

Skripsi Geofisika

**ANALISIS SEISMISITAS DAN TINGKAT KERAPUHAN BATUAN
BERDASARKAN METODE *MAXIMUM LIKELIHOOD* DAN *LEAST
SQUARE* DI WILAYAH SULAWESI TENGAH DAN DAERAH DI
SEKITARNYA PERIODE 1904 – 2021**

Disusun dan diajukan oleh :

MUTMAINNAH

H061 18 1003



PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

HALAMAN JUDUL

**Analisis Seismisitas dan Tingkat Kerapuhan Batuan Berdasarkan Metode
Maximum Likelihood dan *Least Square* di Wilayah Sulawesi Tengah dan
Daerah di Sekitarnya Periode 1904 – 2021**

SKRIPSI

***Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Sains Pada Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin***

OLEH :

MUTMAINNAH

H061 18 1003

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

HALAMAN PENGESAHAN

**Analisis Seismisitas dan Tingkat Kerapuhan Batuan Berdasarkan Metode
Maximum Likelihood dan *Least Square* di Wilayah Sulawesi Tengah dan
Daerah di Sekitarnya Periode 1904 – 2021**

Disusun dan diajukan oleh:

MUTMAINNAH

H061181003

Telah di pertahakankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada tanggal, Agustus 2022

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama

Ir. Bambang Harimei, M.Si
NIP. 196105011991031003

Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T
NIP. 199111092019031010

Ketua Departemen



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mutmainnah
Nim : H061181003
Program Studi : Geofisika
Jenjang : S1

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulisan saya yang berjudul :

**“Analisis Seismisitas dan Tingkat Kerapuhan Batuan Berdasarkan Metode
Maximum Likelihood dan *Least Square* di Wilayah Sulawesi Tengah dan
Daerah di Sekitarnya Periode 1904 – 2021”**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain. Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Agustus 2022

Yang menyatakan



MUTMAINNAH
H061181003

SARI BACAAN

Lempeng tektonik mengakibatkan struktur-struktur yang ada dan aktif bergerak dengan kecepatan yang berbeda-beda sehingga menyebabkan pulau-pulau Sulawesi sering menghasilkan gempa bumi terutama di wilayah Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya. Dari kejadian tersebut maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui nilai-a dan nilai-b pada zona grid dan zona sesar, memetakan tingkat seismisitas dan kerapuhan batuan serta mengetahui indeks seismisitas dan periode ulang di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya pada periode 1904 - 2021. Metode yang digunakan yaitu metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat seismisitas dan periode ulang pada wilayah dengan menggunakan kedua metode ini bervariasi yaitu untuk metode *Maximum Likelihood* pada zona grid diperoleh nilai-b berkisar antara 0,55 – 3,34, nilai-a berkisar antara 3,75 – 18,91 dan pada zona sesar diperoleh nilai-b berkisar antara 0,53 – 0,74, nilai-a berkisar antara 4,38 - 5,00, sedangkan untuk metode *Least Square* pada zona grid diperoleh nilai-b berkisar antara 0,14 – 1,51, nilai-a berkisar antara 1,24 – 8,19 dan pada zona sesar diperoleh nilai-b berkisar antara 0,56 – 1,15 dan nilai-a berkisar antara 4,80 – 5,63. Dari kedua metode diperoleh wilayah yang memiliki nilai-b dan nilai-a yang tinggi berada di Bolaangmongondow Utara, Prov. Sulawesi Utara dan wilayah Kab. Bonebolango, Gorontalo Utara, Prov. Gorontalo. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menambah wawasan baru mengenai mitigasi bencana dalam bidang kegempaan.

Kata Kunci : nilai-a, nilai-b, zona grid, zona sesar, Maximum Likelihood, Least Square

