penelitian ini diharapkan berguna untuk penilaian resiko gempabumi (*seismic hazard assessements*) di Indonesia dan juga mitigasi bencana gempabumi.



Gambar 1. Zona Seismic Gap di Indonesia

2. Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari katalog gempabumi BMKG dan USGS dapat dilihat pada Gambar 1, terdapat 69472 data gempabumi dari tahun 1973-2021 (48 tahun), dengan magnitudo 1.0-9.0, sebagian besar dalam skala *magnitudo body* (mb) dan *magnitudo moment* (Mw) [14][15]. *Foreshock* dan *aftershock* dihilangkan dengan metode Uhrhammer (1986), Akibatnya, dari sekitar 119731 data gempabumi menjadi 69472. Pengolahan data menggunakan *software* ZMAP [16]. Dari perhitungan di hasilkan nilai b, a, dan Mc untuk masing-masing zona *seismic gap* **Gambar 2**.

Distribusi frekuensi-magnitudo (FMD) dinyatakan sebagai:

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

Dimana N adalah jumlah kumulatif gempabumi dengan magnitudo $\geq M$. Konstanta a dan b merupakan koefisien yang bervariasi pada *specific time* dan *space window*.

Secara seismotektonik, *a-value* mengindikasikan tingkat seismisitas, dan *b-value* berhubungan dengan *tectonic stress* [1][3].

Dalam seismisitas secara spasial dapat di tunjukkan dengan dimensi *fractal* (Dc-value) dalam volume tertentu menurut AKI (1981) dimensi *fractal* berkorelasi terhadap nilai b

$$D = \frac{3}{c} b \quad (2)$$

Dimana c = 1.5 adalah konstanta penskalaan rata-rata dunia antara *momen log* dan *magnitude* [17]

Nilai *Dc-value* diambil dari persamaan dinyatakan sebagai:

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} N(R < r) \quad (3)$$

Dimana r adalah jarak antara dua episenter, dan N adalah jumlah pasangan gempabumi yang dipisahkan oleh jarak $R < r$ [18].

Jika distribusi merupakan *fractal* maka akan diperoleh [19].

$$C(r) \sim r^{Dc} \quad (4)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Nilai *b-value* rendah berhubungan dengan tingkat akumulasi *stress* yang tinggi [20]. Nilai a dan b *Value* serta *Dc Value* didapatkan perzona lengkap dengan *magnitude completeness*-nya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Perhitungan *b-value* di Indonesia dari ke-12 zona *seismic gap* di Indonesia berkisar antara 0.74 sampai 1.22. Nilai *b-value* terendah terdapat pada zona Papua, sedangkan *b-value* tertinggi terdapat di zona *Fault Sumatra*. Zona Papua terindikasi terjadinya akumulasi *stress* yang tinggi perlu adanya perhatian khusus. Perhitungan *a-value* di Indonesia dari ke-12 zona *seismic gap* di Indonesia berkisar antara 5.47 sampai 7.58. Nilai *a-value* terendah terdapat pada zona Papua, sedangkan *a-value* tertinggi terdapat di zona Papua Barat untuk zona yang lainya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Nilai *b-value* yang diperoleh dapat dikategorikan menjadi 4 kelompok, yaitu $b < 0.7$, $0.7 \leq b < 0.8$, $0.8 \leq b < 0.9$, dan $b \geq 0.9$ [8]

Tabel 1. Koefisien FMD (a dan b-value) dan *fractal dimension* (Dc) dari 12 *Seismic Gap* di Indonesia.

No	Zona <i>Seismic Gap</i>	Jumlah Gempabumi	Mc	a value	b value	Dc value
1	Mentawai	406	4.8	6.68	0.967 ± 0.09	2.19 ± 0.02
2	<i>Fault Sumatra</i>	223	4.4	7.3	1.22 ± 0.35	1.25 ± 0.01
3	<i>South West Java</i>	218	4.4	6.7	1.04 ± 0.25	2.19 ± 0.04
4	<i>South East Java</i>	292	4.4	6.78	1.04 ± 0.18	2.25 ± 0.03
5	<i>South Lombok</i>	491	4.5	6.8	1.01 ± 0.21	2.38 ± 0.02
6	<i>Backthrust Bali Lombok</i>	797	4.4	6.14	0.85 ± 0.24	0.93 ± 0.04
7	Flores	441	4.5	7.11	1.11 ± 0.37	2.05 ± 0.02
8	Banda	336	4.6	6.62	0.97 ± 0.16	1.49 ± 0.02
9	Halmahera	715	4.4	6.29	0.87 ± 0.22	1.55 ± 0.02
10	<i>North Sea Manado</i>	690	4.5	7.49	1.1 ± 0.49	1.94 ± 0.01
11	<i>West Papua</i>	576	4.5	7.58	1.17 ± 0.39	1.24 ± 0.01
12	Papua	370	4.2	5.47	0.74 ± 0.13	1.99 ± 0.03

