

Variasi spasial dan temporal nilai- b pada gempa bumi di wilayah Sulawesi Tengah, Gorontalo, dan sekitarnya menggunakan metode *robust fitting*

(Spatial and temporal variation of b -value of an earthquake in the Central Sulawesi, Gorontalo, and surrounding areas using robust fitting method)

Nina Fitriyati*, Madona Yunita Wijaya, M. Alvi Bisyri

Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta

*korespondensi: nina.fitriyati@uinjkt.ac.id

Received: 01-09-2022, accepted: 27-09-2022

Abstract

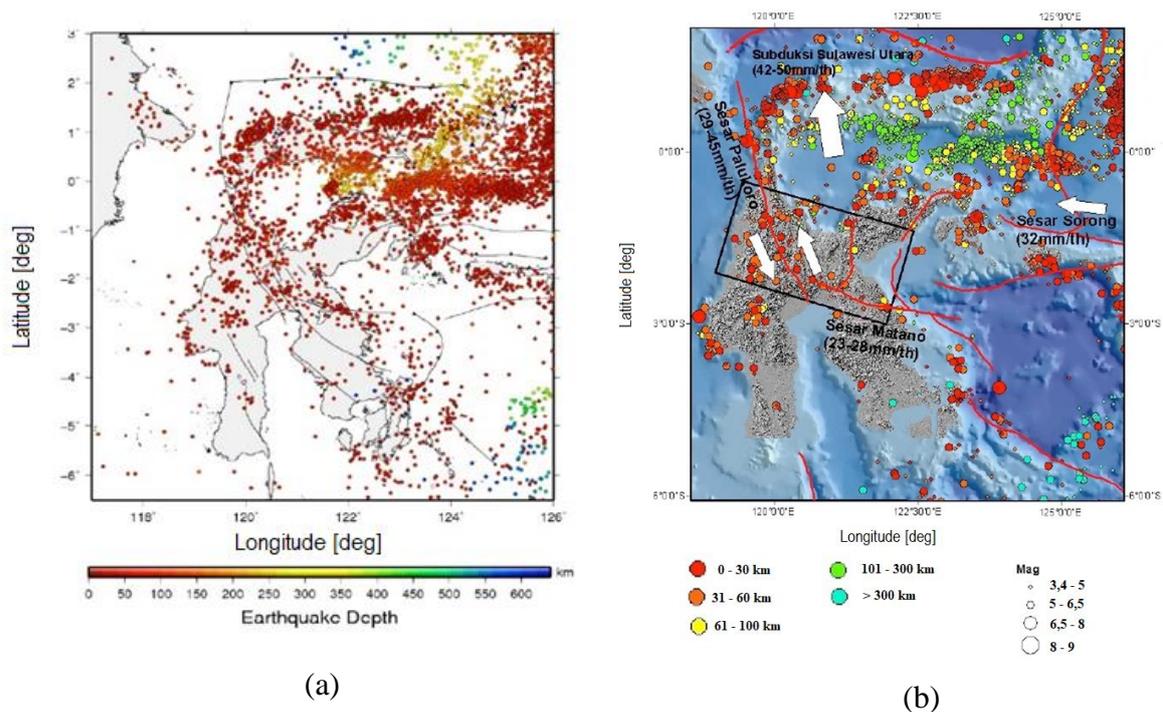
This study discusses variation in seismic and tectonic modeled by a Gutenberg-Richter relationship for earthquakes in the Central Sulawesi, Gorontalo, and surrounding areas using the Robust Fitting Method (RFM) with the weight function of Tukey's bisquare. The declustering process on earthquake data is carried out using the Reasenberg equation. The values for both parameters are analyzed spatially and temporally. In the spatial analysis, the research area is divided into 43 grids. In the temporal analysis, the research area is divided into zone A and zone B. The data grouping is done using a sliding time window method, i.e., grouping 50 earthquake catalogs with 5 overlapping events. The results according to spatial analysis show that the b -values range from 0.38 – 1.19. Areas with low b -values (0.38 – 0.7) occur around the Palu-Koro Fault, i.e., Palu city, Malacca strait, and to Toli-Toli, and also in the northern region of Gorontalo, i.e., the subduction plate of the Sulawesi Sea. Meanwhile, high b -values (0.71 – 1.19) are in the Tomini Bay area which is an area with frequent occurrence of earthquakes but has the small potential to generate large-scale earthquakes. The results of the temporal b -value estimation in zones A and B range between values of 0.38 - 1.25. The b -values appear to decrease before the occurrence of major earthquakes in 1996 and 2018 in zone A. The b -values decreased before the occurrence of major earthquakes in 1990, 1991, 2000, and 2008 in zone B. However, the b -values cannot be used as a precursor before the big earthquake in 1997.

Keywords: Tukey's bisquare, Reasenberg equation, Gutenberg-Richter relationship, sliding time window, Robust Fitting Method.

MSC2020: 86A15

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kegempaan yang cukup tinggi. Hal ini terjadi karena Indonesia berada di daerah pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Eurasia, Samudra Pasifik dan Indo-Australia. Hal ini menyebabkan banyak pulau di Indonesia rawan akan terjadinya gempa bumi, salah satunya adalah Pulau Sulawesi. Berdasarkan buku peta sumber gempa bumi dan bahayanya di Indonesia yang disusun oleh Pusat Studi Gempa bumi Nasional (PuSGen) [1], seismisitas di Pulau Sulawesi berkaitan dengan sejumlah sesar dan subduksi di Sulawesi Tengah dan Gorontalo yaitu Sesar Palu Koro, Sesar Gorontalo, Sesar Matano, dan Subduksi Lempeng laut Sulawesi dan Subduksi Sangihe. Peta seismisitas Sulawesi untuk magnitudo gempa $\geq 4,5$ SR dan struktur geologi di Pulau Sulawesi dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar ini dapat diamati bahwa gempa-gempa dangkal di darat secara umum terjadi di sekitar Sesar Palu-Koro dan Sesar Matano serta terjadi juga gempa dengan magnitudo ≥ 6 SR di kedua sesar tersebut. Sementara gempa-gempa yang terjadi di Teluk Tomini dipengaruhi oleh aktivitas subduksi Lempeng Laut Sulawesi dan subduksi Sangihe.



Gambar 1. (a) Peta seismisitas dari katalog PuSGeN 2017 untuk magnitudo gempa $\geq 4,5$ SR dan (b) struktur geologi Pulau Sulawesi [1].

Mengingat tingkat kegempaan yang tinggi di Pulau Sulawesi, diperlukan suatu metode untuk menggambarkan kondisi tektonik dan potensi gempa bumi besar di wilayah tersebut. Prediksi tingkat kegempaan sangat bermanfaat untuk mengantisipasi kerusakan yang diakibatkan oleh gempa tersebut. Salah satu antisipasi yang dapat dilakukan adalah dengan mengasuransikan bangunan dan kendaraan sehingga kerugian dapat diminimalisir [2].

Potensi terjadinya gempa bumi di suatu wilayah dapat diketahui dengan mempelajari tentang kondisi tektonik dan aktivitas kegempaan melalui pendekatan hubungan antara frekuensi kejadian dan magnitudo gempa bumi. Hubungan tersebut masih didominasi oleh relasi *Gutenberg-Richter* [3]. Da Silva [3] mengeneralisasi relasi Gutenberg-Richter berdasarkan fungsi probabilitas. Relasi Gutenberg-Richter merupakan hubungan antara frekuensi kejadian gempa bumi dengan Magnitudo, yang dinyatakan dalam bentuk berikut [4]:

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

dengan M adalah magnitudo gempa bumi, $N(M)$ adalah jumlah kumulatif gempa bumi dengan magnitudo $\geq M$, nilai a dan b adalah parameter. Nilai a adalah parameter seismik pada suatu wilayah yang menunjukkan tingkat aktivitas kegempaan di suatu wilayah yang besarnya bergantung pada periode observasi dan luasnya wilayah [5]. Sedangkan nilai- b adalah parameter tektonik yang menggambarkan kondisi tektonik pada suatu wilayah yang berhubungan dengan aktivitas kegempaan. Nilai- b disebut juga dengan koefisien parameter M . Nilai- b yang rendah pada suatu wilayah mengindikasikan adanya potensi gempa besar. Sedangkan nilai- b yang tinggi mengindikasikan potensi kecil terjadinya gempa bumi besar [5].