ABSTRACT

Tectonic plates are places that have an active tectonic setting that causes various natural events such as earthquakes, subduction pathways and the formation of volcanoes. In the process, the existing and active structures move at different speeds, causing the islands of Sulawesi to frequently produce earthquakes, especially in Central Sulawesi and the surrounding area. This study aims to determine the a -values and b -values in the grid zone and fault zone, map the seismicity and rock fragility levels and determine the seismicity index and return period in Central Sulawesi and the surrounding area for the period 1904-2021 using the Maximum Likelihood and Least methods. Square. The results showed that the level of seismicity and return period in the area using these two methods varied, namely for the Maximum Likelihood method in the grid zone, b -values ranged from 0.55 to 3.34, a -values ranged from 3.75 to 18.91 and in the fault zone, the b -values range from 0.53 to 0.74, the a -values from 4.38 to 5.00, while for the Least Square method in the grid zone, the b -values range from 0.14 to 1.51, the a ranges from 1.24 to 8.19 and in the fault zone, b -values range from 0.56 to 1.15 and a -values from 4.80 to 5.63. From both methods, the area with high b -value and high a -value is found in North Bolaangmongondow, Prov. North Sulawesi and the Kab. Bonebolango, North Gorontalo, Prov. Gorontalo. The research is expected to be used as an effort to mitigate earthquake disasters. It is hoped that the results of this research can add new insights regarding disaster mitigation in the field of earthquakes.

Keywords: *a -value, b -value, grid zone, fault zone, Maximum Likelihood, Least Square*

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah Subhanahu Wata'ala atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya. Tidak ada satupun yang diturunkan-Nya secara sia-sia. Penulis sangat bersyukur kepada-Mu Yaa Rabb atas semua karunia yang diberikan. Hanya dengan kehendak-Mulah, skripsi yang berjudul “*Analisis Seismisitas dan Tingkat Kerapuhan Batuan Berdasarkan Metode Maximum Likelihood dan Least Square di Wilayah Sulawesi Tengah dan Daerah Di Sekitarnya Periode 1904-2021*” ini dapat terselesaikan secara bertahap dengan baik. Shalawat dan salam tak lupa penulis curahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu ‘Alaihi Wa Sallam, kepada keluarga dan sahabatnya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata kesempurnaan, baik dari segi sistematika penulisan maupun dari bahasa yang terbuat didalamnya.

Penelitian ini dalam rangka mengaktualisasikan buah fikir yang telah terkonsepkan selama melakukan perkuliahan dan dari-Nya lah segala pertolongan melalui perantara hamba-hamba-Nya. Maka dari itu dalam kesempatan berbahagia ini penulis hendak menyampaikan segenap rasa terimakasih kepada pihak yang telah berkonstruksi dalam menyelesaikan skripsi maupun dalam penyelesaian studi perkuliahan ini yang penulis tidak ada sebutkan semuanya satu-persatu. Rasa terimakasih yang sedalam-dalamnya teruntukkan kepada :

1. Orang tua penulis yaitu **Bapak Muh. Arfah** dan **Ibu Mariati**, yang senantiasa memberikan dukungan, mendoakan, serta cinta dan kasih sayangnya selalu tercurahkan kepada anak-anaknya. Juga kepada kakakku tersayang **Musdalifah S.Si.** dan adek-adekku **Muh. Ismail Arfah** dan

Marwah Tul Jannah. Serta kepada seluruh keluarga besar **H. Hamid** dan **H. Husman** yang telah memberikan doa dan dukungan.

2. **Bapak Ir. Bambang Harimei, M.Si.** selaku pembimbing utama, **Bapak Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T.** selaku pembimbing pertama yang telah memberikan bimbingan, nasihat serta masukan – masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi tugas akhir ini.
3. **Bapak Sofian S.Si.** serta **Staf BMKG Palu,** penulis ucapkan terima kasih telah memberikan bimbingan, motivasi serta pengetahuan yang tidak bisa didapatkan dari buku – buku atau bacaan.
4. **Bapak Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT., Surv. IPM.** dan **Bapak Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam penulisan skripsi ini.
5. Seluruh dosen pengajar yang telah mendedikasikan waktunya sebagai pengajar. Terima kasih atas ilmu yang telah diberikan, semoga menjadi amal jariah di akhirat kelak. Dan juga kepada seluruh **staf Departemen Geofisika** dan **staf Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam** yang telah membantu menyelesaikan urusan akademik terkhusus selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Terima kasih kepada **Reski Amelia** dan **Nurfadillah S.Si.** yang telah memberikan motivasi, dukungan dan semangat serta telah meluangkan waktunya untuk mendengarkan keluh kesah penulis.

