

Analisis Statistik Distribusi Kejadian Gempabumi Di Luwu Timur, Morowali, Dan Morowali Utara, Sulawesi

Imanuela Indah Pertiwi^{1,*}

¹BMKG - Stasiun Geofisika Kelas IV Kendari

*Email: imanuela.indah@gmail.com

Submit: 2021-04-12; Revised: 2021-05-26 ; Accepted: 2022-01-18

Abstrak: Kondisi tektonik di Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara, Sulawesi, yang dilalui oleh sesar utama dan sesar lokal sangat memungkinkan untuk menimbulkan gempabumi besar dengan kekuatan $M \geq 5$. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui statistik distribusi kejadian gempabumi di Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara, Sulawesi. Daerah penelitian dipilih pada batas $1,00^{\circ}$ – $3,50^{\circ}$ LS dan $120,50^{\circ}$ – $122,50^{\circ}$ BT. Data yang digunakan adalah data parameter gempabumi dari katalog gempa IRIS-DMC (*Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Centre*) tahun 1961 sampai 2020. Metode distribusi *Poisson* yang digunakan dalam analisa distribusi kejadian gempabumi besar menghasilkan sebuah grafik yang menunjukkan bahwa nilai $Pr\%$ actual berada di atas $Pr\%$ *Poisson* teoritis yang mengartikan bahwa kejadian gempabumi besar ($M \geq 5$) di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara terjadinya tidak dalam tipe pengelompokan. Distribusi spasial nilai-b menunjukkan nilai yang tinggi di daerah Luwu Timur dan Morowali dibandingkan dengan daerah Morowali Utara. Secara statistik, nilai indeks seismisitas dan nilai probabilitas kejadian gempabumi di Luwu Timur, Morowali, dan Morowali Utara menurun seiring dengan semakin besarnya magnitudo gempabumi. Berbanding terbalik dengan periode ulang yang cepat pada gempabumi dengan magnitudo $M \geq 5$ dan periode ulang yang lama pada magnitudo yang semakin besar

Kata kunci: Distribusi *Poisson*, nilai-b, indeks seismisitas, probabilitas, periode ulang

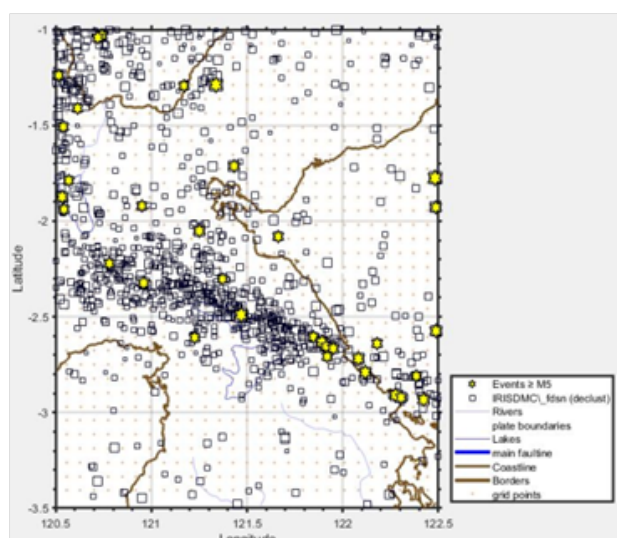
*Abstract: The tectonic conditions of East Luwu, Morowali and North Morowali, Sulawesi, which are traversed by main and local faults, make it possible to cause large earthquakes of $M \geq 5$. This research was conducted with the aim of knowing the distribution statistics of earthquakes in East Luwu, Morowali and North Morowali, Sulawesi. The research was located at $1,00^{\circ}$ – $3,50^{\circ}$ S and $120,50^{\circ}$ – $122,50^{\circ}$ E. The analysis uses IRIS-DMC (*Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Centre*) earthquake catalog 1961-2020 earthquake parameter data. The *Poisson* distribution method used in the analysis produces a graph which shows that the actual $Pr\%$ value is above the theoretical $Pr\%$ *Poisson*, which means that the occurrence of large earthquakes ($M \geq 5$) in the East Luwu, Morowali and North Morowali areas did not occur in the ungrouped type. The spatial distribution of the b-value shows a high value in the East Luwu and Morowali areas compared to*

the North Morowali area. Statistically, the value of the seismicity index and the probability of an earthquake event in East Luwu, Morowali, and North Morowali decrease as the magnitude of the earthquake increases. It is inversely proportional to the rapid recurrence time in earthquakes of $M \geq 5$ and a long recurrence time at a greater magnitude.