Pencarian nilai- b terhadap ruang yang menjadi parameter seismotektonik di suatu wilayah disebut nilai- b secara spasial dan dinotasikan dengan nilai- $b(s)$. Nilai- $b(s)$ menjelaskan distribusi frekuensi magnitudo yang terjadi dalam data seismik, sehingga variasi nilai- $b(s)$ menjadi salah satu komponen kunci dari peta bahaya seismic [6]. Nilai- b yang tinggi berkaitan intensitas stres yang rendah atau heterogenitas material yang tinggi [7]. Perubahan nilai- b secara temporal baik dalam jangka pendek, menengah dan panjang dapat menjadi suatu *prekursor* (tanda-tanda awal terjadinya gempa bumi). Hasil penelitian [8] menunjukkan bahwa gempa bumi besar didahului oleh peningkatan nilai- b dalam jangka waktu menengah kemudian diikuti oleh penurunan nilai- b dalam beberapa bulan sebelum terjadinya gempa bumi besar. Penelitian mengenai variasi spasial dan temporal nilai- b telah dilakukan untuk meneliti pola kegempaan dan potensi gempa di wilayah Pulau Jawa [9], [10], wilayah Papua [5], wilayah Taiwan [11].

Beberapa metode estimasi nilai- b telah dikembangkan. Salah satunya adalah metode *least square*. Namun metode ini menghasilkan estimasi nilai- b yang bias karena hasil estimasi sangat rentan terhadap data pencilan [12]. Aki [13] mengusulkan penggunaan metode *Maksimum Likelihood Estimation* (MLE) dan Maslov dan Anokhin [14] mengusulkan penggunaan *Generalized Logistic equation* (GLE). Menurut Han dkk. [15], MLE memberi terlalu banyak bobot untuk kejadian gempa yang kecil dan sensitivitasnya terhadap amplitudo kelengkapan *Magnitude of Completeness* (M_c) sangat luas. Sehingga nilai- b hasil MLE dapat memiliki penyimpangan yang besar jika M_c tidak ditentukan secara akurat. Oleh karena itu, Han dkk. [15] mengusulkan metode *Robust Fitting Method* (RFM). RFM memberikan nilai- b yang lebih stabil dan memiliki sensitivitas yang baik

terhadap terjadinya gempa bumi besar. Hasil penelitian Han dkk. [15] menunjukkan bahwa variasi nilai- b menggunakan RFM lebih efektif sebagai *prekursor* gempa bumi dibandingkan MLE.

RFM yang dikembangkan oleh Han dkk. [15] adalah metode estimasi yang tangguh (*robust*) untuk parameter M yang disebut *Iteratively Reweight Least Square (IRLS)* dengan fungsi pembobot *Bisquare Tukey*. Metode tersebut telah digunakan di beberapa penelitian salah satunya Bai dkk. [16]. Bai dkk. [16] merekomendasikan fungsi bobot *Bisquare Tukey* karena kinerja yang baik.

Pada penelitian ini akan dikaji estimasi parameter tektonik melalui nilai- b pada relasi *Gutenberg-Richter* untuk Sulawesi Tengah, Gorontalo, dan sekitarnya menggunakan Metode RFM dengan bobot *Bisquare Tukey*. Estimasi parameter dilakukan secara spasial maupun temporal. Variasi nilai- b secara spasial digunakan untuk mengetahui nilai- b di beberapa wilayah Sulawesi Tengah dan Gorontalo yang berpotensi terjadinya gempa besar. Sedangkan variasi nilai- b secara temporal digunakan untuk mengetahui naik turunnya nilai- b terhadap waktu sebagai *prekursor* terjadinya gempa bumi. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data katalog gempa bumi Sulawesi Tengah dan Gorontalo tahun 1985 – 2020 dengan batas wilayah $3,8^\circ$ LS – $1,8^\circ$ LU dan 119° BT – $123,65^\circ$ BT yang diambil dari *National Earthquake Information Center (NEIC) USGS* <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes> [17]. Data berjumlah 3078 kejadian gempa bumi yang berupa titik terjadinya gempa bumi (*longitude* dan *latitude*), waktu kejadian gempa bumi (tahun, bulan, hari, jam, menit), kedalaman gempa bumi dan magnitudo gempa bumi.

2. Metodologi

Gempa bumi yang terjadi di Sulawesi tengah dan Gorontalo diakibatkan oleh pergerakan tektonik yang berbeda-beda. Seperti gempa besar di Gorontalo pada tahun 2008 disebabkan oleh aktivitas subduksi lempeng laut Sulawesi. Kemudian gempa besar di Palu pada tahun 2018 disebabkan oleh aktivitas sesar Palu Koro. Untuk menganalisis nilai- b , data perlu dipisahkan menjadi gempa utama dan gempa susulan melalui algoritma *declustering*. Algoritma ini digunakan untuk mengidentifikasi gempa susulan dan mengelompokkannya sesuai dengan zona interaksi spasial dan temporal. Salah satu algoritma *declustering* adalah melalui persamaan Reasenberg berikut [18]:

$$\tau = -\ln(1 - p_1)t/10^{2(\Delta M - 1)/3}, \quad (2)$$

dengan τ adalah nilai *look-ahead time* untuk membangun kluster ketika kejadian gempa bumi pertama tidak berkluster, p_1 adalah peluang terjadinya gempa utama, x_{meff} adalah magnitudo *cut-off* dari katalog gempa, t adalah waktu, dan $\Delta M = M_{\text{gempa utama}} - x_{meff}$. Berikut adalah nilai parameter standar dari algoritma *declustering* Reasenberg

berdasarkan pusat pengujian RELM [19]. Algoritma *declustering* versi terakhir dapat diunduh dari *website* USGS dengan nama CLUSTER2000. Beberapa nilai input parameter pada algoritma tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 [20].

Berikut adalah penjelasan beberapa istilah pada Tabel 1: τ_{min} dan τ_{max} , masing-masing, adalah nilai minimum atau nilai maksimum dari *look-ahead time* untuk membangun kluster ketika kejadian gempa bumi pertama tidak berkluster, p_1 adalah probabilitas untuk mendeteksi kejadian pada kluster berikutnya digunakan untuk menghitung τ , x_k adalah peningkatan magnitudo *cut-off* yang lebih rendah selama pengclusteran : $x_{meff} = x_{meff} + x_k M$, r_{fact} adalah jumlah jari-jari retakan yang mengelilingi setiap gempa bumi dalam peristiwa baru yang dianggap sebagai bagian dari kluster. Setelah proses *declustering*, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai M_c .

Tabel 1. Nilai parameter standar pada algoritma *declustering* Reasenberg [20].

Parameter	Nilai Standard	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
τ_{min} (hari)	1	0,5	2,5
τ_{max} (hari)	10	3	15
p_1	0,95	0,9	0,99
x_k	0,5	0	1
x_{meff}	1,5	1,6	1,8
r_{fact}	10	5	20

Nilai M_c didefinisikan sebagai magnitudo terendah dari 100% gempa bumi dalam volume ruang-waktu yang terdeteksi [21]. Nilai M_c dapat berbeda-beda di setiap wilayah yang diteliti. Penentuan nilai M_c sangat berpengaruh pada nilai-*b* karena nilai M_c berpengaruh pada jumlah sampel yang dapat diambil. Jika nilai M_c diambil terlalu tinggi maka jumlah sampel akan sangat sedikit karena akan banyak data yang dibuang. Namun jika nilai M_c diambil terlalu kecil maka hasil estimasi nilai parameter seismisitas akan menjadi bias. Pada penelitian ini, nilai M_c ditentukan menggunakan metode *maximum curvature* (MAXC). Metode ini merupakan cara cepat dan mudah dalam memperkirakan nilai M_c , yaitu dengan menentukan titik kelengkungan maksimum dengan menghitung nilai maksimum turunan pertama dari kurva frekuensi magnitudo [22]. Meskipun mudah dalam penerapannya, namun menurut penelitian Mignan dkk. [21], teknik MAXC *valid* dalam pemetaan M_c resolusi tinggi. Untuk mencapai hasil yang stabil, teknik MAXC memerlukan sampel kejadian yang lebih sedikit dibandingkan teknik lain.