7. Terima kasih kepada **Iswatun Khasanah, Jihan Faruk Zubedi, Angput, Zefanya** dan **Safira** sahabat Pondok Pelangi yang selalu ada dari masa pengkaderan hingga sekarang.
8. Teman – teman seperjuangan **Geofisika 2018** dan **Himafi 2018** atas doa, dukungan, maupun bantuan dalam menjalani perkuliahan dan menyelesaikan skripsi.
9. Terima kasih kepada teman kosan Pondok Bahari **Reski, Afni, Zulfa** dan **deva** yang telah banyak membantu dan bersama-sama berjuang menyelesaikan skripsi.
10. Terima kasih kepada teman-teman **KKN Lutim 2** yang telah memberikan pengalaman, pengetahuan dan ilmu-ilmunya.
11. Serta penulis ucapkan kepada seluruh pihak secara langsung maupun tidak langsung yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi maupun studi yang tidak sempat disebutkan satu persatu.

Makassar, Agustus 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
SARI BACAAN.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB 1_PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	5
I.3 Ruang Lingkup.....	6
I.4 Tujuan Penelitian	6
BAB II_TINJAUAN PUSTAKA.....	8
II.1 Kondisi tektonik Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya.....	8
II.2 Gempa Bumi	12
II.2.1 Pengertian Gempa Bumi	12
II.2.2 Deformasi Batuan	14
II.2.3 Magnitudo Gempa Bumi.....	15

II.3 <i>Seismicity Declustering</i>	20
II.4 Hukum Gutenberg-Richter	23
II.5 <i>Maximum Likelihood</i>	26
II.7 Interpolasi	28
II.8 Indeks Seismisitas dan Periode Ulang Gempa	29
BAB III <u>M</u>ETODOLOGI PENELITIAN	31
III.1 Lokasi Penelitian	31
III.2 Alat dan Bahan Penelitian	32
III.2.1 Alat	32
III.2.2 Bahan	32
III.3 Pengolahan Data	32
III.4 Diagram Alir.....	34
BAB IV <u>H</u>ASIL DAN PEMBAHASAN	35
IV.1 Distribusi Kejadian Gempa Bumi	35
IV. 2 Peta Pembagian Zona Grid.....	39
IV.3 Perhitungan Tingkat Seismisitas (<i>A-Value</i>) Dan Kerapuhan Batuan (<i>B - Value</i>) Di Zona Sesar.....	46
IV.4 Analisis Dan Interpolasi Tingkat Seismisitas Dan Kerapuhan Batuan .	50
IV.5 Perhitungan indeks seismisitas dan periode ulang gempa pada zona grid	56

IV.1.5 Perhitungan indeks seismisitas dan periode ulang gempa pada zona sesar	58
BAB V_KESIMPULAN DAN SARAN.....	62
V.1 Kesimpulan.....	62
IV.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Peta Geologi Sulawesi (Hall & Wilson, 2000).....	9
Gambar II. 2 Proses deformasi batuan	14
Gambar II. 3 Saturasi magnitudo gempa bumi	17
Gambar II. 4 Dua representasi berbeda dari hukum Gutenberg-Richter yang menggambarkan hubungan logaritma frekuensi kejadian gempa bumi dan magnitudo (Zalohar, 2018).	24
Gambar III. 1 Lokasi Penelitian.....	31
Gambar III. 2 Bagan Alir	34
Gambar IV. 1 Distribusi frekuensi magnitudo berdasarkan frekuensi kejadian gempa bumi di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904-2021...	35
Gambar IV. 2 Peta seismisitas wilayah Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 - 2021 dengan menggunakan <i>software</i> ArcGis.....	36
Gambar IV. 3 Peta peta sistem wilayah zona sesar Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904-2021 dengan menggunakan <i>software</i> ArcGis.....	38
Gambar IV. 4 Peta pembagian grid wilayah di Sulawesi Tengah dan daerah disekitarnya	39
Gambar IV. 5 Peta Interpolasi Sebaran Seismisitas (<i>a-value</i>) dengan metode <i>Maximum Likelihood</i> di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya	50
Gambar IV. 6 Peta Interpolasi Sebaran Seismisitas (<i>b-value</i>) dengan metode <i>Maximum Likelihood</i> di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya	52
Gambar IV. 7 Peta Interpolasi Sebaran Seismisitas (<i>a-value</i>) dengan metode <i>Least Square</i> di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya	54