Keywords: Poisson distribution, b-value, seismicity index, probability, recurrence time

1 PENDAHULUAN

Sesar Palu Koro yang merupakan sesar geser mengiri atau left lateral slip merupakan salah satu Sesar Utama di Pulau Sulawesi yang melintasi daerah Palu, Sulawesi Tengah. Terdapat juga Sesar Matano yang merupakan perpanjangan Sesar Palu Koro dari arah Barat Laut ke Tenggara yang memotong Danau Matano terbagi menjadi enam segmen yaitu segmen Kuleana, Pewusai, Matano, Pamsoa, Ballawai, dan terakhir segmen Geressa (ESDM, book). Secara keseluruhan di dekat Sesar Matano ini merupakan regime transresif. Locking terbesar terdapat pada Sesar Matano yang mengidentifikasi bahwa sesar ini aktif dan berpotensi untuk menghasilkan gempabumi yang besar (Sarsito, 2010). Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah merupakan salah satu daerah yang dilalui oleh Sesar Matano. Sesar Naik Tolo (*Tolo thrust*) yang berada di sebelah timur Morowali memberikan tambahan depresi pada Sesar Matano. Sesar Soroako yang terletak di Sulawesi bagian tengah di sebelah barat Sesar Matano merupakan sesar naik yang juga memberikan pengaruh sebagai penyebab kejadian gempabumi di Morowali. Selain itu terdapat juga Sesar Weluki yang merupakan sesar naik yang terletak di Sulawesi Tengah tepatnya di Morowali Utara. Sesar Loa yang juga terletak di Morowali memberikan pengaruh sebagai penyebab terjadinya gempabumi di daerah tersebut. Segmentasi Sesar di Sulawesi menunjukkan bahwa Sesar Weluki dan Sesar Loa memiliki nilai *sliprate* (laju geser) terkecil dibandingkan dengan Sesar Palu Koro, Sesar Matano dan Sesar Soroako. Segmen-segmen sesar lain juga ditemukan di daerah Morowali Utara. Sesar Rompi yang diduga merupakan sesar mendatar mengiri, Sesar Boba dan Sesar Ondalean yang diduga merupakan sesar mendatar manganan, Sesar Solato dan Sesar Tiworo yang diduga merupakan sesar mendatar mengiri, Sesar Sabuku yang merupakan Sesar Naik, dan sesar-sesar kecil lainnya (Surono dan



Gambar 1. Sebaran data kejadian gempa bumi di wilayah penelitian dalam kurun waktu tahun 1961 sampai 2020 (sumber: (IRIS-DMC, 2021))

(Hartono, 2013). Kondisi tektonik Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara yang sangat kompleks sangat memungkinkan untuk menimbulkan gempa bumi besar dengan kekuatan lima atau lebih ($M \geq 5$). Gempabumi besar dengan magnitudo ($M \geq 5$) pernah terjadi di Morowali hingga menyebabkan kerusakan. Tercatat pada tanggal 16 April 2012 terjadi gempa bumi di Morowali dengan kekuatan magnitudo $M=5,7$ menyebabkan kerusakan pada rumah sebanyak 34 di Kecamatan Bungku Tengah dan 13 rumah di Kecamatan Bungku Timur. Kebanyakan tembok atau dinding rumah runtuh dan plafon ambruk. Masih banyak kejadian gempa bumi di Morowali yang tercatat dengan magnitudo ($M \geq 5$) yang dirasakan oleh masyarakat. Daerah Luwu Timur juga pernah diguncang gempa bumi besar pada tanggal 15 Februari 2011 dengan kekuatan $M=6.1$ menyebabkan kerusakan berat di Kecamatan Towuti berupa 18 rumah warga roboh, 1 (satu) unit puskesmas dan 1 (satu) mesjid rusak parah. Satu rumah roboh juga terjadi di Kecamatan Malili, Desa Ussu (BMKG, book). Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui distribusi kejadian gempa bumi di Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara secara statistik. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan untuk informasi dalam upaya mitigasi bencana guna mengurangi dampak akibat kejadian gempa bumi.

2 DATA DAN METODOLOGI

Daerah penelitian adalah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara dengan cakupan batas wilayah $1,00^{\circ}$ – $3,50^{\circ}$ LS dan $120,50^{\circ}$ – $122,50^{\circ}$ BT. Dalam penelitian ini menggunakan data parameter gempa bumi dari katalog gempa IRIS-DMC (2021) (Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Centre) tahun 1961 sampai 2020 seperti Gambar 1. Data yang diambil adalah data kejadian gempa bumi dengan skala kekuatan (magnitudo) kecil hingga besar dan kedalaman kurang dari 1000 km ($h \leq 1000$ km). Data tersebut selanjutnya diproses dengan metode *clustering Reasenberg*, sehingga total kejadian gempa bumi

di daerah penelitian dalam periode waktu tersebut adalah 1023. Distribusi kejadian gempa bumi di suatu daerah dapat dilihat dengan melakukan analisis terhadap parameter-parameternya dengan metode statistik. Untuk mengetahui distribusi probabilitas kejadian gempa bumi di Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara dilakukan pengolahan dengan metode distribusi Poisson. Adapun data parameter gempa bumi yang digunakan adalah data magnitudo lima atau lebih ($M \geq 5$). Distribusi ini dapat menunjukkan pola sebaran probabilitas kejadian gempa bumi besar ($M \geq 5$) di daerah tersebut. Setelah mengetahui pola sebaran distribusi probabilitas gempa bumi besar, selanjutnya dilakukan verifikasi dengan menghitung nilai probabilitas terjadinya gempa bumi besar serta periode ulang kejadiannya berdasarkan statistik geofisika. Dalam statistika geofisika, untuk mendapatkan nilai probabilitas kemungkinan terjadinya gempa bumi besar, terlebih dahulu dihitung nilai-a dan nilai-b di daerah penelitian serta indeks seismisitas pada setiap magnitudo yang dikategorikan sebagai gempa bumi besar. Pada penelitian ini, nilai-a dan nilai-b dilakukan dengan menggunakan piranti lunak Zmap 7.1 yang dapat dijalankan pada program Matlab 2018a, sedangkan nilai indeks seismisitas, nilai probabilitas dan periode ulang gempa bumi $M \geq 5$ dihitung dengan statistika geofisika

