

## ***Seismic Gap di Sesar Geser Sumatera***

Telly Kurniawan dan Rasmid

Bidang Geofisika, Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jakarta

Diterima: 11 Februari 2016 | Dicetak: 4 April 2016

**Abstrak.** Sumatera mempunyai sistem tektonik yang menarik untuk dikaji, karena terdapat sistem subduksi yang mengakibatkan dibawah daratan Sumatera terdapat 19 segmen patahan yang memanjang mulai dari Banda Aceh hingga ke Selat Sunda. Tujuan penelitian ini adalah menentukan nilai aktivitas seismik (a) dan nilai kerapuhan batuan (b) pada setiap segmen sepanjang sesar sumatera, dengan menggunakan metode Gutenberg-Richter pada database gempabumi BMKG dan ISC (International Seismological Center) dari mulai 01-01-1964 sampai 31-05-2012. Segmen Barumun dan Segmen Aceh mempunyai nilai  $a = 4.809$  dan  $4.770$ , paling tinggi dibanding segmen lainnya dibawah daratan Sumatra ini, nilai  $a$  paling tinggi ini berarti Segmen Barumun dan Segmen Aceh mempunyai tingkat aktifitas seismik paling tinggi, sedangkan Segmen Sumpur dan Sianok di Sumatera Barat mempunyai nilai  $b$  yang rendah yaitu  $0.237$  dan  $0.382$ . Rendahnya nilai  $b$  tergambar jelas dengan adanya zona seismic gap di wilayah ini. Nilai  $b$  terendah ini berarti nilai kerapuhannya paling kecil sehingga mempunyai elastisitas yang cukup tinggi dan mampu menyimpan stress yang besar, sebelum akhirnya dilepaskan sebagai gempabumi. Jadi Segmen Sumpur dan Sianok merupakan segmen yang perlu diwaspadai, karena batuan pada segmen ini bisa sewaktu-waktu mempunyai potensi gempa dengan kekuatan yang sangat besar. Pengambilan lokasi penelitian pada setiap segmen sesar Sumatera dikarenakan wilayah ini merupakan Megathrust dan dipermukaannya sudah banyak pemukiman, sehingga diharapkan dengan mengetahui lokasi yang mempunyai aktifitas seismik yang tinggi dan nilai kerapuhan batuan yang rendah, dapat dijadikan rujukan untuk keperluan mitigasi diwilayah tersebut. **Kata kunci:** Sumatera, Gutenberg-Richter, nilai N, a, b, M.

**Abstract.** Sumatra has a tectonic system be interesting, because there are subduction system

which resulted in below the Sumatran mainland there are 19 fault segment that extends from Banda Aceh to the Sunda Strait. The purpose of this study is to determine the value of seismic activity (a) and the value of the fragility of the rock (b) in each segment along the Sumatran fault, using the Gutenberg-Richter earthquake database BMKG and ISC (International Seismological Center) from start till 01-01-1964 31-05-2012. Segment Aceh Barumun and has a value of  $a = 4809$  and  $4770$ , the highest compared to other segments below the Sumatran mainland these, a highest value of this means Barumun and Segment Aceh has the highest level of seismic activity, while Segment Sumpur and Sianok in West Sumatra have  $b$  values were low at  $0237$  and  $0382$ . The low value of  $b$  clearly illustrated by the seismic zone gap in this region. The lowest  $b$  value means the value of the smallest vulnerability so as to have a fairly high elasticity and capable of storing large stress, before being released as an earthquake. So Sumpur and Sianok segment is a segment that needs to be watched, because the rocks on this segment could at any time have the potential earthquake with enormous power. Making research sites in each segment Sumatra fault because this region is megathrust and the surface has a lot of settlements, which is expected to know the location that has a high seismic activity and a low value fragility rocks, can be used as a reference for the purposes of mitigation in the region. **Keywords:** Sumatera, Gutenberg-Richter, N-value, a-value, b-value, M-value.