Untuk menganalisis nilai-*b* secara spasial dan temporal, nilai-*b* dihitung menggunakan RFM. Metode ini diusulkan oleh Han dkk. [15]. RFM dapat meminimalkan pengaruh penciran seperti yang terjadi pada *least square*, memberikan nilai-*b* yang stabil dan handal tanpa persyaratan ketat untuk M_c . Selain itu RFM juga dapat memberikan variasi nilai-*b* sebagai prekursor gempa besar dengan baik dibanding MLE. Pada penelitian ini,

algoritma RFM yang digunakan untuk mengestimasi nilai- b adalah *Iteratively Reweighted Least Square* (IRLS) dengan fungsi pembobot *Bisquare Tukey* sebagai berikut [16]:

$$w = \begin{cases} (1 - (\frac{u_i}{k})^2)^2 & |u_i| < k \\ 0 & |u_i| \geq k \end{cases}, \quad (3)$$

dengan u_i adalah residual ke- i , k adalah konstanta tuning yang digunakan untuk menentukan kekuatan penaksiran terhadap pencilan dan efisiensi penaksiran dalam ketidakadaan pencilan [23], [24]. Fungsi pembobot ini memiliki kinerja yang baik dalam kasus *outlier laverage* yang rendah dan tinggi [16].

Berikut adalah prosedur RFM dengan estimasi nilai- b menggunakan IRLS dan fungsi pembobot *Bisquare Tukey* [15]:

- 1) Memfit model (1) menggunakan *weighted least square* (WLS).
- 2) Menghitung r_{adj} (*adjusted residual*) menggunakan persamaan berikut:

$$r_{adj} = \frac{r_i}{\sqrt{1 - h_i}},$$

dengan r_i adalah *residual least squares* ke- i dan h_i adalah leverages yang menyesuaikan residual dengan menurunkan bobot poin pada data high-leverage yang memiliki efek besar pada model fit menggunakan WLS. *Adjusted residual* (r_{adj}) terstandarisasi dihitung menggunakan persamaan:

$$u = \frac{r_{adj}}{k.s},$$

dengan k adalah konstanta tuning dan s adalah variansi robust yang dihitung menggunakan persamaan:

$$s = \frac{MAD}{0.6745} = \frac{\text{median}\{r_i - \text{median}(r_i)\}}{0.6745},$$

dengan MAD adalah *Median absolute deviation*. Konstanta 0,6745 dipilih sedemikian sehingga estimator nilai s menjadi unbiased dari σ jika jumlah sampel besar dan error berdistribusi normal [25].

- 3) Menghitung *robust weights* menggunakan persamaan (3) dengan $k = 1$.
- 4) Jika model fit konvergen, maka iterasi selesai, jika tidak maka lakukan iterasi berikutnya dengan kembali ke langkah no 1).

Pada analisis nilai- b secara spasial, disebut nilai- $b(s)$, wilayah Sulawesi Tengah, Gorontalo, dan sekitarnya akan dibagi menjadi beberapa grid dengan ukuran $0.49^\circ \times 0.49^\circ$. Peta spasial nilai- b dilakukan dengan bantuan *Software ArcMap*. Sedangkan untuk analisis nilai- b secara temporal, disebut nilai- $b(t)$, jangka waktu penelitian dilakukan

pada tahun 1985 sampai dengan 2020. Perhitungan nilai- $b(t)$ menggunakan metode *sliding time window* yaitu nilai- $b(t)$ dihitung untuk N Gempa bumi seperti yang digunakan dalam penelitian [5], [15], [26]. Kemudian *time window* digeser dengan jumlah gempa bumi tetap dan seterusnya sampai gempa bumi terakhir. Penggeseran window ini disebut *overlap*. Pada penelitian ini kami memilih $N = 50$ dan overlap 5 gempa bumi.

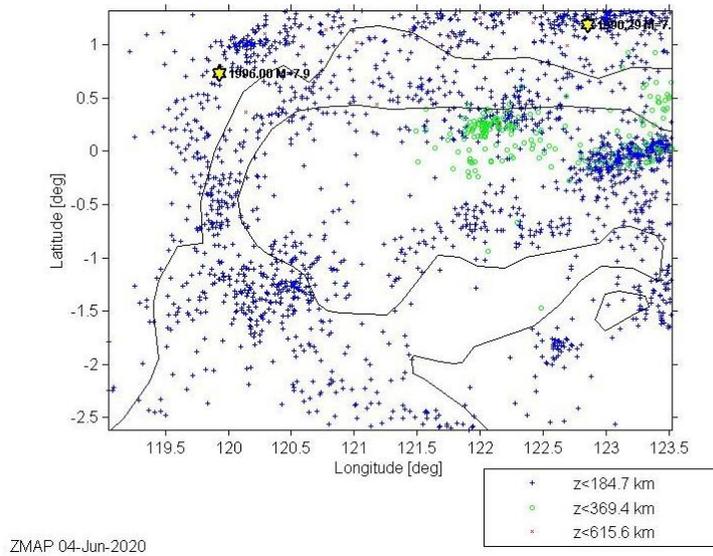
Untuk analisis nilai- $b(t)$, wilayah penelitian akan dibagi menjadi dua zona, yaitu zona A dan zona B (perhatikan Gambar 9). Pembagian zona ini untuk mengetahui nilai- $b(t)$ di zona A yang berada di wilayah sesar Palu Koro dan sekitarnya. Zona ini berada pada koordinat dari tiga persegi, yaitu persegi satu dengan titik $3,0^\circ$ LS – $1,8^\circ$ LU & $119,22^\circ$ BT – $120,6^\circ$ BT, persegi dua dengan titik $1,84^\circ$ LS – $0,47^\circ$ LS dan $120,6^\circ$ BT – $121,18^\circ$ BT, dan persegi tiga dengan titik $3,0^\circ$ LS – $1,84^\circ$ LS dan $120,6^\circ$ BT – $123,65^\circ$ BT. Zona B yang berada di wilayah sekitar subduksi laut Sulawesi dan subduksi Sangihe. Zona B terletak pada koordinat dari dua persegi yaitu persegi satu dengan titik $0,47^\circ$ LS – $1,8^\circ$ LU dan $120,6^\circ$ BT – $123,65^\circ$ BT, dan persegi 2 dengan titik $1,84^\circ$ LS – $0,47^\circ$ LS dan $121,18^\circ$ BT – $123,65^\circ$ BT.

3. Hasil dan Pembahasan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog gempa bumi yang diambil dari NEIC-USGS untuk wilayah Sulawesi Tengah, Gorontalo, dan sekitarnya. Soehaimi dkk. [27] menyatakan bahwa gempa bumi merusak sering terjadi di sepanjang lajur patahan Palu Koro seperti pada tahun 1927, 1938, 1985, 1998, 2007 dan 2012. Oleh karena itu, data gempa bumi yang digunakan pada penelitian ini dipilih data pada rentang waktu 1 Januari 1985 sampai dengan Bulan Mei 2020. Batas daerah ditentukan pada $3,8^\circ$ LS – $1,8^\circ$ LU dan 119° BT – $123,65^\circ$ BT. Terdapat 3078 data kejadian gempa bumi. Peta sebaran kejadian gempa bumi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 dengan kedalaman sumber gempa dikelompokkan menjadi 3 kategori $z < 184,7$ km, $z < 369,4$ km, dan $z < 615,6$ km. Tabel 2 menyajikan empat kejadian gempa bumi terbesar pada rentang waktu penelitian.