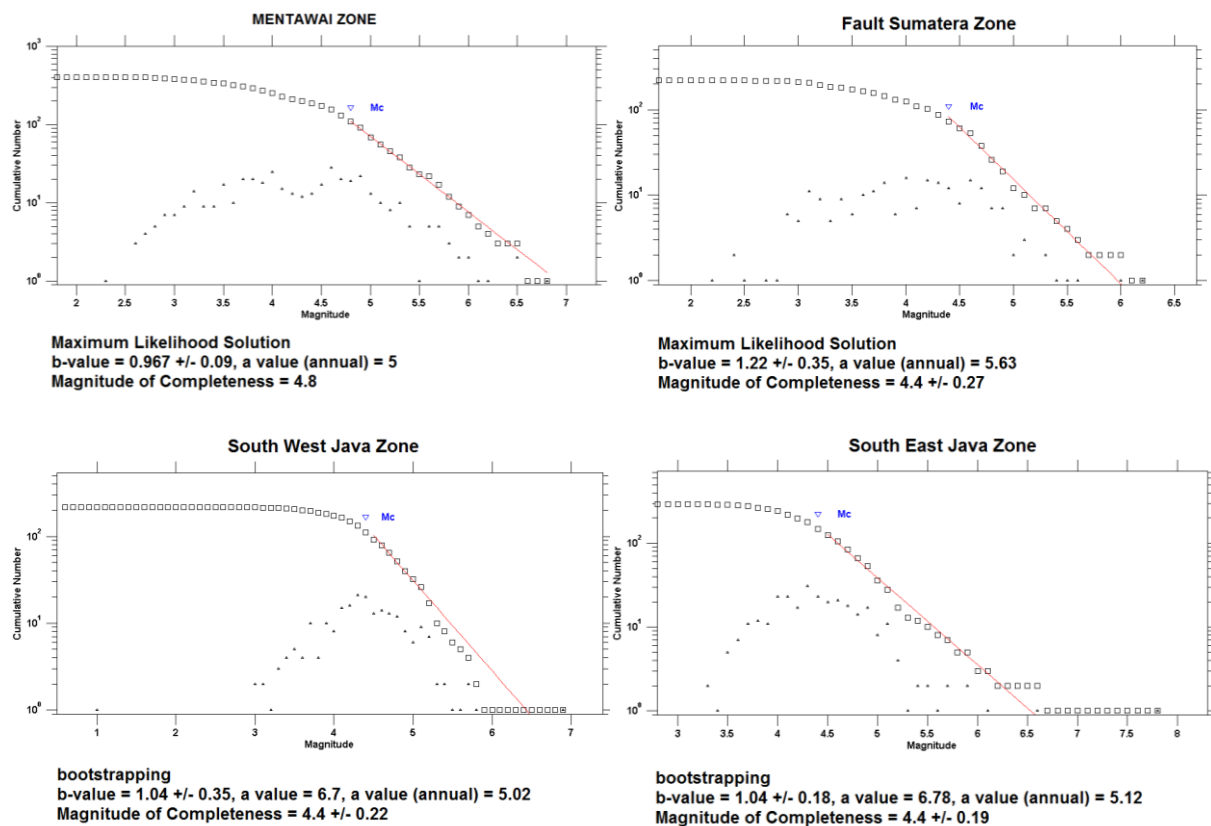
Zona *seismic gap* di Indonesia memiliki *a-value* dan *b-value* yang beragam ada yang tinggi, rendah dan sedang. Keberagaman ini menandakan bahwa wilayah Indonesia tergolong seismik aktif, karena banyaknya kejadian gempa bumi.