### **Pendahuluan**

Latar belakang dan konsep penelitian ini diawali Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA) Vol 3 No.1, Juni 2013 mengenai "Kajian Awal Tentang  $b$  Value Gempa Bumi Di Sumatera Tahun 1964-2013. Dalam hasil dan diskusinya, Madlazim menulis, <sup>1</sup>"hanya saja dalam penelitian ini tidak dilakukan kajian variasi  $b$  value terhadap

waktu dan ruang, sehingga tidak dapat diketahui daerah Sumatera bagian mana yang memiliki *b value* (nilai kerapuhan batuan) yang rendah" (hal 46). Dalam penelusuran yang dilakukan ternyata dalam menentukan *b value* tidak akan terlepas dari nilai frekuensi (N), nilai aktivitas seismik (a), dan nilai kekuatan gempabumi (M) yang perumusannya ada dalam metoda *Gutenberg-Richter*.

Sumatera mempunyai tektonik yang cukup menarik, selain ada subduksi antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia, juga ada sesar geser yang cukup panjang yaitu sepanjang pulau Sumatera<sup>1,3,8,12,13</sup>. Adapun tujuan penelitian adalah ingin mengetahui, nilai aktivitas seismik (a) dan *b-value* atau nilai b pada 19 segmen sesar geser Sumatera dengan terlebih dahulu mencari frekuensi gempa pada database gempa yang dijadikan acuan, tujuan penerapan akhir dalam penelitian ini adalah ingin mengetahui dibawah daratan Sumatera bagian mana yang memiliki nilai a yang tinggi dan nilai b yang rendah. Penentuan nilai a dan nilai b itu sendiri dapat diketahui bermula dari perumusan *Gutenberg-Richter*.

Dalam teorinya nilai a dan nilai b dapat ditentukan dengan menggunakan metoda *Gutenberg-Richter*. Dalam seismologi, hukum *Gutenberg-Richter* adalah suatu hukum yang mengungkapkan hubungan antara frekuensi (jumlah kejadian) gempabumi dengan besaran atau kekuatan gempa tertentu dalam periode wilayah dan waktu tertentu yang dirumuskan sebagai berikut<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14</sup>.

$$\log N = a - bM \quad [1]$$

atau

$$N = 10^{a - bM} \quad [2]$$

Dengan: N adalah jumlah kejadian (frekuensi) yang dimiliki kekuatan tertentu, M adalah nilai kekuatan gempa, sedangkan a dan b adalah nilai parameter. Hubungan ini pertama kali dikembangkan oleh *Charles Francis Richter dan Beno Gutenberg* (1964).

Di atas sepanjang Sesar Geser Sumatera sebagian merupakan permukiman yang cukup padat, serta terdapat beberapa infrastruktur yang cukup penting, seperti sekolah, pemerintahan, militer, rumah sakit, dan sebagainya. Oleh karena itu, keberadaan Sesar Geser Sumatera perlu mendapat perhatian untuk meminimalisir kerugian, baik secara material maupun immaterial.

Pada penerapannya nilai a dan b ini bervariasi, sehingga referensi lain menyebutkan dengan detail definisi hubungan *Gutenberg-Richter*. Mutiarani dkk (2013) menulis bahwa dalam parameter seismo-tektonik suatu wilayah dapat diketahui dari relasi *Gutenberg-Richter*

(Persamaan 1), dengan N adalah frekuensi gempa, M adalah magnitudo gempa, nilai a merupakan tingkat seismisitas suatu wilayah, dan nilai b merupakan tingkat kerapuhan batuan.

Dari definisi ini, nilai b yang rendah menunjukkan nilai kerapuhan batuan yang rendah, yang berarti batuan tersebut memiliki elastisitas yang tinggi dan mampu menyimpan stress yang besar. Dengan stress yang besar, ketika ada penjalaran getaran gelombang pada batuan tersebut sewaktu-waktu dengan energy yang terakumulasi dan tidak dapat menahan stress lagi maka pada batuan tersebut akan terjadi ledakan yang sangat besar. Dari kondisi pengaruh nilai b yang rendah karena pada lokasi ini memiliki *high probability* yang sewaktu-waktu dapat terjadi gempa besar, dengan dicirikan nilai kerapuhan batuannya rendah.