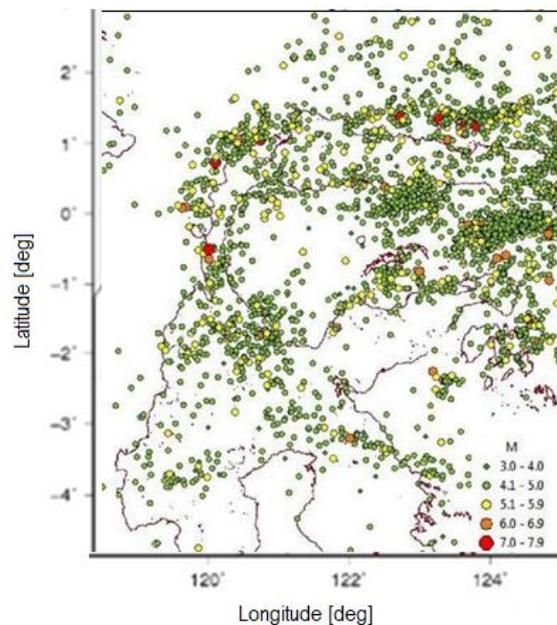
Tabel 2. Empat kejadian gempa bumi terakhir

<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	Tahun	Bulan	Hari	M	Kedalaman (km)	Jam	Menit
120,2622	-1,6864	2020	5	20	4,3	69,68	20	50
121,0113	0,1937	2020	5	18	4,4	158,47	19	20
119,6699	-1,2324	2020	5	9	4,2	10	23	43
123,5027	-0,0596	2020	5	1	4,1	67,67	21	46



Gambar 2. Peta Kejadian Gempa Bumi Sulawesi Tengah dan Gorontalo

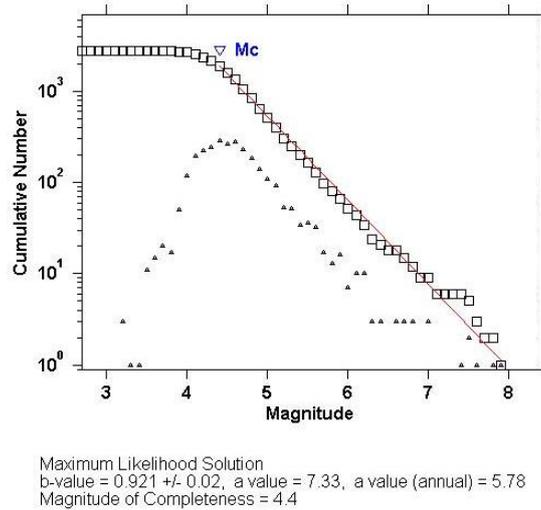
Untuk memisahkan gempa bumi utama dan susulan, dilakukan proses *declustering* terhadap data katalog gempa bumi di atas menggunakan Metode Reasenberg. Proses ini menghasilkan 2785 kejadian gempa bumi utama yang ditampilkan pada Gambar 3. Hal ini berarti bahwa terdapat sekitar 10% kejadian gempa susulan. Gempa terbanyak berada di sekitar wilayah Gorontalo yang merupakan jalur subduksi Lempeng Sangihe. Sedangkan gempa besar terjadi di wilayah Laut Sulawesi dan Selat Malaka.



Gambar 3. Peta kejadian gempa bumi di Sulawesi Tengah & Gorontalo setelah proses *declustering*.

3.1. Analisis Spasial Nilai-*b*

Pada analisis nilai-*b*(s), wilayah di Sulawesi Tengah dan Gorontalo dibagi menjadi 43 grid dengan ukuran $0,49^\circ \times 0,49^\circ$. Analisis nilai-*b*(s) terhadap data gempa hasil *declustering* dilakukan secara keseluruhan dan secara parsial sesuai dengan banyaknya grid. Penentuan nilai *Mc* dilakukan menggunakan metode MAXC. Distribusi frekuensi magnitudo pada seluruh data gempa bumi disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi frekuensi magnitudo pada keseluruhan data hasil *declustering*.

Mengikuti [5], untuk memenuhi linearitas terhadap distribusi frekuensi magnitudo, estimasi nilai *Mc* pada seluruh wilayah Sulawesi Tengah, Gorontalo dan sekitarnya adalah 4,4. Hal ini berarti katalog USGS mampu merekam gempa dengan magnitudo terkecil 4,4 SR dengan baik. Berdasarkan distribusi frekuensi magnitudo diperoleh nilai-*b* sebesar 0,921 dan nilai-*a* sebesar 7,33. Hasil estimasi nilai-*a*(s) dan nilai-*b*(s) pada relasi Gutenberg-Richter dapat dilihat pada Tabel 3. Nilai *Std. Error* adalah nilai perkiraan deviasi *standar* dari populasi sampel statistik sedangkan nilai-*t* adalah nilai yang tertera pada tabel distribusi *t-student* yang digunakan untuk pengujian signifikansi dari parameter *a* dan *b*.

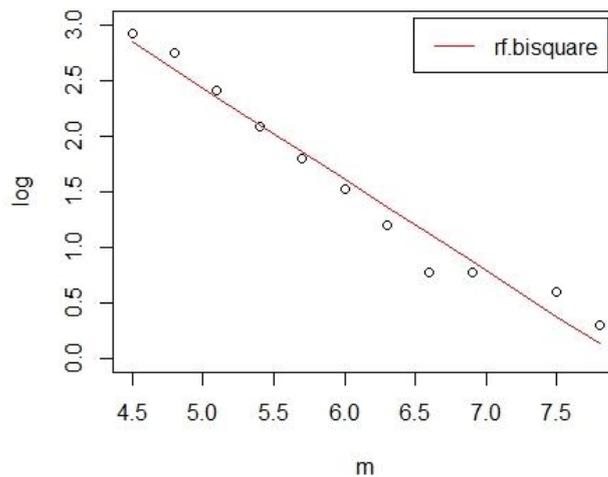
Tabel 3. Hasil estimasi koefisien relasi *Gutenberg-Richter* menggunakan RFM untuk keseluruhan data hasil *declustering*.

Parameter	Nilai	Std. Error	Nilai- <i>t</i>
<i>a</i> (s)	7,3305	0,3510	18,6220
<i>b</i> (s)	0,9210	0,0571	-14,3626

Dari hasil estimasi ini maka dapat diketahui relasi Gutenberg-Richter untuk keseluruhan data gempa bumi di wilayah Sulawesi Tengah, Gorontalo dan sekitarnya adalah:

$$\log N(M) = 7,3305 - 0,9210M.$$

Scatterplot dari relasi Gutenberg-Richter di atas dapat dilihat pada Gambar 5.