2.1 Distribusi Poisson

Distribusi Poisson adalah distribusi nilai-nilai bagi suatu variabel random 'X', yaitu banyaknya hasil percobaan yang terjadi dalam suatu interval waktu tertentu atau disuatu daerah tertentu. Distribusi Poisson disebut juga distribusi peristiwa yang jarang terjadi, ditemukan oleh S.D.Poisson (1781-1841), seorang ahli matematika berkebangsaan Prancis. Distribusi Poisson termasuk distribusi teoritis yang memakai variabel random diskrit. Sedangkan dalam teori probabilitas dan statistika, distribusi Poisson adalah distribusi probabilitas diskrit yang menyatakan peluang jumlah peristiwa yang terjadi pada periode waktu tertentu apabila rata-rata kejadian tersebut diketahui dan dalam waktu yang saling bebas sejak kejadian terakhir. Distribusi Poisson merupakan distribusi yang sering digunakan dalam aplikasi proses stokastik untuk meramal suatu kejadian di masa depan yang jarang terjadi. Pada distribusi Poisson ketika ingin mencari ekspektasi dari distribusinya maka sama halnya akan mencari rata-rata dan variasi dari distribusi Poisson itu sendiri. Bila diasumsikan bahwa peristiwa terjadinya gempa bumi sebagai suatu gejala yang bebas dari suatu gempa terhadap peristiwa gempa lainnya, maka dapat dibuktikan bahwa distribusi kemungkinannya akan mengikuti distribusi Poisson yaitu (Bunaga dan Setiawan, 2014):

$$P(r, t) = \frac{(h.t)^r e^{-h.t}}{r!} \quad (1)$$

dengan : r :frekuensi gempa per tahun, artinya kemungkinan untuk terjadinya suatu peristiwa gempa dalam jangka waktu t tertentu. h :nilai frekuensi rata-rata dari peristiwa gempa bumi ($h = \frac{\sum r}{\sum t}$) e :nilai konstanta matematika ($e \approx 2.718281828$)

Bila diambil $t = 1$ berarti distribusi kemungkinan tahunannya adalah :

$$P_r = \frac{(h)^r e^{-h}}{r!} \quad (2)$$

Jika disusun data pada suatu tabel yang sesuai dengan urutan dari gempabumi per tahun, maka distribusi yang sebenarnya (distribusi aktual) per tahun dapat ditentukan serta dibandingkan dengan distribusi Poisson (teoritis). Untuk distribusi yang sebenarnya (distribusi actual) dapat dihitung dari persamaan :

$$P_r = \frac{n_r}{\sum n_r} \tag{3}$$

dengan n_r : jumlah terjadinya r gempa per tahun (banyaknya tahun yang memiliki kejadian gempa berjumlah r) : frekuensi gempa per tahun

2.2 Indeks Seismisitas

Indeks seismisitas merupakan nilai yang menggambarkan jumlah total event gempa yang terjadi dalam waktu satu tahun dengan magnitudo lebih besar dari magnitudo M_0 pada suatu daerah pengamatan. Nilai indeks seismisitas :

$$\text{Log}N1(M \geq M_0) = a_1 - b M_0 \tag{4}$$

inversi logaritmik dari persamaan 4 adalah

$$N1(M \geq M_0) = 10^{(a_1 - b M_0)} \tag{5}$$

dengan $a_1 = a - \log T$ $a' = a_1 - \log(b \ln 10)$ $a'_1 = a' - \log T$ parameter a, b, a1, a', a1' dihitung sehingga dapat diperoleh indeks seismisitas sebagai berikut:

$$N1(M \geq M_0) = 10^{(a - \log(b \ln 10) - \log T) - b M_0} \tag{6}$$

dimana $N(M \geq M_0)$: indeks seismisitas untuk magnitudo $M \geq M_0$ a dan b : konstanta hubungan frekuensi -magnitudo M : magnitudo T : waktu (tahun pengamatan)