Parameter a menunjukkan tingkat aktivitas seismik di suatu daerah yang sedang diamati, dan nilai ini tergantung dari tiga faktor, yaitu periode pengamatan, luas daerah pengamatan, dan seismisitas di daerah tersebut. Makin besar nilai a di suatu daerah berarti daerah tersebut memiliki aktivitas seismik yang tinggi, sebaliknya untuk nilai a yang kecil berarti seismiknya rendah.

Secara matematika, parameter b menunjukkan gradient dari persamaan linier hubungan frekuensi dan magnitude:

$$-b = \frac{\log N - a}{M} \quad [3]$$

Dilihat dari persamaannya nilai b berbanding terbalik dengan nilai M, sementara M merupakan nilai kekuatan gempa yang terjadi pada batuan, yang sedang diamati, dimana terjadi gempa bumi dengan magnitudo tertentu sehingga tergantung dari sifat batuan setempat, maka dari itu nilai b merupakan parameter tektonik yang menunjukkan tingkat kerapuhan batuan suatu wilayah.

Parameter b merupakan parameter tektonik yang menunjukkan jumlah relatif dari getaran yang kecil hingga besar dan secara teoritis tidak bergantung pada periode pengamatan, tetapi hanya bergantung pada sifat tektonik dari gempabumi sehingga dapat dianggap sebagai suatu parameter karakteristik suatu gempabumi untuk daerah tektonik aktif<sup>4,7</sup>.

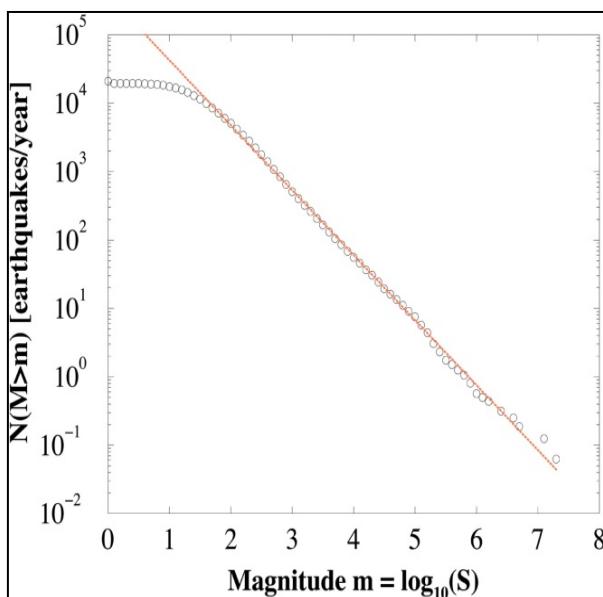
Beberapa ahli mengatakan bahwa nilai b ini konstan dan bernilai sekitar -1 s/d 1. Meskipun demikian sebagian besar ahli berpendapat bahwa nilai b ini bervariasi terhadap daerah dan kedalaman fokus gempa, serta bergantung pada keheterogenan dan distribusi ruang stress dari volume batuan yang menjadi sumber gempa<sup>4,7</sup>.

Menurut para ahli parameter fundamental yang mempengaruhi besar kecilnya nilai b adalah akumulasi stress (tegangan) yang bekerja pada batuan. Nilai b rendah berasosiasi dengan stress tinggi, begitu pula sebaliknya, nilai b tinggi berasosiasi