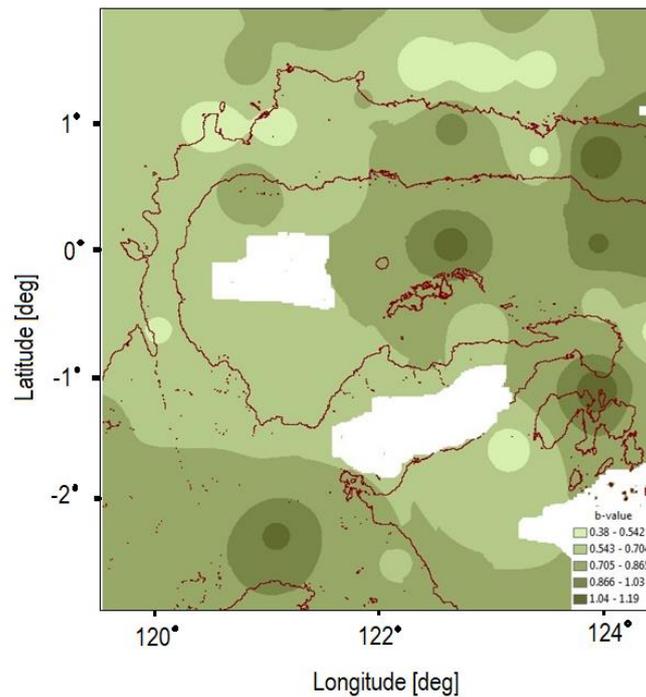


Gambar 5. Scatterplot relasi Gutenberg-Richter menggunakan RFM

Menggunakan cara yang serupa dengan di atas, akan diperoleh estimasi nilai M_c dan estimasi koefisien pada relasi Gutenberg-Richter untuk setiap grid. Tabel 4 menyajikan hasil estimasi tersebut pada beberapa grid. Gambar 6 merupakan peta spasial untuk estimasi nilai- $b(s)$ pada 43 grid. *Latitude* dan *longitude* dari titik tengah grid-grid tersebut tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil estimasi nilai M_c dan koefisien relasi *Gutenberg-Richter* menggunakan RFM pada beberapa grid.

No Grid	Titik Tengah Grid		Banyak Data	M_c	nilai- $b(s)$	nilai- $a(s)$	Relasi <i>Gutenberg-Richter</i>
	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>					
1	122,6	-2,95	31	4,4	0,7104	3,8605	$\log N(M) = 3,8605 - 0,7104M$
2	121,7	-2,5	31	4,3	0,6981	4,0906	$\log N(M) = 4,0906 - 0,6981M$
3	120,8	-2,275	31	4,2	1,0585	5,5857	$\log N(M) = 5,5857 - 1,0585M$
4	120,35	-1,825	33	4,2	0,81	4,4815	$\log N(M) = 4,4815 - 0,8100M$
5	119,45	-1,375	35	4,2	0,7243	4,2937	$\log N(M) = 4,2937 - 0,7243M$
6	120,35	-1,375	43	4,5	0,6322	3,9084	$\log N(M) = 3,9084 - 0,6322M$
7	120,575	-1,375	46	4,6	0,6004	4,052	$\log N(M) = 4,0520 - 0,6004M$
8	121,25	-1,15	40	4,1	0,59	3,5948	$\log N(M) = 3,5948 - 0,5900M$
9	120,575	-0,925	34	4,2	0,6285	3,7306	$\log N(M) = 3,7306 - 0,6285M$
10	122,6	-1,6	31	4,3	0,4936	3,2139	$\log N(M) = 3,2139 - 0,4936M$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
42	121,25	2	48	4,3	0,9762	5,447	$\log N(M) = 5,447 - 0,9762M$
43	122,6	1,775	36	4,3	0,825	4,8118	$\log N(M) = 4,8118 - 0,825M$



Gambar 6. Peta spasial untuk estimasi nilai- $b(s)$ pada 43 grid

Pada Gambar 6 nilai- $b(s)$ pada 43 grid berkisar antara 0,38 – 1,19 dan diklasifikasikan menjadi 6 klasifikasi dengan warna yang berbeda. Nilai- $b(s)$ yang rendah (0,38 – 0,7) didapatkan di hampir seluruh wilayah Sulawesi tengah mulai dari Palu, Donggala, Teluk Palu, Selat Malaka hingga Toli-Toli dan wilayah Teluk Tolo. Kemudian di wilayah Gorontalo nilai- $b(s)$ yang rendah terdapat pada laut Sulawesi di wilayah utara Gorontalo. Sedangkan nilai- $b(s)$ yang tinggi (0,71 – 1,19) berada di wilayah teluk Tomini dekat dengan Kep. Togian dan selatan Gorontalo di sekitar Kabupaten Bone Bolango. Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh nilai- $b(s)$ yang rendah berada pada wilayah Sesar Palu Koro dan wilayah laut Sulawesi yang merupakan subduksi Lempeng Laut Sulawesi Utara. Kedua wilayah tersebut memiliki riwayat gempa bumi besar seperti pada tahun 1996, 2008, dan 2018. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Rohadi [5] yang mengindikasikan bahwa nilai- $b(s)$ yang rendah memiliki potensi terjadinya gempa besar, sedangkan nilai- $b(s)$ yang tinggi berpotensi kecil terjadi gempa besar. Peta nilai- $b(s)$ pada Gambar 6 hanya untuk menggambarkan kondisi tektonik dan potensi gempa bumi besar di wilayah tersebut dan tidak dapat digunakan untuk memprediksi terjadinya gempa. Selain itu, peta ini tidak dapat diprediksi sampai berapa tahun estimasi nilai- $b(s)$ ini berlaku.

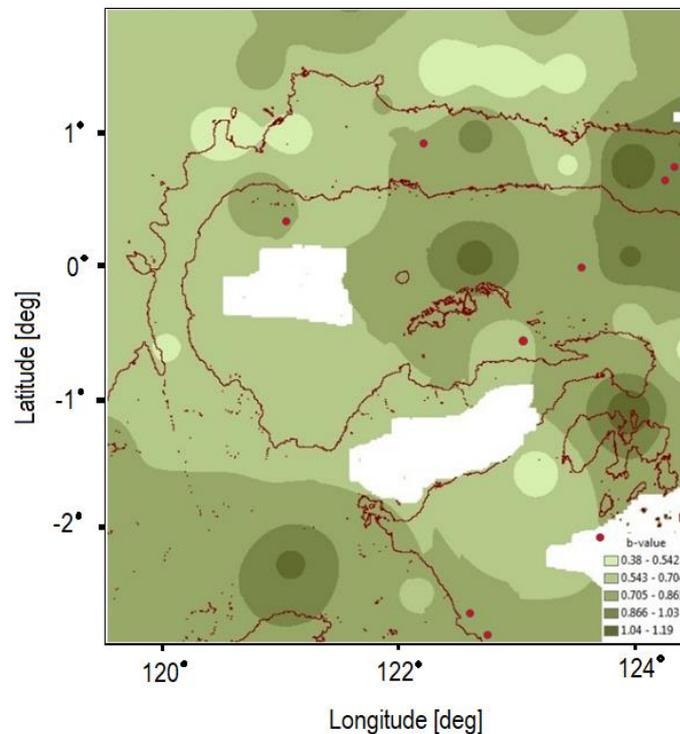
Selanjutnya akan diestimasi nilai- $b(s)$ untuk gempa yang terjadi pada periode waktu tanggal 1 Juni 2020 – 1 Agustus 2020. Terdapat 9 gempa bumi yang terjadi pada periode waktu tersebut dapat dilihat pada Tabel 5. Bila kita petakan secara spasial, nilai- $b(s)$ untuk periode waktu tersebut dapat dilihat pada Gambar 7. Titik gempa pada periode waktu

tersebut disimbolkan dengan titik bulat merah. Dari titik gempa bumi yang terjadi hampir semua terjadi pada semua wilayah dengan nilai-*b*(s) tinggi (0,71 – 1,19). Hanya ada dua gempa bumi yang terletak di wilayah dengan nilai-*b*(s) rendah yaitu pada tanggal 10 Juni 2020 dan 14 Juli 2020.

Tabel 5. Gempa bumi yang terjadi pada 1 Juni 2020 – 1 Agustus 2020.