2.3 Likelihood

Hubungan frekuensi-magnitudo gempa bumi dikenalkan pertama kali oleh Ishimoto (1939) pada tahun 1939 berdasarkan rekaman seismogram untuk daerah Kwato, Jepang. Kemudian pada tahun 1944, B. Guttenberg dan C.F Richter (Gutenberg dan Richter, 1944) melakukan hal yang sama untuk data global seluruh dunia, demikian juga untuk daerah tertentu. Secara umum, hubungan frekuensi-magnitudo gempa bumi dinyatakan dengan persamaan empiris Guttenberg-Richter sebagai berikut

$$\text{Log}(N) = a' - b M \tag{7}$$

dengan $a' = a - \log(b \ln 10)$, dimana N : jumlah kumulatif gempa bumi pada wilayah kajian dengan magnitudo lebih besar atau sama dengan M. a : parameter model regresi yang menyatakan kondisi seismik tahunan b : parameter model regresi yang menyatakan kondisi tektonik Jika fungsi distribusi probabilitas yang bergantung pada parameter a dan b adalah $f(M, b)$ maka fungsi likelihood (Graybill, 1961) di definisikan sebagai berikut:

$$P(M, b) = f(M_1, b), f(M_2, b) \dots f(M_i, b) \tag{8}$$

dengan M_i dan b masing-masing adalah magnitudo dan parameter kemiringan garis lurus (gradien) pada persamaan (8) yang belum diketahui.

Estimasi likelihood dari b adalah harga parameter yang

memaksimalkan fungsi $P(M, b)$ Nilai estimasi b dapat diperoleh melalui (Bain dan Engelhardt, 1987):

$$\frac{\partial \ln P}{\partial b} \tag{9}$$

Jika metode ini diterapkan pada masalah hubungan magnitudo-frekuensi, fungsi distribusi probabilitas M_i adalah (Aki, 1965):

$$f(M_i, b') = b' e^{-b'(M_i - M_0)}, M_i > M_0 \tag{10}$$

dimana $b' = b \ln 10$, maka fungsi likelihood sampel adalah:

$$P = (b')^N \exp \left[-b' \left[\sum_{i=1}^N M_i - N M_0 \right] \right] \tag{11}$$

dari persamaan 11 diperoleh estimasi likelihood nilai-b adalah :

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_0} \tag{12}$$

sehingga estimasi nilai-a pada persamaan 7 adalah

$$a = \log N + \log(b \ln 10) + M_0 b \tag{13}$$

dengan N, \bar{M} dan M_0 masing-masing adalah jumlah kumulatif data yang digunakan, magnitudo rata-rata dan magnitudo terkecil dalam blok volume yang dikaji

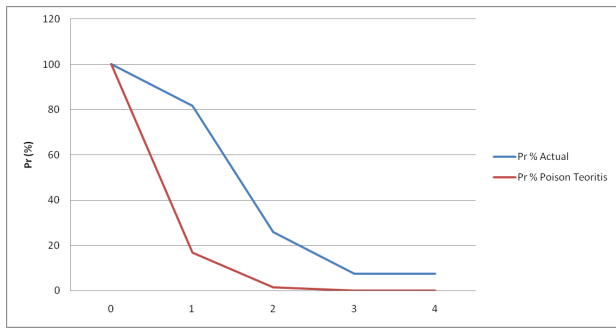
Penelitian menunjukkan nilai-b yang rendah biasanya berkorelasi dengan tingkat stress yang tinggi, sedangkan nilai-b tinggi sebaliknya berkorelasi dengan tingkat stress yang rendah. Hal ini berarti bahwa wilayah dengan nilai-b yang rendah sangat berpotensi untuk terjadi gempabumi besar, begitupun sebaliknya. Selain itu, wilayah dengan heterogenitas yang besar berkorelasi dengan nilai-b yang tinggi. Hal ini berarti bahwa wilayah dengan nilai-b yang lebih rendah dibandingkan dengan wilayah sekitarnya memiliki batuan yang lebih homogen. Beberapa ahli mengatakan bahwa nilai-b konstan dan bernilai sekitar 1 (satu). Adanya perbedaan nilai ini disebabkan karena adanya perbedaan data dan metode perhitungan yang digunakan.

2.4 Probabilitas

Parameter-parameter yang dihitung sebagai indeks seismisitas akan memberikan kemungkinan kepada kita mengenai perkiraan aktifitas gempa pada suatu daerah. Sehingga dapat digunakan untuk mengetahui kemungkinan terjadinya paling tidak satu kali kejadian gempa yang besar (merusak) di suatu daerah yang kita perkirakan dalam jangka waktu tertentu. Dengan demikian dapat diformulasikan bahwa kemungkinan/probabilitas terjadinya satu kali atau lebih dari gempa bumi dengan magnitudo lebih besar dari M dalam periode T dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$P(M \geq M_0, T) = (1 - e^{-N1(M \geq M_0) T}) \tag{14}$$

dimana: $P(M \geq M_0, T)$: tingkat resiko gempa untuk magnitudo $M \geq M_0$ dengan periode waktu T $N1(M \geq M_0)$: indeks seismisitas untuk magnitudo $M \geq M_0$ T : periode Pada penelitian ini dilakukan perhitungan terhadap tingkat resiko gempabumi untuk periode waktu (T) 10 tahun