dengan stress yang rendah. (Scholz, 1968)<sup>6,7,8,9,10,14</sup>

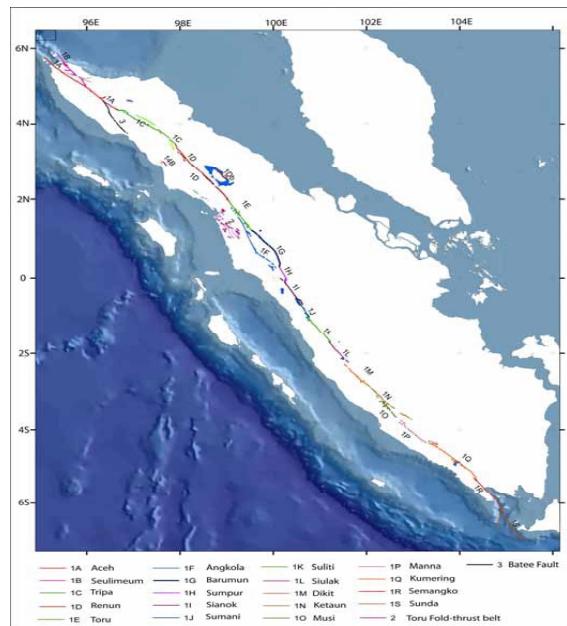
Kedalaman dimana tempat terjadinya gempabumi itulah yang mencerminkan karakteristik batuan tersebut<sup>14</sup>. Penggunaan metoda Gutenberg-Richter pada data gempabumi menggunakan data statistik, karena data gempabumi yang digunakan adalah nilai magnitude dengan nilai kedalaman gempa yang bervariasi dengan rentang waktu yang lama, sehingga statistik merupakan hal penting yang dilakukan penelitian ini<sup>9,10</sup>.

Secara grafik dapat ditunjukkan salah satu contoh hubungan antara nilai N, M, a dan b. Dari grafik menunjukkan nilai M pada koordinat X, dan Nilai N pada koordinat Y, sedangkan nilai b, adalah bulatan kecil yang menunjukan kejadian gempa dengan magnitude M dan frekuensi N, dan a adalah nilai titik pertemuan dengan nilai b, terlihat bahwa untuk magnitude besar, nilai b mempunyai frekuensi yang kecil, dan sebaliknya untuk magnitude kecil, gempa pada nilai b yang tinggi mempunyai frekuensi yang besar (Gambar 1).



Gambar 1. Contoh grafik Hubungan antara nilai N, M, a dan b.

Sesar Sumatra yang membelah Pulau Sumatera sangat tersegmentasi. Segmen-semen sesar sepanjang 1900 kilometer tersebut merupakan akibat dari tekanan miring antara lempeng Eurasia dan India-Australia dengan arah tumbukan 10°N-7°S. Sedikitnya terdapat 19 segmen dengan panjang masing-masing segmen berkisar 60-200 kilometer (gambar 2)<sup>13</sup>.



Gambar 2. Segmentasi Sesar Sumatera<sup>13</sup>.

Pulau Sumatera memiliki tatanan tektonik yang unik. Di sebelah barat Pulau Sumatera membentang zona subduksi yang sejajar dengan garis pantai Sumatera. Sementara di darat membentang sesar Sumatera yang membelah Pulau Sumatera menjadi dua dari teluk Andaman di ujung utara sampai teluk Semangko di ujung selatan yang sejajar dengan kelurusan zona subduksi<sup>11,12,13,14</sup>.

Berdasarkan lokasi permukaannya, segmen-semen tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Lokasi Permukaan Segmen Sumatera<sup>13</sup>.

No	Lokasi Permukaan	Segmen
1.	NAD	Seulimeum
2.	NAD	Aceh
3.	NAD	Tripa
4.	Sumatera Utara	Renun
5.	Sumatera Utara	Angkola
6.	Sumatera Utara	Toru
7.	Sumatera Utara	Barumun
8.	Sumatera Barat	Sumpur
9.	Sumatera Barat	Sianok
10.	Sumatera Barat	Sumani
11.	Sumatera Barat	Suliti
12.	Jambi	Siulak
13.	Jambi	Dikit
14.	Jambi	Ketaun
15.	Palembang	Musi
16.	Bengkulu	Manna
17.	Lampung	Kumering
18.	Lampung	Semangko
19.	Selat Sunda	Sunda

## Metodologi

Tahap inti dalam pengolahan data meliputi :