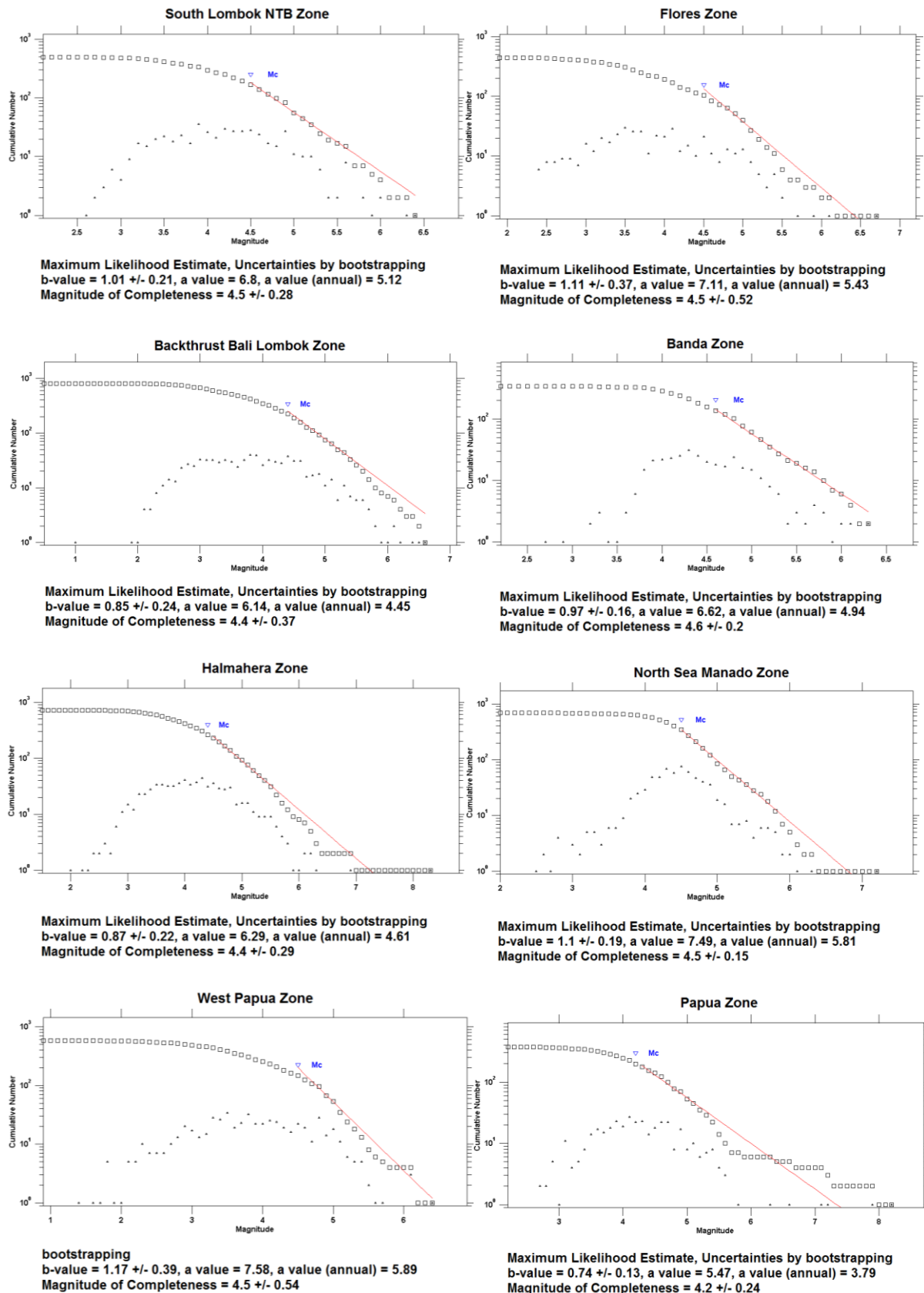
Sebagian besar dari zona *seismic gap* dapat dilihat pada **Gambar 3** menghasilkan nilai *a-value* dan *b-value* sedang hingga rendah, *a-value* dan *b-value* rendah yang di tandai warna biru, menandakan adanya akumulasi *stress* dan sedikit terjadinya gempa bumi. Nilai *a* dan *b* rendah mengindikasikan bahwa batuan di wilayah tersebut mampu untuk menahan *stress*.

Batuan tidak akan mampu menahan *stress* terus menerus. Disaat batuan tersebut tidak mampu lagi menahan *stress* maka akan terjadi gempa bumi besar sehingga zona ini perlu di waspadai. Zona dari *seismic gap* yang patut di waspadai antara lain zona Mentawai, zona *fault* Sumatra bagian Selatan, Selat Sunda, Jawa Timur, *backthrust* Bali dekat dengan Madura, Selatan Sumbawa, Laut Banda, Sulawesi Utara, Ambon, Papua Barat dan Papua Utara.