Gambar IV. 8 Peta Interpolasi Sebaran Seismisitas (*b-value*) dengan metode *Least Square* di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya 55

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Nilai-a dan nilai-b pada beberapa grid dengan metode <i>Maximum Likelihood</i>	43
Tabel 4. 2 Nilai-a dan nilai-b pada beberapa grid dengan metode <i>Least Square</i> .	44
Tabel 4. 3 Tabel analisis keseluruhan nilai-a dan nilai-b pada metode <i>Maximum Likelihood</i>	46
Tabel 4. 4 Tabel analisis keseluruhan nilai-a dan nilai-b pada metode <i>Least Square</i>	49
Tabel 4. 5 Indeks seismisitas dan periode ulang pada beberapa grid dengan metode <i>Maximum Likelihood</i>	56
Tabel 4. 6 Indeks seismisitas dan periode ulang pada beberapa grid dengan metode <i>Least Square</i>	57
Tabel 4. 7 Hasil analisis indeks seismisitas dan periode ulang dengan metode <i>Maximum Likelihood</i>	58
Tabel 4. 8 Hasil Analisis indeks seismisitas dan periode ulang dengan metode <i>Least Square</i>	59

BAB 1

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pulau Sulawesi memiliki kondisi geologi dan tatanan tektonik yang sangat rumit, hal ini terdiri dari sejumlah bagian litosfer yang menampilkan sejarah atau peristiwa geologi dari proses subduksi atau penunjaman (Cipta et al., 2017). Lempeng tektonik merupakan segmen keras bumi dan kaku yang mengapung di atas astenosfer yang cair dan panas sehingga saling bergerak dan berinteraksi satu sama lain. Wilayah perbatasan lempeng tektonik adalah tempat yang memiliki kondisi tatanan tektonik aktif sehingga menyebabkan terjadinya berbagai kejadian alam seperti terjadinya gempa bumi, jalur subduksi, dan terbentuknya gunung berapi (Simangunsong et al., 2019). Pada proses tersebut mengakibatkan struktur-struktur yang ada dan aktif bergerak dengan kecepatan yang berbeda-beda sehingga menyebabkan pulau-pulau Sulawesi sering menghasilkan gempa bumi (PSGN, 2017).

Gempa bumi secara pasti belum dapat diprediksi waktu terjadinya sehingga mengakibatkan banyak korban jiwa berjatuhan. Prediksi yang dimaksud adalah tempat dan waktu kejadian, magnitudo gempa dan kedalaman fokus. Gempa bumi merupakan faktor yang disebabkan oleh bencana alam, yaitu peristiwa pelepasan energi berupa gelombang getaran yang menjalar ke permukaan bumi yang diakibatkan oleh adanya gangguan di kerak bumi. Pencatatan dan perekaman pada gelombang seismik dikenal sebagai seismometer yang merupakan sensor atau alat penerima getaran gempa bumi, sedangkan seismograf merupakan alat pencatat getaran gempa bumi (Sili, 2013).

Pulau Sulawesi terkhusus Prov. Sulawesi Tengah memiliki struktur utama yang merupakan sumber gempa bumi di darat dan di laut yaitu Sesar Palu Koro, yang memotong Sulawesi dari arah barat laut menuju tenggara sepanjang lebih dari 300 km, dari tunjaman Sulawesi Utara yang merupakan sumber gempa bumi di laut melewati Teluk Palu ke arah selatan dan berbelok ke arah tenggara yang menyambung dengan Sesar Matano dan Sesar Lawanopo, dan akhirnya menyatu kembali pada Tunjaman Tolo pada bagian Timur. Sesar Palu Koro merupakan jenis sesar geser mengiri yang memanjang sepanjang arah utara – selatan dan melalui Kota Palu. Berdasarkan data GPS yang terbaru hingga tahun 2016, bahwa laju geser pada Sesar Palu Koro adalah 20 - 40 mm/tahun pada peta sumber dan bahaya gempa Indonesia pada tahun 2017 (PSGN, 2018).