- a. Mencari data gempa sesuai dengan koordinat lokasi penelitian segmen di sepanjang sesar sumatera
- b. Seleksi data dan penyeragaman magnitude menjadi moment magnitude (Mw).
- c. Decluster katalog untuk menghilangkan gempa susulan.
- d. Perhitungan nilai-a, nilai-b
- e. Membuat peta nilai a dan nilai b

Setelah seleksi data dan decluster catalog pada lokasi penelitian, maka perhitungan pertama adalah menentukan variasi semua nilai b dalam batas koordinat penelitian yang digunakan, nilai b ini dapat ditentukan dengan metode *leastsquare* atau maksimum likelihood. Metode maksimum likelihood menggunakan persamaan yang diberikan Utsu (1967), yaitu:

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_{min}} = \frac{0,4343}{\bar{M} - M_{min}} \quad [4]$$

Dengan  $\bar{M}$  adalah magnitude rata-rata dan  $M_{min}$  adalah magnitude minimum. Dengan standar deviasi dihitung menggunakan formula dari Shi dan Bold (1982) sebagai berikut:

$$\delta b = 2,30b^2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 / n(n-1)} \quad [5]$$

Adapun seismisitas untuk wilayah Sumatera bagian barat seperti pada Gambar 3 yang merupakan hasil pengolahan data dengan menggunakan metoda *Gutenberg-Richter*, dengan memasukkan nilai b yang diperoleh dari persamaan Utsu.

*Database* yang tersedia pada pengolahan data adalah mulai 01-01-1964 s/d 30-11-2012 dan jumlah total data gempabumi yang tersedia dan dapat diakses sampai dengan 11083 data dengan range magnitude 1,68-9,9 dengan kedalaman 0-60 km, database pada kedua situs ini memiliki panjang data yang cukup baik untuk dapat dilakukannya pengolahan secara statistik.

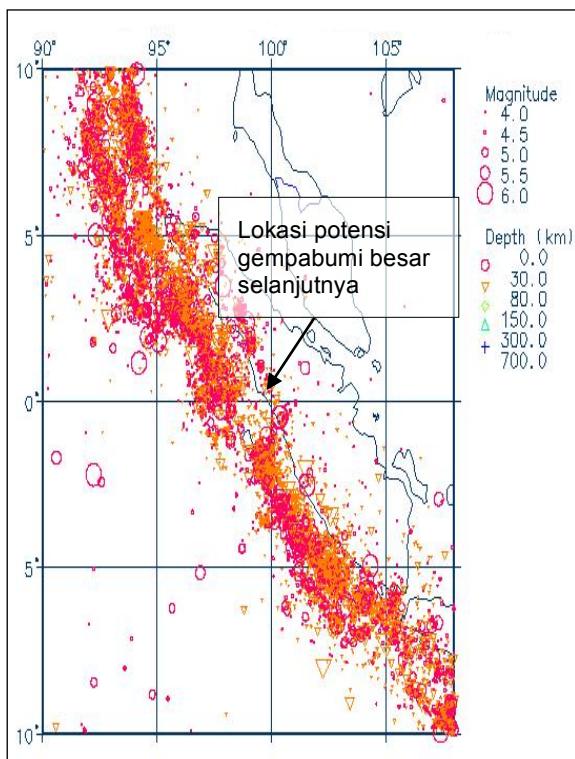
Sedangkan secara deskriptif tahap pengolahan data dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Pilih database yang ingin diteliti, dengan mengacu pada kebutuhan baik range periode, jumlah gempa dan update terakhir, pada tulisan ini menggunakan database BMKG & ISC.
2. Setelah memilih data base BMKG & ISC, melakukan setting parameter.
3. Menentukan range waktu gempa yang diinginkan, dalam penelitian ini, diambil semua range gempa yang ada, agar data statistik menjadi maksimal dengan tujuan data hasil penelitian lebih akurat.