<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	Tahun	Bulan	Hari	M	Kedalaman (km)	Jam	Menit
122,9192	-0,0798	2020	8	1	4,5	149,92	7	56
123,6477	0,5715	2020	7	29	4,2	243,41	0	28
123,0804	-2,0524	2020	7	14	4,6	10	2	59
120,7944	0,2119	2020	7	11	4,8	109,25	7	17
123,5902	0,5232	2020	6	27	4,3	246,42	12	4
121,7377	0,775	2020	6	21	4,2	77,32	7	44
122,2145	-2,7093	2020	6	17	4,9	10	11	10
122,2814	-2,7948	2020	6	15	4,9	10	23	36
122,426	-0,685	2020	6	10	4,9	14,58	20	1

Beberapa gempa bumi untuk periode tanggal 1 Juni 2020 – 1 Agustus 2020 terjadi pada wilayah dengan aktivitas kegempaan tinggi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai-*a*(s) yang tinggi di wilayah tersebut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Nilai-*a*(s) merupakan parameter seismik yang menggambarkan aktivitas kegempaan di wilayah tersebut.



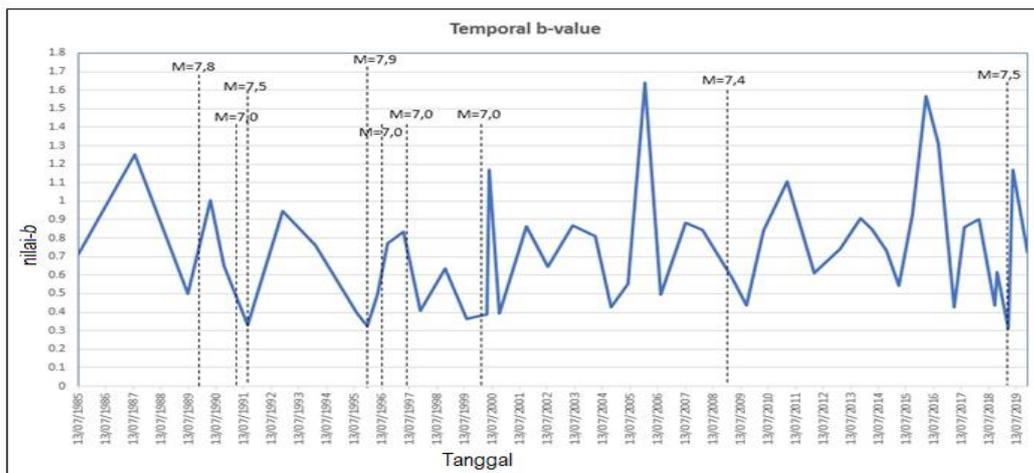
Gambar 7. Peta spasial untuk estimasi nilai-*b*(s) untuk periode tanggal 1 Juni–1 Agustus 2020.

3.2. Analisis Temporal Nilai-*b*

Pada analisis temporal, nilai-*b*(*t*) dihitung menggunakan metode *sliding time window* yaitu nilai-*b*(*t*) dihitung berdasarkan data gempa dari katalog gempa yang berisi 50 kejadian gempa bumi dan digeser setiap 5 kejadian. Data katalog gempa yang digunakan adalah 3078 kejadian gempa bumi. Pada Tabel 6 disajikan hasil estimasi nilai-*b*(*t*) menggunakan RFM pada *time window* pertama. Dari estimasi parameter ini dapat dibuat persamaan $\log N(M) = 4,6058 - 0,7148M$. Dengan menggunakan metode yang sama, estimasi nilai-*b*(*t*) untuk seluruh data katalog gempa tahun 1985 – 2020 di Sulawesi Tengah dan Gorontalo dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar ini memperlihatkan perubahan nilai-*b*(*t*) berdasarkan waktu di mana nilai-*b*(*t*) berkisar antara 0,3 sampai dengan 1,6. Kita akan membandingkan estimasi nilai-*b*(*t*) pada Gambar 6 dengan beberapa gempa besar yang terjadi pada kurun waktu tahun 1985 – 2020 yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 6. Hasil estimasi nilai-*b*(*t*) menggunakan RFM pada *time window* pertama.

Parameter	Nilai	Std. Error	Nilai- <i>t</i>
<i>a</i> (<i>t</i>)	4,6058	0,9194	5,0095
<i>b</i> (<i>t</i>)	-0,7148	0,1667	-4,2888



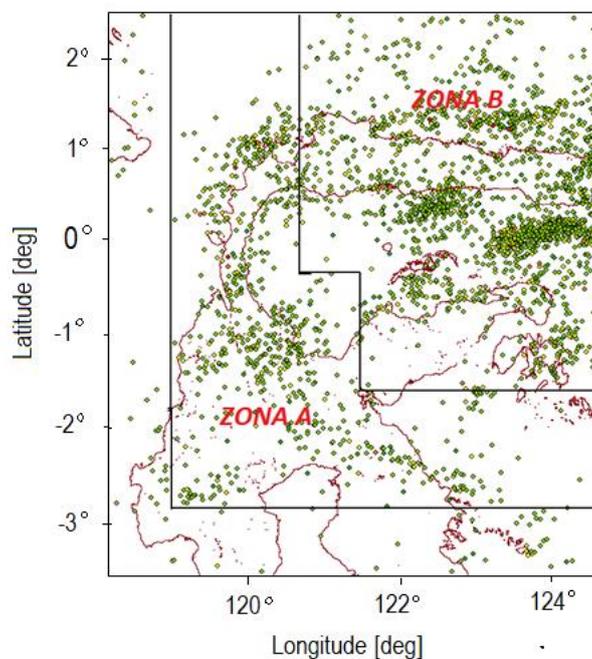
Gambar 8. Variasi temporal nilai-*b*(*t*) tahun 1985-2020 di Sulawesi Tengah dan Gorontalo.

Tabel 7 menunjukkan semua gempa besar (dengan magnitudo ≥ 7 SR) yang terjadi di wilayah Sulawesi tengah dan Gorontalo. Beberapa gempa besar yang terjadi di wilayah tersebut didahului oleh penurunan nilai-*b*(*t*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Hal ini sejalan dengan pendapat [8] bahwa perubahan nilai-*b* secara temporal dapat menjadi prekursor gempa bumi. Dari Gambar 8 dan Tabel 6 dapat dilihat hanya gempa besar pada tahun 1997 yang kurang jelas prekursornya.

Tabel 7. Gempa besar dengan magnitudo ≥ 7 SR yang terjadi di Sulawesi Tengah dan Gorontalo

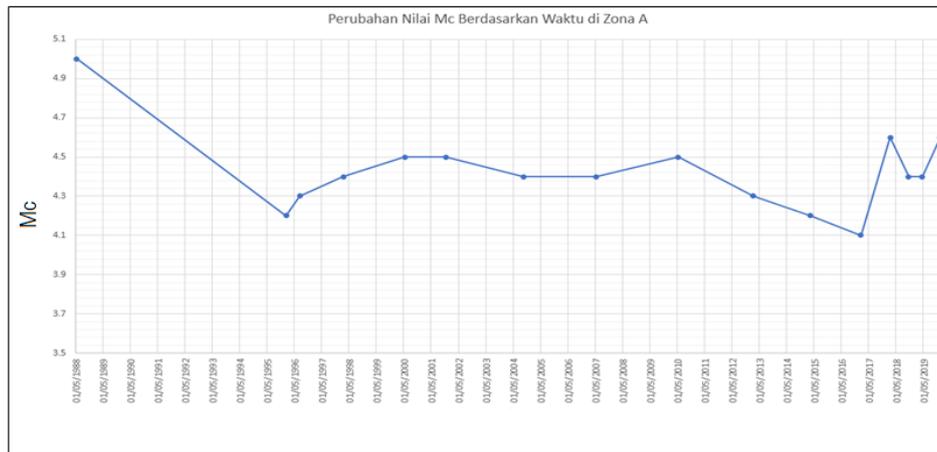
<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	Tahun	Bulan	Hari	M	Kedalaman (km)	Jam	Menit
122,884	1,188	1990	4	18	7,8	25,72	13	39
122,962	1,166	1991	5	19	7	33,06	0	58
122,788	1,196	1991	6	20	7,5	31,35	5	18
119,931	0,729	1996	1	1	7,9	24,04	8	5
120,450	1,001	1996	7	22	7	33	14	19
122,536	1,241	1997	11	25	7	24,02	12	14
123,571	-1,108	2000	5	4	7,6	26,11	4	21
122,090	1,271	2008	11	16	7,4	30,07	17	2
119,848	-0,284	2018	9	28	7,5	19,03	10	2

Untuk mengetahui perubahan nilai-*b*(*t*) di wilayah Sulawesi Tengah dan Gorontalo secara detail, kami membagi wilayah penelitian menjadi yaitu Zona A dan Zona B seperti tampak pada Gambar 9. Pembagian wilayah ini bertujuan untuk mengetahui perubahan nilai-*b*(*t*) di wilayah Sulawesi Tengah yang berada di sekitar Sesar Palu Koro dan Sesar Matano di Zona A, serta wilayah Gorontalo yang berada di sekitar subduksi lempeng laut Sulawesi dan subduksi Sangihe pada Zona B. Pada zona A terdapat 3 gempa bumi besar dan mayoritas gempa buminya diakibatkan oleh aktivitas sesar Palu Koro. Pada zona B terdapat 6 gempa bumi besar dan mayoritas gempa buminya diakibatkan oleh aktivitas subduksi lempeng laut Sulawesi dan subduksi Sangihe.