Dampak nyata dari salah satu bukti adanya keaktifan tektonik yaitu pada kejadian Palu yang terjadi pada tanggal 28 September 2018 dengan M_w 7,4 pada kedalaman 10 km yang berpusat di 26 km utara Donggala, Sulawesi Tengah. Menurut hasil analisis dari BMKG, mengatakan bahwa mekanisme sumber menunjukkan bahwa gempa Palu dibangkitkan oleh deformasi dengan mekanisme pergerakan dari struktur sesar mendatar (*strike-slip*). Sehingga menyebabkan guncangan yang kuat dan menghasilkan tsunami serta likuifaksi besar-besaran terutama di daerah Petobo dan Balaroa yang berada di Kota Palu. Kejadian bencana alam ini mengakibatkan banyak korban jiwa berjatuhan, sebagian besar berada di Kota Palu, Donggala, Sigi, Parigimoutong dan Pasangkayu di Sulawesi Barat dan juga terdapat berbagai kerusakan material yang terjadi akibat dari gempa tersebut (BMKG, 2018; PSGN, 2018).

Nilai-a adalah suatu tetapan yang besarnya bergantung pada periode, luas daerah dan aktivitas daerah pengamatan. Parameter seismisitas atau biasa disebut sebagai nilai-a merupakan parameter seismik yang nilainya bergantung pada jumlah kejadian gempa bumi atau bergantung pada banyaknya *event* gempa bumi yang berada pada batasan penelitian. Nilai seismisitas tersebut dapat menunjukkan karakteristik suatu data dengan tingkat seismisitas suatu daerah atau dapat menggambarkan aktivitas seismik pada suatu daerah dalam jangka waktu tertentu. Parameter tektonik atau nilai-b dapat menunjukkan *stress* lokal sehingga dapat menjadi parameter kegempaan yang diperoleh dari hubungan antara frekuensi relatif dan jumlah kejadian gempa besar dan gempa kecil dari suatu wilayah (Arimuko et al., 2018)

Beberapa metode yang telah digunakan dalam menentukan tingkat seismisitas atau tingkat kerapuhan batuan di suatu daerah yaitu dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square*. Metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square* merupakan metode yang digunakan untuk menentukan hubungan antara frekuensi dan magnitudo gempa. Metode *Maximum Likelihood* mempunyai keunggulan untuk menghitung secara statistik nilai parameter keaktifan gempa bumi karena dapat menghindari kekosongan magnitudo pada interval tertentu. Analisis statistik dengan model ini memberikan hasil yang lebih stabil karena memodelkan kemiringan garis. Sedangkan Metode *Least Square* (Regresi Linear) merupakan salah satu cara untuk menghitung nilai-a dan nilai-b dari hubungan antara magnitudo dan frekuensi gempa, dengan mengumpulkan pengamatan jumlah gempa untuk masing-masing selang

magnitudo tertentu. Metode ini disebut sebagai suatu analisis statistik untuk mengetahui seberapa jauh hubungan antara variabel yang memanfaatkan hubungan antara dua variabel atau lebih yang memiliki tingkat eror yang kecil (Simangunsong et al., 2019; Arimuko et al., 2018; Dwiyantri et al., 2020)

Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai aktivitas seismisitas dan tingkat kerapuhan batuan salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Putri (2018), hasil penelitian tersebut diperoleh nilai-a berkisar antara 5-11 yang memiliki aktivitas seismik yang tinggi, dan nilai-b berkisar antara 0,6-1,8 yang menandakan tingkat kerapuhan batuan yang tinggi. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Simangunsong et al. (2019), dari penelitian tersebut diperoleh bahwa pada tahun 2015 mencapai nilai-b tertinggi sebesar 0,961 menunjukkan sebagai indikasi adanya peningkatan aktivitas seismik di daerah Palu, dan pada tahun 2018 memiliki penurunan nilai-b menjadi 0,685 yang mengidentifikasi bahwa terdapat tegangan yang tinggi di daerah Palu berdasarkan *trend* yang ada.

Dampak dari bahaya yang ditimbulkan oleh alam seperti gempa tektonik sering terjadi secara dahsyat dalam hal kerusakan lingkungan dan korban jiwa yang ditimbulkan. Terjadinya gempa bumi tidak dapat dicegah, tetapi dapat diminimalisir melalui pencegahan yang efektif. Upaya mitigasi gempa bumi yang dilakukan dapat memperkecil dampak dari bencana gempa, salah satu upaya mitigasi yaitu memprediksi periode ulang gempa bumi atau dapat diperkirakan kapan terjadinya gempa bumi dengan menggambarkan jumlah total kejadian gempa bumi yang berlangsung dalam periode satu tahun atau nilai indeks seismisitas gempa bumi (Sianturi et al., 2019).