4. Menentukan koordinat lokasi penelitian, dalam tulisan ini kita mengganti koordinat sesuai koordinat setiap segmentasi sesar sumatera yang ingin diteliti.
5. Memasukkan nilai kedalaman gempa, dalam tulisan ini diambil semua data gempa dengan semua kedalaman dari 0-60 km (kategori gempa dangkal), dan tidak pernah berubah untuk semua segmen, pengambilan data untuk kejadian gempa dengan kedalaman sumber gempa 0-60 km dengan tujuan agar diperoleh data nilai aktivitas seismic dan data nilai karakter batuan yang mendekati dengan lokasi kedalaman segmen tersebut, selain itu dengan data kedalaman sumber gempa yang masuk kategori dangkal yang mempunyai potensi bahaya yang besar dapat menjadi nilai acuan dalam rangka mitigasi daerah tersebut.
6. Memasukkan nilai magnitudo gempa, dalam tulisan ini diambil semua data gempa dengan semua magnitudo dari 1,68-9,9 SR, dan tidak pernah berubah untuk semua segmen, dengan tujuan agar data lengkap dan dapat dibandingkan hasilnya untuk semua segmen.
7. Seleksi data dan penyeragaman magnitude menjadi moment magnitude (Mw).
8. Decluster katalog untuk menghilangkan gempa susulan
9. Setelah itu mulai melakukan pengolahan data, pertama mencari nilai N dengan Plot Hypo
10. Perhitungan nilai-a, nilai-b
11. Membuat peta nilai a dan nilai b
12. Setelah diperoleh nilai N, a dan b. Lakukan pengolahan kembali untuk segmen yang lain dengan koordinat yang berbeda, dengan nilai range magnitude dan kedalaman yang sama.

## Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengolahan data dengan metoda yang telah dilakukan, secara keseluruhan data seismisitas pulau sumatera dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



**Gambar 3.** Seismisitas di Sumatera dari 1964-2012 (Sumber data: BMKG & ISC).

**Tabel 2.** Hasil Pengolahan Data Segmen Sumatera

Lokasi Permukaan	Segmen	N	a	b
NAD	Seulimeum	21	4.187	0.899
<b>NAD</b>	<b>Aceh</b>	<b>294</b>	<b>4,770</b>	<b>0,772</b>
NAD	Tripa	58	3.549	0.659
Sumatera Utara	Renun	91	3.509	0.608
Sumatera Utara	Angkola	59	4.228	0.807
Sumatera Utara	Toru	60	3.963	0.747
<b>Sumatera Utara</b>	<b>Barumun</b>	<b>64</b>	<b>4.809</b>	<b>0.930</b>
Sumatera Barat	Sumpur	43	2.468	0.237
<b>Sumatera Barat</b>	<b>Sianok</b>	<b>17</b>	<b>1.681</b>	<b>0.382</b>
Sumatera Barat	Sumantri	8	2.729	0.668
Sumatera Barat	Suliti	22	4.183	0.893
Jambi	Siulak	6	2.131	0.566
Jambi	Dikit	21	3.364	0.715
Jambi	Ketaun	32	3.302	0.662
Palembang	Musi	54	4.45	0.58
Bengkulu	Manna	79	3.527	0.626
Lampung	Kumering	74	3.822	0.696
Lampung	Semangko	55	3.159	0.580
Selat Sunda	Sunda	1	3.154	0.607

Dari tabel terlihat jelas jika Segmen Barumun dan Segmen Aceh mempunyai nilai frekuensi (N) dan aktivitas seismik (a) yang tinggi, ini memang sesuai dengan teori dan perumusan metoda Gutenberg Richter, bahwa  $N \approx a$ , artinya Segmen yang mempunyai frekuensi gempa yang tinggi, mempunyai nilai a yang besar, karena aktivitas seismik yang tinggi menyebabkan lokasi tersebut mengalami kejadian gempa yang lebih banyak, meskipun hanya gempa-gempa kecil. Dari data diatas segmen Barumun dan Segmen Aceh merupakan segmen yang terdiri dari batuan yang mudah patah/ nilai elastisitasnya rendah, sehingga ketika ada stress yang bekerja, maka gaya tersebut akan segera dilepaskan.