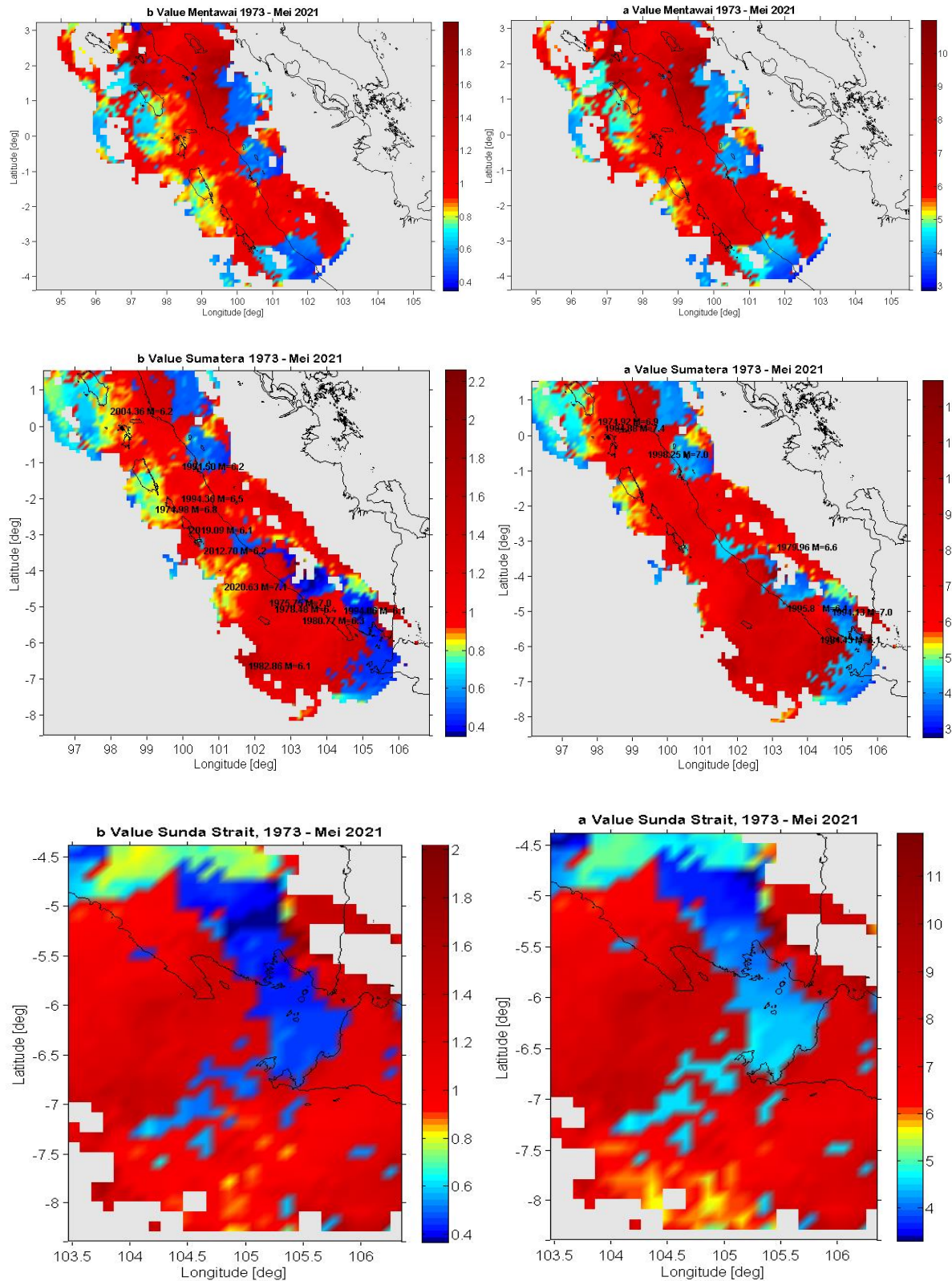
Dc-value yang telah dihitung bervariasi antara 0.93 dan 2.38, dengan *Dc-value* terendah berada di zona *backthrust* Bali Lombok. *Dc-value* tertinggi 2.38 berada pada zona *South* Lombok. *Dc-value* pada sumber seismogenik aktif berkisar antara 0-2, sehingga sebagian besar wilayah di Indonesia diinterpretasi berada pada seismik aktif [21]. Nilai *Dc-value* yang diperoleh dapat dikategorikan menjadi 4 kelompok, yaitu $Dc < 1.5$, $1.5 \leq Dc < 1.7$, $1.7 \leq Dc < 1.9$, dan $Dc \geq 1.9$ [8].