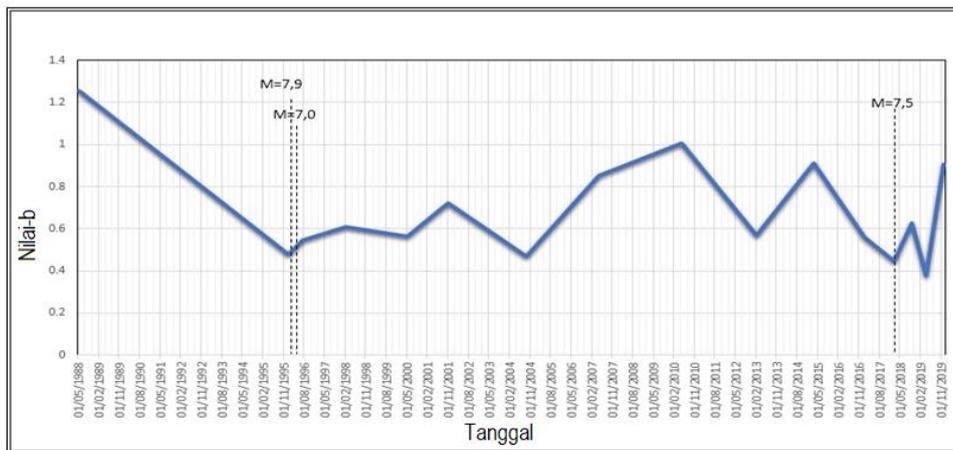


Gambar 9. Pembagian zona A dan B

Sebelum mengestimasi nilai- $b(t)$ untuk zona A dan B, terlebih dahulu ditentukan nilai M_c pada kedua zona. Gambar 10 menyajikan grafik perubahan nilai M_c berdasarkan waktu untuk zona A. Dapat dilihat bahwa nilai M_c berubah-ubah sesuai dengan besarnya magnitudo gempa pada waktu tersebut. Gambar 11 menyajikan grafik perubahan nilai- $b(t)$ untuk zona A. Nilai- $b(t)$ pada Gambar 11 dihitung menggunakan RFM di setiap *time window*. Berdasarkan Gambar 11, variasi temporal nilai- $b(t)$ pada zona A berkisar antara 0,38 - 1,25. Nilai- $b(t)$ terlihat menurun sebelum terjadinya gempa bumi besar pada tahun 1996 dan 2018.

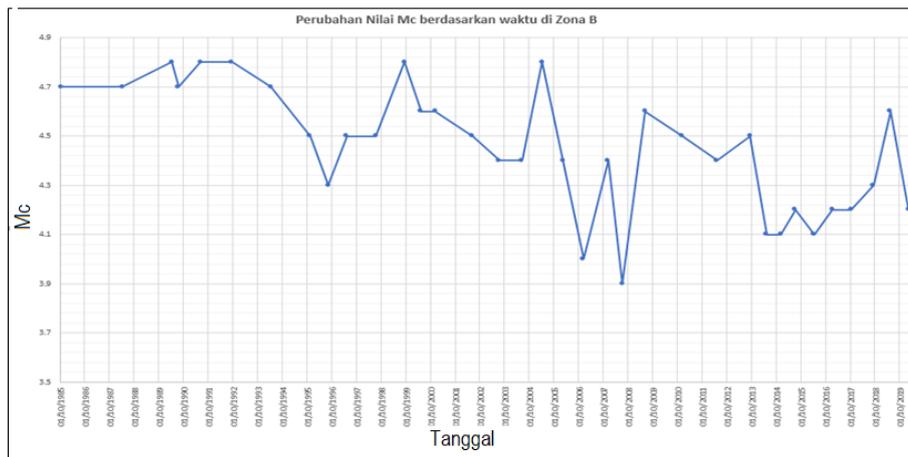


Gambar 10. Grafik perubahan nilai M_c berdasarkan waktu untuk zona A

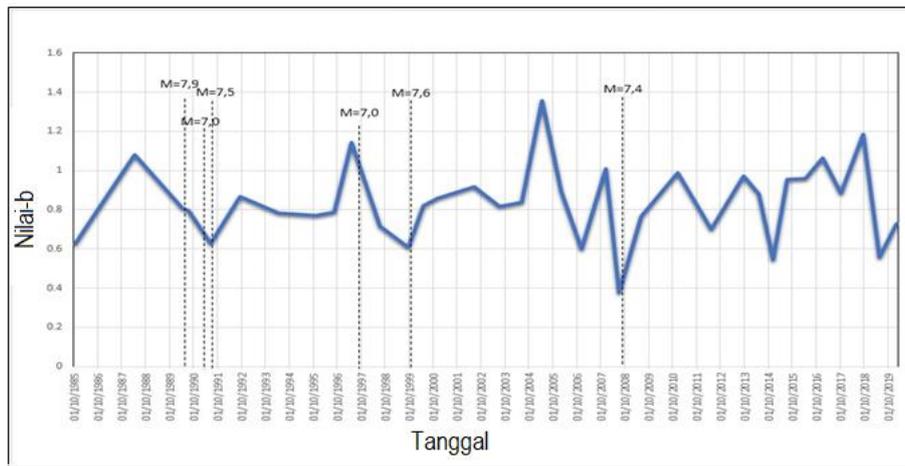


Gambar 11. Grafik variasi nilai- $b(t)$ berdasarkan waktu untuk zona A

Gambar 12 menyajikan grafik perubahan nilai M_c berdasarkan waktu untuk zona B dan Gambar 13 menyajikan grafik perubahan nilai- $b(t)$ untuk zona B. Nilai- $b(t)$ dihitung menggunakan RFM di setiap *time window*. Berdasarkan Gambar 13, variasi temporal nilai- $b(t)$ pada zona B berkisar antara 0,36 - 1,36. Selain itu, berdasarkan gambar tersebut nilai- $b(t)$ menurun sebelum terjadinya gempa bumi besar pada tahun 1990, 1991, 2000, dan 2008. Gempa bumi besar yang kurang jelas prekursornya terjadi pada tahun 1997, nilai- $b(t)$ terlihat mengalami peningkatan sebelum terjadinya gempa bumi besar.



Gambar 12. Grafik perubahan nilai M_c berdasarkan waktu untuk zona B



Gambar 13. Grafik variasi nilai- $b(t)$ berdasarkan waktu untuk zona B

Dari variasi temporal nilai- $b(t)$ dapat diketahui bahwa hampir semua gempa bumi besar yang terjadi pada kedua zona didahului oleh peningkatan nilai- $b(t)$ pada jangka menengah dan mengalami penurunan dalam waktu singkat sesuai dengan hasil penelitian Sammonds dkk. [8]. Hal ini menunjukkan bahwa variasi nilai- $b(t)$ di beberapa wilayah gempa bumi mampu menjadi prekursor sebelum terjadinya gempa bumi besar. Oleh karena itu, dapat dilihat juga bahwa RFM menghasilkan sensitivitas yang baik terhadap terjadinya gempa bumi besar di Zona A dan B sejalan dengan hasil penelitian Han dkk. [15]. Terbukti dari penurunan nilai- $b(t)$ yang cepat dalam waktu singkat sebelum gempa bumi besar terjadi dan peningkatan yang cepat juga setelah gempa bumi besar terjadi seperti yang terjadi pada tahun 2008 di zona B dan tahun 2018 di zona A.