Gambar 2. Grafik distribusi poisson kejadian gempabumi daerah penelitian

2.5 Periode Ulang

Periode ulang merupakan kemungkinan waktu terjadinya kembali gempabumi dengan magnitudo tertentu. Dengan diperoleh nilai indeks seismisitas untuk masing-masing magnitudo, dapat dihitung periode ulang dari gempabumi dengan magnitudo tersebut. Rumus untuk menghitung periode ulang

$$\theta(M_0) = \frac{1}{N(M \geq M_0)} \quad (15)$$

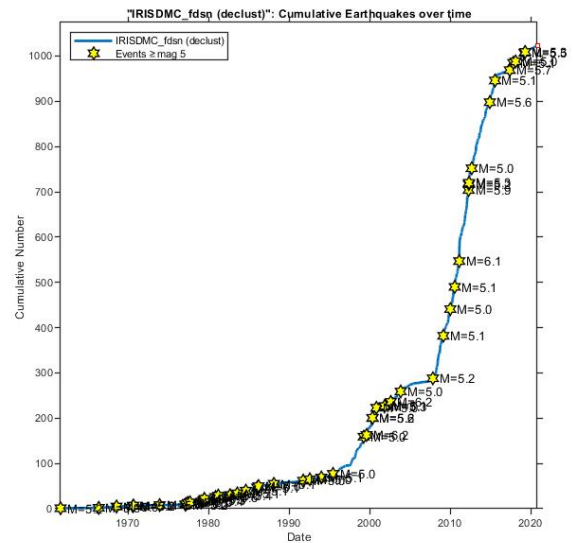
dimana θ : periode ulang M_0 : magnitudo gempabumi yang akan dihitung periode ulangnya. $N(M \geq M_0)$: nilai indeks seismisitas pada magnitudo tertentu

3 HASIL DAN DISKUSI

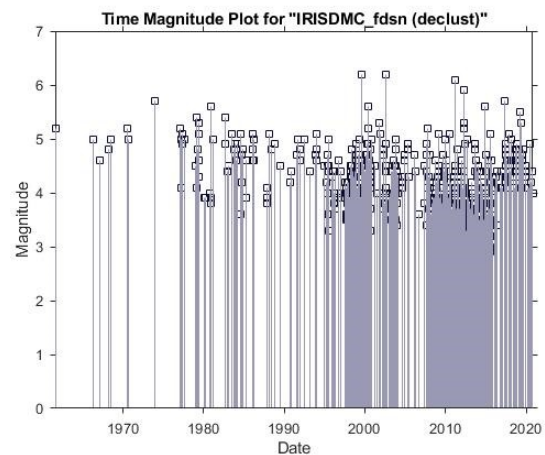
Data gempabumi daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara dari tahun 1961 – 2020 menunjukkan bahwa hampir setiap tahun terjadi gempabumi besar ($M \geq 5$) di daerah ini paling sedikit satu kejadian dan paling banyak empat kejadian setiap tahunnya. Rentang waktu terlama antar kejadian gempabumi besar yang satu dengan yang lainnya di daerah tersebut adalah 4 tahun. Data yang telah diperoleh kemudian dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan 2 dan 3. Untuk distribusi gempabumi yang sebenarnya dihitung berdasarkan persamaan 3, sedangkan untuk distribusi gempabumi secara teoritis dihitung berdasarkan persamaan 2. Pr% menyatakan nilai kemungkinan dalam persen.

Pr% aktual diperoleh dari perbandingan antara n dan n terbesar. Pr% teoritis diperoleh dari perbandingan antara Pr *Poisson* teoritis dengan Pr *Poisson* teoritis terbesar. Berdasarkan pada hasil perhitungan Tabel-1, dapat dibuat grafik perbandingan antara distribusi gempabumi yang sebenarnya dengan distribusi gempabumi teoritis seperti Gambar 2.

Grafik gambar 2 yang dihasilkan menunjukkan bahwa nilai Pr% aktual berada di atas Pr% Poisson teoritis. Hasil ini memberikan arti bahwa kejadian gempabumi besar ($M \geq 5$) di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara terjadinya tidak dalam tipe pengelompokan. Pada Tabel-1, nilai Pr% yang menyatakan kemungkinan terjadinya gempabumi besar ($M \geq 5$) dihasilkan 100% untuk $r=0$ kejadian gempabumi dalam satu tahun, baik secara aktual (kejadian sebenarnya) maupun secara teoritis (berdasarkan distribusi Poisson). Untuk $r=1, r=2, r=3,$ dan $r=4$, Pr% te-



Gambar 3. Frekuensi kumulatif kejadian gempabumi di daerah penelitian setiap tahun