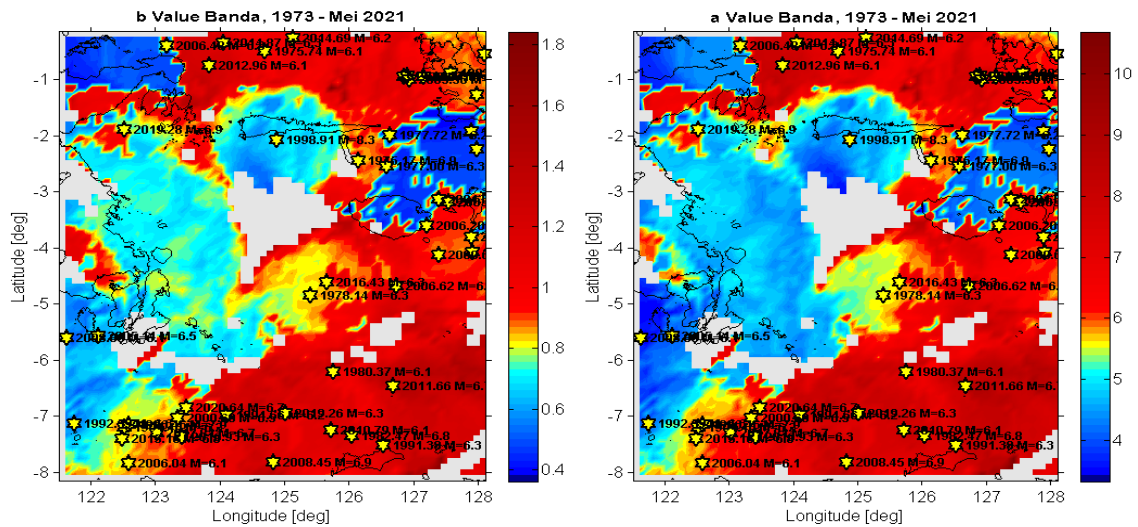
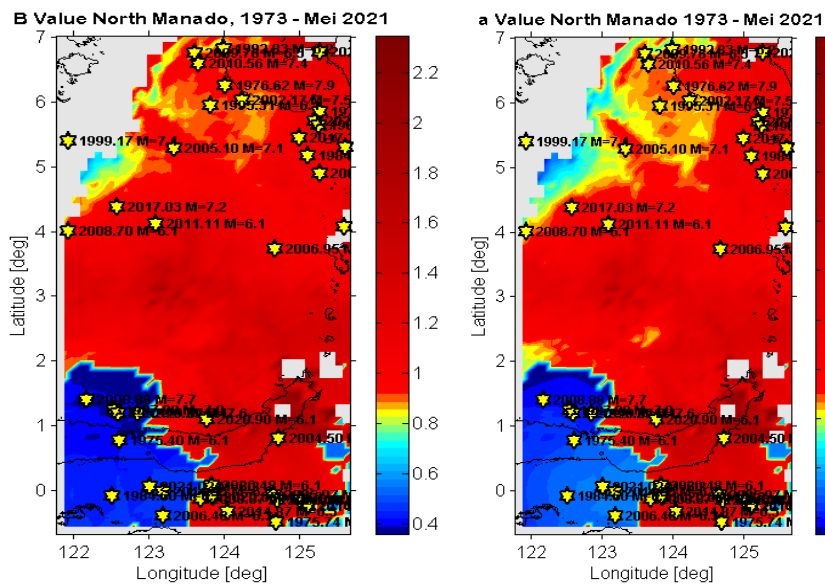
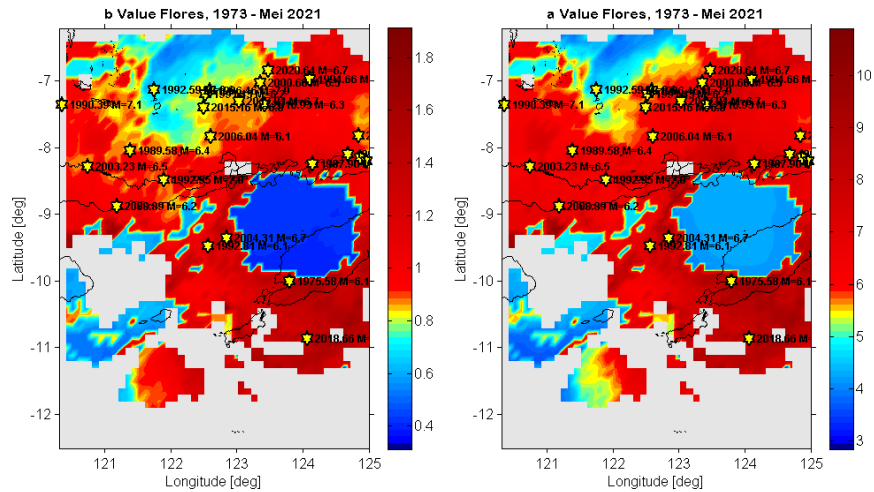
Dc-value tinggi $Dc \geq 1.9$ berada pada zona *North Sea* Manado, Papua, Flores, Mentawai, *South West Java*, *South East Java* dan *South* Lombok. *Dc-value* level selanjutnya (1.7-1.9) tidak ada, *Dc-value* antara 1.5 dan 1.7 berada pada zona Halmahera, sedangkan *Dc-value* rendah $Dc < 1.5$ berada di zona Banda, *Fault* Sumatra, *West* Papua dan *Backthrust* Bali Lombok. Secara empiris, *Dc-value* mendekati 1 atau 2 menandakan bahwa episenter gempa bumi yang homogen didistribusikan masing-masing melalui bidang patahan [22]. Oleh karena itu, sebagian besar zona *seismic gap* di Indonesia menunjukkan karakteristik yang sama dengan yang diteliti oleh Yadai (2011) terhadap gempa India Barat yang dekat bidang struktur seismogenik.