Diantara beberapa penelitian yang telah dilakukan baik dalam bentuk skripsi maupun jurnal ilmiah, maka penelitian dengan judul “**Analisis Seismisitas dan Tingkat Kerapuhan Batuan Berdasarkan Metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square* di Wilayah Sulawesi Tengah dan Daerah di Sekitarnya Pada Periode 1904 - 2021**”, dilakukan mengingat gempa bumi yang pernah terjadi di tahun 2018 memiliki kekuatan magnitudo sebesar M_w 7.4. Gempa bumi yang terjadi pada tahun 2018 merusak berbagai infrastruktur dan banyak memakan korban jiwa. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat seismisitas (*a-value*) dan kerapuhan batuan (*b-value*) pada zona grid dan zona sesar, memetakan tingkat seismisitas dan kerapuhan batuan, serta menentukan indeks seismisitas dan kerapuhan batuan pada zona grid dan zona sesar dengan menggunakan dua metode yaitu metode *Maximum Likelihood* dan metode *Least Square* di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya pada periode 1 Januari 1904 – 30 November 2021 dan sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

- 1) Berapa nilai-a dan nilai-b pada zona grid dan zona sesar di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 – 2021 dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square* ?
- 2) Bagaimana analisis dan interpolasi tingkat seismisitas dan kerapuhan batuan di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 - 2021 dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square* ?

- 3) Berapa nilai indeks seismisitas dan periode ulang gempa di wilayah Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 – 2021 dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square* ?

I.3 Ruang Lingkup

Penelitian ini berada di wilayah Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya dengan batasan koordinat $3^{\circ} 30'$ LS – $1^{\circ} 50'$ LU dan $119^{\circ} 0'$ BT – $124^{\circ} 20'$ BT. Penelitian ini menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square* dengan menggunakan data sekunder berupa waktu terjadinya gempa (*origin time*), hiposenter dan magnitudo yang diperoleh dari katalog BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika) dan USGS (*United States Geological Survey*) dari rentang waktu 1 Januari 1904 - 30 November 2021 (± 117 tahun) dengan magnitudo $\geq 4 M_w$ dan kedalaman (h) ≤ 60 Km. Pengolahan data yang didapatkan hasil berupa peta sebaran seismisitas, tabel berupa *a-value*, *b-value*, indeks seismisitas, periode ulang gempa, peta interpolasi *a-value* dan peta interpolasi *b-value*. Hasil tersebut diharapkan bisa membantu dalam mitigasi bencana di wilayah Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Mengetahui nilai-a dan nilai-b pada zona grid dan zona sesar di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 – 2021 dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square*.

- 2) Memetakan tingkat seismisitas dan kerapuhan batuan di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 - 2021 dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square*.
- 3) Mengetahui indeks seismisitas dan periode ulang di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya periode 1904 – 2021 dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood* dan *Least Square*.

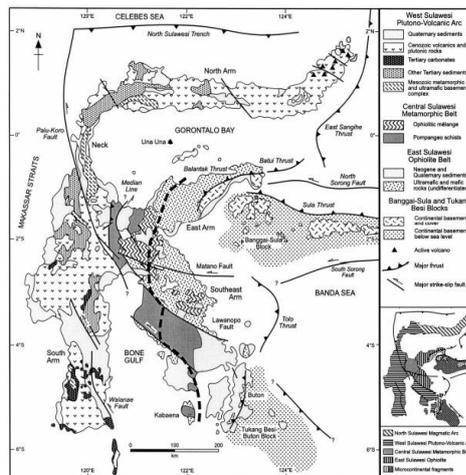
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Kondisi tektonik Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya

Triple junction merupakan zona pertemuan ketiga lempeng besar dunia, tempat terjadinya pola deformasi yang kompleks di Sulawesi, baik dalam bentuk sesar geser (*strike slip fault*) maupun sesar naik (*thrust fault*), dimana beberapa sesar tersebut aktif dan menyebabkan gempa bumi. Sesar yang berdekatan dengan Zona Subduksi mempunyai pola *thrust* seperti Makassar, Tolo dan Tomini. Sedangkan sesar yang berada di darat yang terletak jauh dari Zona Subduksi mempunyai pola *strike slip* baik dalam bentuk pola sinistral (mengiri) seperti Sesar Palu Koro maupun pola dekstral (menganan) seperti pada Sesar Gorontalo (PSGN, 2017).