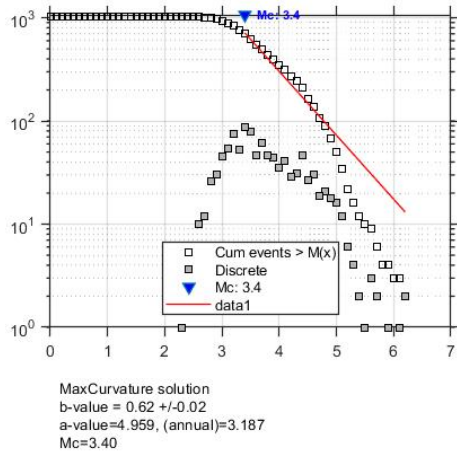
Gambar 4. Pola sebaran magnitudo gempabumi terhadap waktu di daerah penelitian

oritis menghasilkan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan Pr% aktual. Artinya berdasarkan distribusi Poisson, kemungkinan terjadinya gempabumi besar dengan jumlah yang banyak dalam satu tahun adalah kecil. Sehingga dapat juga dikatakan bahwa probabilitas untuk terjadinya gempabumi besar di daerah ini adalah sangat jarang atau tidak terjadi dalam selang waktu tahun yang singkat. Sebagai verifikasi atas pola distribusi probabilitas yang diperoleh, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai probabilitas, serta periode ulang (perulangan) kejadian gempabumi besar yaitu $M \geq 5, M \geq 6, M \geq 7,$ dan $M \geq 8$ berdasarkan pada data yang diperoleh. Nilai probabilitas pada magnitudo tertentu diperoleh berdasarkan nilai-a, nilai-b, dan indeks seismisitas. Hasil perhitungan berdasarkan metode Likelihood menggunakan software Zmap 7.1 ditampilkan pada gambar-gambar berikut.

Gambar 3 menunjukkan grafik frekuensi kumulatif keja-

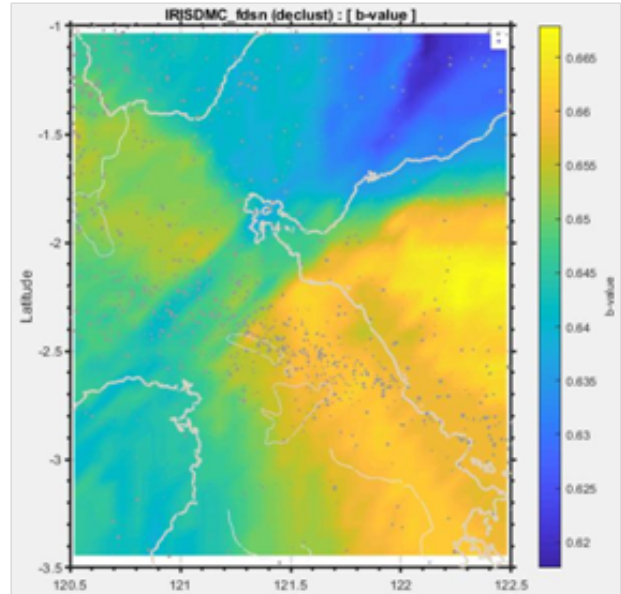
Tabel 1. Perhitungan distribusi gempabumi daerah Morowali dan Morowali Utara

| r gempa per tahun | n | Pr actual $(\frac{n}{\sum n})$ | Pr% actual | Pr Poisson Teoritis | Pr% Poisson Teoritis | r! |
|-------------------|----|--------------------------------|------------|---------------------|----------------------|----|
| 0 | 27 | 0.45 | 100 | 0.85 | 100 | 1 |
| 1 | 22 | 0.37 | 81.48 | 0.14 | 16.67 | 1 |
| 2 | 7 | 0.12 | 25.93 | 0.01 | 1.39 | 2 |
| 3 | 2 | 0.03 | 7.41 | 0 | 0.08 | 6 |
| 4 | 2 | 0.03 | 7.41 | 0 | 0 | 24 |



Gambar 5. Grafik sebaran magnitudo di daerah penelitian

dian gempabumi dan Gambar 4 menunjukkan pola sebaran magnitudo kejadian gempabumi terhadap waktu di Luwu Timur, Morowali, dan Morowali Utara yang mengalami peningkatan jumlah di setiap tahunnya. Dari kedua gambar tersebut terlihat peningkatan jumlah kejadian gempabumi yang sangat signifikan pada magnitudo gempabumi skala kecil hingga sedang ($M \leq 5$), dibandingkan dengan kejadian gempabumi besar ($M \geq 5$) yang ditandai dengan bintang kuning pada gambar 3 yang jarang terjadi di setiap tahunnya. Banyaknya sesar/patahan di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara hanya menyebabkan gempabumi dengan kekuatan/magnitudo yang kecil. Gempabumi dengan magnitudo kecil sangat sering terjadi di daerah tersebut. Inilah yang mengakibatkan di daerah ini sangat jarang terjadi gempabumi besar dalam selang waktu yang singkat. Perhitungan probabilitas secara actual maupun teoritis menunjukkan bahwa butuh selang waktu yang lama akan terjadi lagi gempabumi besar dari kejadian sebelumnya. Gambar 5 merupakan grafik distribusi nilai magnitudo completeness di wilayah penelitian yaitu $M_c=3.4$, yang menunjukkan bahwa secara umum di wilayah tersebut didominasi oleh kejadian gempabumi berkekuatan kecil hingga sedang. Kelemahan magnitudo adalah 3,4 maka frekuensi kejadian gempabumi dengan magnitudo diatas 3,4 akan mengalami penurunan (berjumlah sedikit). Nilai-a dan nilai-b juga terlihat pada gambar grafik tersebut. Nilai-a yang dihasilkan adalah 4,959, sedangkan nilai-b yang dihasilkan adalah berkisar antara 0,62 – 0,665. Nilai-a yang diperoleh termasuk dalam kategori tinggi, artinya bahwa seismisitas (kejadian gempabumi) di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara adalah besar. Nilai-b yang diperoleh adalah kurang dari 1