Gambar 2. Plot distribusi frekuensi-magnitudo pada 12 zona seismic gap.





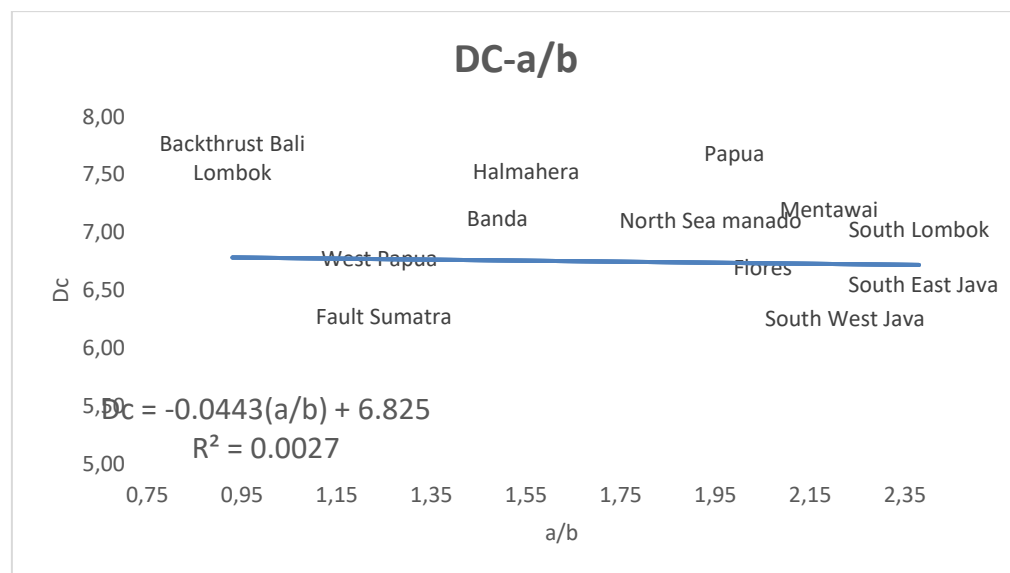
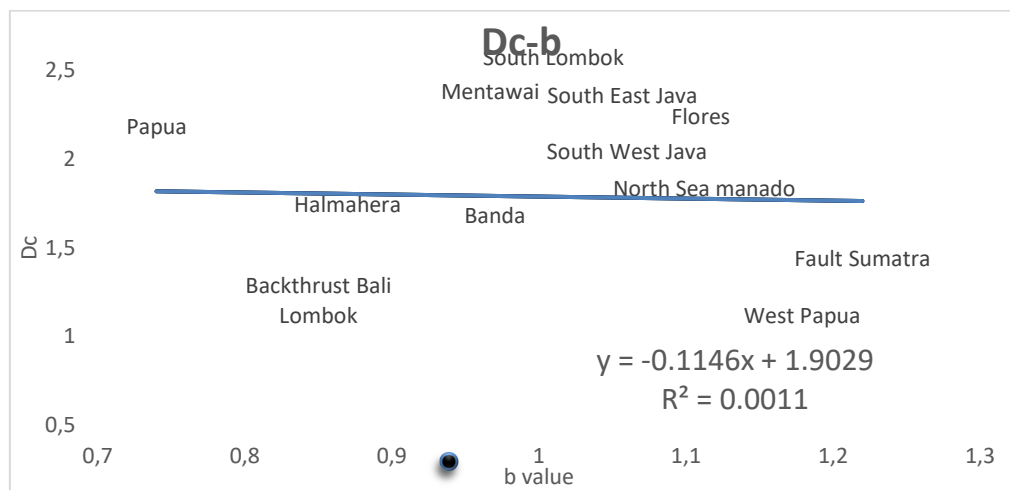
Dc-value yang telah dihitung bervariasi antara 0.93 dan 2.38, dengan *Dc-value* terendah berada di zona *backthrust* Bali Lombok. *Dc-value* tertinggi 2.38 berada pada zona South Lombok. *Dc-value* pada sumber seismogenik aktif berkisar antara 0-2, sehingga sebagian besar wilayah di Indonesia diinterpretasi berada pada seismik aktif [20].