Dilihat dari kedalaman gempa buminya, aktivitas gempa yang berada di zona sesar aktif tampak didominasi oleh gempa bumi dangkal antara kedalaman 0 - 60 km yang merupakan alur pelepasan tegangan kerak bumi yang dipicu oleh aktivitas sesar aktif. Ini menunjukkan bahwa daerah Palu dan sekitarnya merupakan daerah yang rawan terhadap gempa bumi dengan memperlihatkan kondisi seismisitas dan tektonik yang ada untuk mendukung terjadinya gempa bumi kuat dengan kedalaman dangkal yang dapat membangkitkan tsunami (Mudin et al., 2015).



Gambar II. 1 Peta Geologi Sulawesi (Hall & Wilson, 2000)

Gambar II.1 menunjukkan batas lokasi penelitian dengan koordinat $3^{\circ} 30'$ LS – $1^{\circ} 50'$ LU dan $119^{\circ} 0'$ BT – $123^{\circ} 20'$ BT, terdapat beberapa sesar yang di daerah tersebut yaitu sebagai berikut :

1) *Megathrust* Sulawesi Utara atau Subduksi Minahasa

Sulawesi bagian utara terdapat lempeng laut Sulawesi yang disebabkan oleh pergerakan lempeng laut Sulawesi yang dikenal sebagai *Megathrust* Sulawesi Utara. Kecepatan pergeseran geodetik *Megathrust* Sulawesi Utara mencapai 42 - 50 mm/thn. *Megathrust* Sulawesi Utara dapat mengakibatkan gempa yang berkekuatan besar yaitu gempa dengan magnitudo > 8 sehingga bisa membangkitkan tsunami di Sulawesi bagian utara (Kurniawan et al., 2021).

Sulawesi Utara berstatus paling rawan jika dibandingkan dengan wilayah lainnya di Pulau Sulawesi. Walaupun intensitas perulangan gempanya lebih kecil dibandingkan dengan wilayah Laut Maluku, gempa yang terdapat di Laut Sulawesi memiliki potensi yang lebih besar dalam membangkitkan tsunami karena memiliki hiposenter atau pusat gempa yang dangkal yaitu kurang dari 50 km. Sehingga di zona subduksi Laut Sulawesi merupakan daerah yang rawan

dilanda bencana tsunami. Kondisi ini menjadi ancaman dan bahaya yang serius terhadap keselamatan masyarakat yang berada di sekitar zona subduksi tersebut.

2) Sesar Palu Koro

Sulawesi Tengah masuk kedalam salah satu daerah yang rawan bencana gempa bumi di Indonesia, karena terletak dengan sumber gempa bumi yang berada di laut dan di darat. Sumber gempa bumi tersebut terbentuk akibat proses tektonik yang terjadi sebelumnya. Palu Koro merupakan salah satu sumber gempa bumi yang berada di darat yang tergolong sesar utama di Pulau Sulawesi dan merupakan sesar aktif. Sesar aktif Palu Koro memanjang dengan arah utara-selatan membelah wilayah Kota Palu. Sesar ini berada dalam satu sistem dengan lajur subduksi Sulawesi Utara di bagian utara dan Sesar Matano pada bagian selatan. Pergeseran pada lempeng-lempeng tektonik yang cukup aktif pada Sesar Palu Koro membuat tingkat kegempaan tergolong cukup tinggi dan diyakini bahwa Sesar Palu Koro merupakan sesar geser mengiri dan bercabang (*bifurcation*). Wilayah yang rawan karena diakibatkan oleh adanya Sesar Palu Koro, antara lain Buol, Tolitoli, Donggala, dan Kota Palu (BMKG, 2018; Kusumah et al., 2018).