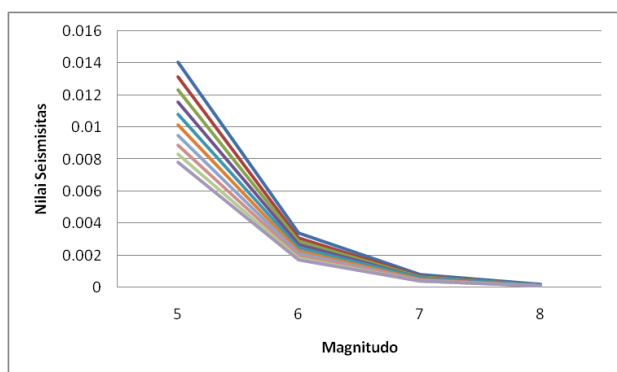


Gambar 6. Distribusi spasial nilai-b di daerah penelitian

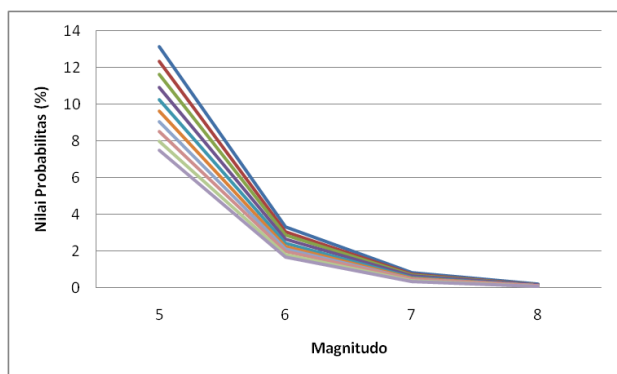
(satu). Secara spasial, sebaran nilai-b di daerah penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.

Gambar 6 adalah sebaran nilai-b secara spasial di daerah Luwu Timur, Morowali, dan Morowali Utara. Dari gambar tersebut terlihat bahwa diantara ketiga daerah penelitian nilai-b tertinggi (warna kuning) dihasilkan di daerah Luwu Timur dan Morowali, sedangkan nilai-b terendah (warna biru) dihasilkan di daerah Morowali Utara. Sebaran spasial nilai-b tersebut dapat disimpulkan bahwa daerah Luwu Timur dan Morowali memiliki batuan penyusun yang heterogen dan berkorelasi dengan tingkat stress yang rendah sehingga banyak menyebabkan kejadian gempabumi dengan magnitudo/kekuatan yang kecil hingga sedang (berkisar antara 2-4) dan kecil kemungkinan untuk terjadinya gempabumi besar ($M \geq 5$). Sedangkan daerah Morowali Utara merupakan daerah dengan batuan penyusun yang homogen dan tingkat stress yang tinggi, sehingga sangat besar kemungkinan untuk terjadi gempabumi besar di daerah ini. Nilai indeks seismisitas, nilai probabilitas, dan periode ulang kejadian gempabumi besar di daerah penelitian dihitung berdasarkan pada persamaan (6), (14), dan (15), serta berbeda untuk setiap tempat di daerah Luwu Timur, Morowali, dan Morowali Utara, bergantung pada besarnya nilai-b. Hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik yang ditampilkan merupakan variasi nilai indeks seismisitas, probabilitas, dan periode ulang untuk masing-masing nilai-b yang tertera pada gambar 6 .

Gambar 7 dan gambar 8 masing-masing adalah grafik

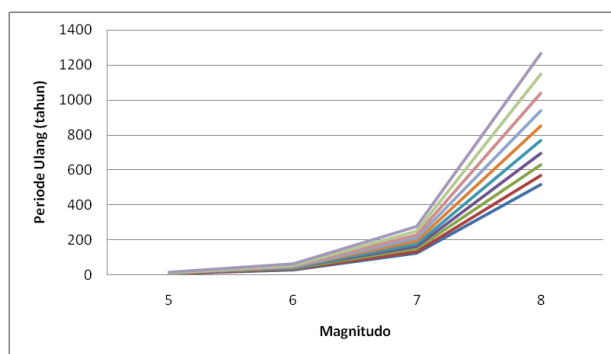


Gambar 7. Grafik nilai indeks seismisitas pada magnitudo tertentu di daerah penelitian