Nilai *Dc-value* yang diperoleh dapat dikategorikan menjadi 4 kelompok, yaitu $Dc < 1.5$, $1.5 \leq Dc < 1.7$, $1.7 \leq Dc < 1.9$, dan $Dc \geq 1.9$ [8]. *Dc-value* tinggi $Dc \geq 1.9$ berada pada zona North Sea Manado, Papua, Flores, Mentawai, South West Java, South East Java dan South Lombok. *Dc-value* level selanjutnya (1.7-1.9) tidak ada, *Dc-value* antara 1.5 hingga 1.7 berada pada zona Halmahera, sedangkan *Dc-value* rendah

$Dc < 1.5$ berada di Banda, Fault Sumatra, West Papua dan *Backthrust* Bali Lombok. Rasio *Dc/b* dapat dinyatakan sebagai indikator *seismic hazards* [8]. Dari data *Dc-value* dan *b-value* (Tabel 1), hubungan empiris *Dc/b* yang ditunjukkan pada Gambar 4a, dapat dinyatakan sebagai:

$$Dc = -0.1146b + 1.9029 \quad (6)$$

Hubungan *Dc/b* di Indonesia dari 12 Zona *seismic gap* menunjukkan *regresi linear negatif* (Gambar 4a), yang mengindikasikan kenaikan akumulasi *stress* dan penurunan klastering gempa bumi sama dengan penelitian dari para peneliti yang meneliti sesar di Japan, Turkey, and Iran [6, 7, 22]. Zona Halmahera, Banda dan Mentawai wilayah dengan *stress* tertinggi sehingga perlu di waspadai.



Gambar 4. Hubungan empiris (a) antara *b-value* dan *Dc-value*, (b) antara rasio *a/b* dan *Dc-value* pada 12 zona *seismic gap* di Indonesia.

Hubungan antara *Dc-value* dan rasio *a/b* [8] (**Gambar 4b**) menghasilkan korelasi negatif:

$$Dc = -0.0443(a/b) + 6.825 \quad (7)$$

Korelasi *Dc-(a/b)* menunjukkan regresi negatif, sedangkan korelasi *Dc-b* menunjukkan regresi negatif juga. Hubungan *Dc-(a/b)* lebih terpercaya dan lebih efektif dibandingkan *Dc-b* untuk mengindikasikan *seismic hazards* [8], hubungan masing-masing dalam penelitian sama dengan Bayrak dan Bayrak (2012), *Dc-(a/b)* lebih terpercaya dan lebih efektif dibandingkan *Dc-b* untuk mengindikasikan *seismic hazards* dengan $R^2=0.0011$ sedangkan *Dc-(a/b)* nilai $R^2 = 0.0027$. Nilai R^2 sangat kecil berarti kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varian dari variabel terikatnya adalah sebesar 0.1%. Berarti terdapat 99.9% varians variabel terikat yang dijelaskan oleh faktor lain. Berdasarkan interpretasi tersebut, maka tampak bahwa nilai *R Square* adalah antara 0 sampai dengan 1

Hubungan *DC-(a/b)*, diinterpretasikan secara tektonik bahwa zona *West Papua* dan *Fault Sumatra* adalah zona pengumpulan *stress* yang rendah, sehingga tidak berpotensi terjadinya gempa bumi besar. Daerah ini lebih aman dari bahaya seismik dibanding wilayah lain. Sebaliknya zona *backthrust* Bali dan Halmahera adalah zona pengumpulan *stress* yang tinggi, sehingga berpotensi terjadinya gempa bumi besar di masa depan.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini data gempa bumi yang direkam di zona *seismic gap* di Indonesia dianalisis sehingga di dapatkan nilai *a-value*, *b-value* dan *Dc-value* dari 12 zona tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa variasi regional *a-value*, *b-value* dan *Dc-value* mengindikasikan *tectonic stress* lokal dan tingkatan bahaya (*hazard levels*). Baik hubungan *Dc-b* maupun *Dc-(a/b)* telah dikalibrasi pada penelitian ini untuk wilayah Indonesia. Hubungan *Dc-b* lebih terpercaya dan lebih efektif dibandingkan *Dc-(a/b)* untuk mengindikasikan *seismic hazards* dengan $R^2=0.0011$. Atas dasar hubungan *DC-(a/b)*, diinterpretasikan secara tektonik bahwa zona *West Papua* dan *Fault Sumatra* adalah zona tegangan rendah yang mungkin lebih aman dari bahaya seismik dibanding wilayah lain. Selain itu, Zona Papua, *backthrust* Bali dan Halmahera mengumpulkan tingkat tektonik yang tinggi stres, yang menimbulkan risiko untuk menghasilkan gempa bumi besar di masa depan.