Segmen Sumpur dan Sianok mempunyai nilai b yang paling kecil, Sesuai dengan definisi, bahwa nilai b hanya menunjukkan nilai karakter kerapuhan batuan daerah tersebut. Berdasarkan data tersebut, segmen Sumpur dan Sianok mempunyai nilai b yang kecil dibandingkan dengan segmen lainnya di Sumatera, ini menunjukkan bahwa batuan di kedua segmen tersebut tingkat elastisitasnya cukup tinggi, jadi segmen ini masih mampu menahan stress yang bekerja pada segmen tersebut. Tingkat keelastisan dari kedua segmen tersebut dibuktikan dengan adanya seismik gap seperti terdapat pada Gambar 3 sebelumnya. Berdasarkan peta seismisitas (Gambar 3), terlihat jelas bahwa pada kedua segmen tersebut kejadian atau event gempa jarang terjadi, ini mengindikasikan bahwa batuan tersebut masih dapat menahan stress yang datang dari luar. Akan tetapi yang perlu diwaspadai adalah wilayah yang mempunyai *seismic gap* seperti ini, karena jika batuannya tidak mampu menahan stress lagi, maka batuan batuan tersebut akan patah dan menimbulkan gempabumi yang cukup besar. Berdasarkan definisi diatas bahwa batuan yang mempunyai nilai b yang kecil, batuan tersebut mempunyai kerapuhan yang kecil atau elastisitas yang tinggi, karena batuan yang mempunyai elastisitas yang tinggi berarti punya kemampuan menahan dan menyimpan energi yang datang pada batuan tersebut sampai batas elastisitasnya yang maksimum. dan jika ada energi lagi yang datang pada batuan tersebut dan sudah tidak mampu lagi menahan stress, maka akan batuan tersebut akan patah yang dimanifestasikan dalam bentuk gempabumi. Sehingga Segmen Sumpur dan Sianok merupakan segmen yang perlu diwaspadai karena mempunyai nilai kerapuhan batuan (b) yang paling kecil dibandingkan dengan segmen lainnya dibawah permukaan Sumatera ini.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisa, diperoleh bahwa setiap segmen pada Sesar Geser Sumatera mempunyai tingkat aktivitas seismik dan karakter batuan yang berbeda. Jumlah frekuensi gempa yang besar pada suatu segmen menunjukkan bahwa segmen tersebut mempunyai nilai aktivitas seismik yang tinggi, artinya kegiatan aktivitas gesekan lempeng-lempeng dibawahnya sangat aktif dan sering terjadi sehingga frekuensinya terjadinya gempa bumi sangat tinggi.

Nilai  $b$  yang rendah seperti pada segmen Sianok dan Sumpur menunjukkan bahwa segmen tersebut mempunyai karakter batuan yang mempunyai elastisitas batuan yang cukup tinggi, sehingga ketika ada stress bekerja pada batuan tersebut, tidak langsung dilepaskan tetapi disimpan dulu stress tersebut, sampai batas batuan tersebut tidak dapat menampung lagi stress. Ini di indikasikan dengan adanya *seismic gap*. Karakter batuan jenis ini adalah menghasilkan gempa-gempa yang cukup besar tetapi frekuensi gemparnya kecil/sedikit. Segmen berjenis seperti inilah yang perlu diwaspadai untuk keperluan mitigasi. Perlu dipersiapkan sarana dan prasarana untuk kepentingan mitigasi bencana.

Lebih lanjut lagi, Segmen Sianok dan Sumpur merupakan Segmen yang memerlukan penelitian lebih lanjut, karena sesudah mengetahui di kedua Segmen tersebut ini mempunyai potensi gempa yang sangat besar, maka perlu diteliti mengenai periode ulang gempa-gempa yang besar serta merusak yang menimbulkan korban jiwa dalam rangka mitigasi tersebut.