Gambar 8. Grafik nilai probabilitas pada magnitudo tertentu di daerah penelitian

nilai indeks seismisitas dan grafik nilai probabilitas terhadap magnitudo pada variasi nilai- b dari 0,62 sampai 0,665. Kedua gambar grafik tersebut menunjukkan tren yang sama, dimana pada magnitudo gempa bumi yang semakin besar, nilai indeks seismisitas dan probabilitas menunjukkan penurunan nilai. Artinya nilai indeks seismisitas di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara secara umum tinggi untuk kejadian gempa bumi dengan magnitudo $M \geq 5$ dan rendah untuk kejadian gempa bumi $M \geq 8$. Berbanding lurus dengan indeks seismisitas, maka nilai probabilitas/kemungkinan untuk terjadi gempa bumi $M \geq 5$ adalah besar dan probabilitas kecil untuk terjadinya gempa bumi $M \geq 8$. Diantara tiga daerah yang termasuk dalam daerah penelitian, daerah Luwu Timur dan Morowali merupakan daerah dengan nilai- b tertinggi sehingga menghasilkan nilai indeks seismisitas yang tinggi untuk setiap nilai magnitudo dibandingkan dengan daerah Morowali Utara. Periode ulang berbanding terbalik dengan nilai indeks seismisitas dan nilai probabilitas. Kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang menghasilkan nilai probabilitas yang besar memiliki periode ulang yang singkat untuk kembali terjadi. Sedangkan kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang menghasilkan nilai probabilitas yang kecil memiliki periode ulang yang lama. Secara umum periode ulang gempa bumi magnitudo $M \geq 5$ di daerah penelitian lebih cepat dibandingkan dengan periode ulang gempa bumi magnitudo $M \geq 8$. Periode ulang terjadinya gempa bumi besar di daerah Luwu Timur



Gambar 9. Grafik nilai probabilitas pada magnitudo tertentu di daerah penelitian

dan Morowali lebih cepat dibandingkan di daerah Morowali Utara (Gambar 9)

Nilai probabilitas dan periode ulang yang ditampilkan hanya estimasi atau perhitungan secara statistik dengan menggunakan data gempa bumi terdahulu. Algoritma matematika pada perhitungan statistik tidak dapat memprediksi secara tepat dan spesifik lokasi, magnitudo, dan waktu kejadian suatu gempa bumi. Tinggal di wilayah Indonesia menjadi suatu tantangan untuk selalu waspada gempa bumi dan tsunami. Gempa bumi berpotensi untuk terjadi di setiap daerah di Indonesia. Untuk gempa bumi dan tsunami, solusi yang terbaik khususnya untuk Indonesia adalah mitigasi bencana. Mitigasi bencana adalah serangkaian upaya untuk mengurangi resiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana. Untuk gempa bumi dan tsunami sama juga dengan melakukan penguatan infrastruktur seperti bangunan tahan gempa dan lainnya, tetapi yang paling penting dan yang paling utama adalah peningkatan kewaspadaan dan kesiapsiagaan, “*Awareness and Preparedness*”, dan mempertahankan sikap tersebut. Sehingga masyarakat selalu waspada dan siap menghadapi bencana gempa bumi dan tsunami.

4 KESIMPULAN

- (i) Nilai distribusi Poisson teoritis gempa bumi di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara lebih kecil daripada nilai distribusi actualnya, menunjukkan bahwa kejadian gempa bumi besar di daerah Luwu Timur, Morowali dan Morowali Utara tidak terjadi dalam jumlah yang banyak dalam setahun.
- (ii) Distribusi spasial nilai- b menunjukkan nilai yang tinggi di daerah Luwu Timur dan Morowali dibandingkan dengan daerah Morowali Utara.
- (iii) Secara statistik, nilai indeks seismisitas dan nilai probabilitas kejadian gempa bumi di Luwu Timur, Morowali, dan Morowali Utara menurun seiring dengan semakin besarnya magnitudo gempa bumi.
- (iv) Gempa bumi dengan magnitudo $M \geq 5$ memiliki periode ulang yang cepat dan periode ulang yang semakin lama terjadi pada magnitudo yang semakin besar

Pustaka

- Aki, K. (1965): Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log n = a - bm$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **43**, 237–239.
- Bain, L.J. dan Engelhardt, M. (1987): Introduction to Probability and Mathematical Statistics 2nd edition. Duxbury Press Belmont, CA.
- BMKG (2019 [e-book]): Katalog gempabumi signifikan dan merusak 1821-2018.
- Bunaga, S. dan Setiawan, Y. (2014): Analisis probabilistik gempabumi di indonesia berdasarkan distribusi poisson.
- ESDM (2017 [e-book]): Peta sumber dan bahaya gempa indonesia tahun 2017.
- Graybill, F.A. (1961): Introduction to Linear Statistical Models. Vol.1. McGraw-Hill Book Company Inc., New York NY.
- Gutenberg, B. dan Richter, C.F. (1944): Frequency of earthquakes in california. *Bulletin of the Seismological society of America*, **34**(4), 185–188.
- IRIS-DMC (2021): <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/> Data download 1961-2020.
- Ishimoto, M. (1939): Observations sur les seismes enregistres par le microsismographe construit dernièrement. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **17**, 443–478.
- Sarsito, D. (2010): Pemodelan Geometrik dan Kinematik Kawasan Sulawesi dan Kalimantan Bagian Timur berdasarkan Data GNSS-GPS dan Gaya Berat Global. Ph.D. thesis, Institut Teknologi Bandung.
- Surono dan Hartono, U. (2013): Geologi Sulawesi. LIPI Press.