4. Kesimpulan

Hasil pemetaan secara spasial, nilai- $b(s)$ pada 43 grid berkisar di antara nilai 0,38 – 1,19. Wilayah dengan nilai- $b(s)$ rendah (0,38 - 0,7) terdapat di sekitar Sesar Palu Koro, yaitu Kota Palu, Selat Malaka, hingga Toli-Toli dan juga berada di wilayah utara Gorontalo yaitu laut Sulawesi yang merupakan subduksi lempeng laut Sulawesi. Hal ini mengindikasikan bahwa beberapa wilayah tersebut berpotensi terjadi gempa bumi besar. Sedangkan nilai- $b(s)$ yang cukup tinggi (0,71 – 1,19) berada di wilayah Teluk Tomini yang merupakan wilayah yang sering terjadi gempa bumi namun berpotensi kecil terjadi gempa bumi besar.

Hasil pemetaan secara temporal, nilai- $b(t)$ pada zona A dan B menunjukkan hampir semua kejadian gempa bumi besar didahului oleh penurunan nilai- $b(t)$. Pada zona A, nilai- $b(t)$ terlihat menurun sebelum terjadinya gempa bumi besar pada tahun 1996 dan 2018. Pada zona B, nilai- $b(t)$ menurun sebelum terjadinya gempa bumi besar pada tahun 1990, 1991, 2000, dan 2008. Namun pada tahun 1997, nilai- $b(t)$ tidak dapat dijadikan prekursor sebelum gempa besar terjadi.

Daftar Pustaka

- [1] M. Irsyam, D. Hilman dan I. Meilano, Peta Sumber Gempa dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia Tahun 2016, Jakarta: Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), 2017.
- [2] R. Cahyandari, A. S. Awalluddin, D. S. Mariani, Sukono dan P. L. Ghazali, "Table of integration model for motor vehicle sharia insurance," *InPrime: Indonesian Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 59-64, 2020, doi: <https://doi.org/10.15408/inprime.v2i1.14811>
- [3] S.L.E.F. Da Silva, " κ -generalised gutenbergrichter law and the self-similarity of earthquakes," *Chaos Solitons & Fractals*, p. 143(C):110622, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110622>
- [4] B. Gutenberg dan C. Richter, "Frequency of earthquakes in California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 34, no. 4, pp. 185-188, 1944, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- [5] S. Rohadi, "Distribusi spasial dan temporal parameter seismotektonik sebagai indikasi tingkat aktivitas kegempaan di wilayah Papua," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 16, no. 3, pp. 189-198, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.31172/jmg.v16i3.289>
- [6] J. Wesseloo, "Evaluation of the spatial variation of b -value," *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurg*, vol. 114, pp. 823-828, 2014.

- [7] C.H. Scholz, "The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, no. 1, pp. 399-415, 1968, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399>
- [8] P.R. Sammonds, P.G. Meredith dan I.G. Main, "Role of pore fluids in the generation of seismic precursors to shear fracture," *Letters to Nature*, vol. 359, pp. 228-230, 1992.
- [9] S. Rohadi, H. Grandis dan M.A. Ratag, "Studi variasi spasial seismisitas zona subduksi Jawa," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 8, no. 1, pp. 42-47, 2007, doi: <http://dx.doi.org/10.31172/jmg.v8i1.4>
- [10] Linda, N. Ihsan dan P. Palloan, "Analisis distribusi spasial dan temporal seismotektonik berdasarkan nilai b -value dengan menggunakan metode likelihood di Pulau Jawa," *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika (JSPF)*, vol. 15, no. 1, pp. 16-31, 2019, doi: <https://doi.org/10.35580/jspf.v15i1.9403>
- [11] C.-H. Lin, "Temporal b -value variations throughout a seismic faulting process: the 2008 taoyuan earthquake in Taiwan," *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 21, no. 2, 2010. doi: [https://doi.org/10.3319/TAO.2009.02.09.01\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2009.02.09.01(T))
- [12] W. Marzocchi dan L. Sandri, "A review and new insights on estimation of the b -value and its uncertainty," *ANNALS OF GEOPHYSICS*, vol. 46, pp. 1271-1282, 2003, doi: <https://doi.org/10.4401/ag-3472>
- [13] K. Aki, "Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits," *Bulletin of Earthquake Research Institute of the University of Tokyo*, vol. 43, pp. 237-239, 1965.
- [14] L.A. Maslov dan V.M. Anokhin, "Derivation of the Gutenberg-Richter empirical formula from the solution of the generalized logistic equation," *Natural Science*, vol. 4, pp. 648-651, 2012, doi: <https://doi.org/10.4236/ns.2012.428085>
- [15] Q. Han, L. Wang, J. Xu, A. Carpinteri, dan G. Lacidogna, "A robust method to estimate the b -value of the magnitude-frequency distribution of earthquake," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 81, pp. 103-110, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.09.004>
- [16] X. Bai, W. Yao dan J.E. Boyer, "Robust fitting of mixture regression models," *Computational Statistics and Data Analysis*, vol. 56, no. 7, pp. 2347-2359, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csda.2012.01.016>
- [17] NEIC, "USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>," 1 Agustus 2022. [Online].

- [18] P. Reasenber, "Second-order moment of Central California Seismicity," *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, no. B7, pp. 5479-5495, 1985, doi: <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
- [19] D. Schorlemmer dan M.C. Gerstenberger, "RELM testing center," *Seismological Research Letters*, vol. 78, no. 1, pp. 30-36, 2007, doi: <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.1.30>
- [20] T. van Stiphout, J. Zhuang dan D. Marsan, "Seismicity declustering," *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 2012. doi: <https://doi.org/10.5078/corssa-52382934>
- [21] A. Mignan dan J. Woessner, "Bayesian estimation of the spatially varying completeness magnitude of earthquake catalogs," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101, no. 3, pp. 1371-1385, 2011, doi: <https://doi.org/10.1785/0120100223>
- [22] S. Wiemar dan M. Wyss, "Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan," *Bulletin of the Seismological Society of America* vol. 90, no. 4, pp. 859-869, 2000, doi: <https://doi.org/10.1785/0119990114>
- [23] E.D. Pradewi dan Sudarno, "Kajian estimasi-M IRLS menggunakan fungsi pembobot Huber dan Bisquare Tukey pada data ketahanan pangan di Jawa Tengah," *Media Statistika*, vol. 5, no. 1, pp. 1-10, 2012, doi: <https://doi.org/10.14710/medstat.5.1.1-10>
- [24] I.G. Main, P.G. Meredith dan P.R. Sammonds, "Temporal variations in seismic event rate and b-values from stress corrosion constitutive laws," *Tectonophysics*, vol. 211, pp. 233-246, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90061-A](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90061-A)
- [25] D.C. Montgomery, E.A. Peck dan G.G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [26] P. Nuannin, O. Kulhanek dan L. Persson, "Spatial and temporal *b* value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra Earthquake of December 26, 2004," *Geophysical Research Letters*, vol. 32, no. 11, p. 11307, 2005, doi: <https://doi.org/10.1029/2005GL022679>
- [27] A. Soehaimi, Marjiyono dan H. Wahyono, *Peta seismotektonik daerah Palu dan sekitarnya, Sulawesi Tengah, skala 1 : 150.000*, Bandung: Pusat Survei Geologi, 2013.