Bagi para peneliti yang akan mengembangkan metoda ini, pengolahan hasil data pada wilayah penelitian Sumatera masih dapat diperluas, karena masih banyak data-data yang belum diolah agar hasil analisa menjadi lebih akurat, saran dalam penelitian selanjutnya adalah perbandingan dengan banyak metode dan sumber data base gempa lain yang lebih lengkap agar mengetahui hubungan yang lebih akurat antara setiap parameter khususnya nilai parameter  $b$  yang merupakan karakteristik batuan. Dengan banyak data mengetahui distribusi nilai aktifitas seismik dan nilai parameter karakteristik batuan bisa memungkinkan untuk menjadi data prekursor suatu wilayah, sehingga dapat menjadi mitigasi kejadian gempa yang besar. Pengambilan data sebanyak-banyaknya, karena semakin banyak data yang diambil, maka hasil yang didapatkan memiliki peluang lebih baik dan akurat.

## Daftar Pustaka

- Abdillah, 2010, Analisis kereaktifan dan resiko gempabumi pada zona subduksi daerah Pulau Sumatera dan sekitarnya dengan Metode Least Square, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Faizah, R., A.W. Habib, Widodo, 2013, Probabilitas Kejadian Gempabumi Pada Masa Mendatang Di Zona Sesar Sumatera. Seminar Nasional Statistika dalam Managemen Kebencanaan, Fakultas MIPA, UII Yogyakarta, 15 Juni 2013
- Hidayah R. dan Madlazim, 2014. Hubungan  $b$ - Value Dengan Frekuensi Kejadian Dan Magnitudo Gempa Bumi Menggunakan Metode Gutenberg-Richter Di Sulawesi Tengah Periode 2008-2014. Inovasi Fisika Indonesia, 3 (2).
- Madlazim, 2013. Kajian Awal Tentang  $b$ -Value Gempa Bumi Di Sumatera 1964-2013. Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA) Vol 3 No 1, Juni 2013.
- Mutiarani, A., Madlazim, T. Prastowo, 2013, Studi  $b$ - VALUE Untuk Pengamatan Seismisitas Wilayah Pulau jawa Periode 1964-2012 Vol 2, No 2.,
- Natawidjaja, D.H. 2007. Gempabumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup Yang Aman Dari Bencana Alam).
- Nurdyanto, B., B. Sunardi, H. Harsa, D. Ngadmant, P. Susilanto, S. Rohadi, N. Efendi, J Nugraha, Guswanto, D.L. Sari, 2010, Laporan Akhir Integrasi Pengamatan Parameter Geofisika Dalam Usaha Prediktabilitas Gempa Bumi Program Insinas Kemenristek
- Pertiwi, CP, 2010, Analisis Peluang Terjadinya gempa Bumi dengan metode likelihood untuk daerah papua dan sekitarnya .
- Pratiwi, W., S. Rohadi, A.D. Nugraha, 2012. Analisis Korelasi Variasi Spasial dan Temporal  $b$ -value Terhadap Stress, Seismisitas, dan Tektonik Studi Kasus : Pulau Bali, Lombok, dan Sumbawa. J. Geofisika Vol. 13 No. 2/2012.
- Rohadi, S. 2009. Studi Seismotektonik Sebagai Indikator Potensi Gempa Bumi di Wilayah Indonesia. Balai Besar Meteorologi dan Geofisika Wilayah II Jakarta.
- Rohadi, S., H. Grandis, M.A. Ratag, 2008. Studi Potensi Seismotektonik Sebagai Prekursor Tingkat Kegempaan Di Wilayah Sumatera (JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA, Vol. 9 No.2 November 2008 : 101 – 108)
- Sunardi, B. 2009. Analisa Fraktal Dan Rasio Slip Daerah Bali-NTB Berdasarkan Pemetaan Variasi Parameter Tektonik.
- Unified scaling law for earthquakes, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, [http://www.pnas.org/content/99/suppl\\_1/2509/F2.expan sion.html](http://www.pnas.org/content/99/suppl_1/2509/F2.expan sion.html), diakses 21 Januari 2015.