Daftar Pustaka

[1] Gutenberg, B and Richter CF., (1944). Frequency of earthquakes in California. Bull Seismol Soc Am 34:185–188.

[2] Wyss M, Sammis CG, Nadeau RM, Wiemer, S. (2004). Fractal dimension and b-value on creeping and locked patches of the San Andreas Fault near Parkfield, California. Bull Seismol Soc Am 94:410–421.

[3] Scholz CH., (1968). The frequency–magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. Bull Seismol Soc Am 58:399–415.

[4] Öncel AO, Main I, Alptekin Ö, 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.

[5] Chun Hui et al (2020). Multifractal Characteristics of Seismogenic Systems and b Values in the Taiwan Seismic Region. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020, 9, 384; doi:10.3390/ijgi9060384

[6] Hirata, T., (1989). Fractal dimension of fault system in Japan: fractal structure in rock fracture geometry at various scales. Pure Appl Geophys 131(1/2):157–170.

[7] Öncel AO, Wilson T., (2002). Space-time correlations of seismotectonic parameters and examples from Japan and Turkey preceding the Izmit earthquake. Bull Seismol Soc Am 92:339–350.

[8] Bayrak Y and Bayrak E., (2012). Regional variations and correlations of Gutenberg–Richter parameters and fractal dimension for the different seismogenic zones in Western Anatolia. J Asian Earth Sci 58:98–107.

[9] Pailoplee and Choowong (2014). Earthquake frequency-magnitude distribution and fractal dimension in mainland Southeast Asia. Earth, Planets and Space 2014 66:8.

[10] Naimi-Ghassabian et al., (2016). Fractal dimension and earthquake frequency-magnitude distribution, in the North of Central-East Iran Blocks (NCEIB). Arabian Journal of Geosciences Geopersia 6 (2), 2016, PP. 243–264.

[11] Zuhair Hasan El-Isa, (2018). Frequency-Magnitude Distribution of Earthquakes <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77294>

[12] Parsons, T., Geist, E. L., Console, R., & Carluccio, R. (2018). Characteristic earthquake magnitude frequency distributions on faults calculated from consensus data in California. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 10,761–10,784. <https://doi.org/10.1029/2018JB016539>.

[13] Bird, P., (2003). An updated digital model of plate boundaries. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 4(3).

[14] BMKG earthquake database, (2021). (<http://repogempa.bmkg.go.id/query.php>), accessed May, 15 2020.

- [15] USGS earthquake database, (2021). (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), accessed May, 15 2020.
- [16] Wiemer, S. (2001). a software package to analyze seismicity. ZMAP, 2001. *Seismol Res Lett* 72:373–382.
- [17] Manakou MV and Tsapanos TM., (2000). Seismicity and seismic hazard parameters evaluation in the island of Crete and the surrounding area inferred from mixed data files. *Tectonophysics* 321:157–178.
- [18] Grassberger P, and Procaccia I., (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D* 9:189–208.
- [19] Kagan, YY. and Knopoff L., (1980). Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function. *Geophys J Roy Astron Soc* 62:303–320.
- [20] Tosi, P., (1998). Seismogenic structure behavior revealed by spatial clustering of seismicity in the Umbria-Marche Region (central Italy). *Ann Geophys* 41:215–224.
- [21] Yadav RBS, Papadimitriou EE, Karakostas VG, Rastogi BK, Shanker D, Chopra S, Singh AP, Kumar S., (2011). The 2007 Talala, Saurashtra, western India earthquake sequence. Tectonic implications and seismicity triggering. *J Asian Earth Sci* 40(1):303–314.
- [22] Poroohan N, Teimournegad K., (2010). an analysis of correlations of seismotectonic parameter and fractal dimension preceding Roudbar-Tarom earthquake (northwest of Iran). *Int. Conf. Geology Seismology*. 148–154.