Sesar Palu Koro memotong Sulawesi dari arah barat laut menuju tenggara sepanjang lebih dari 300 km, dari Tunjaman Sulawesi Utara yang merupakan sumber gempa bumi di laut melewati Teluk Palu ke arah selatan dan berbelok ke arah tenggara yang menyambung dengan Sesar Matano dan Sesar Lawanopo, dan akhirnya menyatu kembali pada Tunjaman Tolo pada bagian timur. Sesar Palu Koro merupakan jenis sesar geser mengiri yang memanjang sepanjang arah utara

– selatan dan melalui Kota Palu. Berdasarkan data GPS yang terbaru hingga tahun 2016, bahwa laju geser pada Sesar Palu Koro adalah 20-40 mm/ tahun pada peta sumber dan bahaya gempa Indonesia pada tahun 2017 (PSGN, 2018).

Menurut Kusumah et al. (2018) wilayah Kota Palu dan sekitarnya merupakan suatu wilayah dataran aluvial yang memanjang berarah relatif ke arah utara - selatan dan dibatasi oleh lereng dan punggung di kedua sisi lembah sedang di tengah-tengah lembahnya mengalir sungai Salo Palu.

3) Sesar Matano

Sesar Matano berada di bagian lengan tenggara Sulawesi yang membentang mulai dari Sulawesi Tengah bagian Selatan hingga Teluk Tolo. Secara geologi, Sesar Matano memiliki struktur yang bergerak geser mengiri (*left lateral*) dan telah aktif sejak Zaman Kuartar. Pergerakan sesar dapat diketahui dari persebaran mekanisme fokal yang diperoleh dari peristiwa pelepasan energi gempa bumi yang diterima seismograf (Kurniawati et al., 2020).

4) Sesar Batui dan Balantak

Sistem Sesar Batui – Balantak menandakan zona konvergensi antara platform Banggai – Sula dan sabuk Ofiolit Balantak. Lebar zona berkisar dari beberapa ratus meter di Pantai Balantak hingga lebih dari 1 km di daerah Toili. Pada skala regional zona sesar diperlihatkan satu garis yang menunjam ke arah utara dan barat laut. *Fault* dan *thrust* terjadi pada skala, regional pada semua unit batuan yang terjadi pada batuan asli maupun sedimen tepi kontinen.

II.2 Gempa Bumi

II.2.1 Pengertian Gempa Bumi

Rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat bisa disebabkan oleh faktor alam maupun faktor non-alam. Gempa bumi merupakan faktor yang disebabkan oleh bencana alam dan merupakan peristiwa atau gejala pelepasan energi berupa gelombang getaran yang menjalar ke permukaan bumi akibat adanya gangguan di kerak bumi (Sili, 2013).

Gempa bumi yang perlu mendapatkan perhatian karena mempunyai pengaruh yang sangat besar dan mengerikan adalah gempa tektonik. Hal yang perlu diketahui dari gempa tektonik adalah besarnya frekuensi yang terjadi, energi yang dibebaskan dan luas pengaruhnya akibat adanya pergerakan lempeng tektonik. Akibat gempa bumi tektonik dapat menimbulkan pergeseran sepanjang bidang patahan dengan kisaran 1 - 10 m dan umumnya 0,2 - 0,8 m. Pusat gempa bumi tektonik berkaitan erat dengan tempat-tempat yang sering terjadi pergerakan pada kulit bumi yaitu di zona subduksi dan sesar. Ketika kejadian-kejadian gempa dengan *focal depth* yang dangkal terjadi dalam daerah dan waktu yang terbatas dan ketika energi yang dilepaskan sangat besar maka disebut sebagai gempa utama. Gempa yang terjadi sebelum gempa utama disebut gempa awal (*foreshock*), dan jika terjadinya sesudah gempa utama disebut gempa susulan (*aftershock*). Beberapa kejadian atau rentetan gempa bumi tanpa adanya gempa utama disebut sebagai *swarm earthquake*. Kejadian gempa atau *event* gempa secara umum dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut (Supendi et al., 2021) :

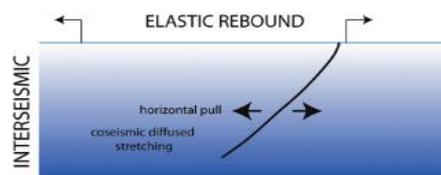
- 1) Gempa awal (*foreshock*) – gempa utama (*mainshock*) – gempa susulan (*aftershock*).
- 2) Gempa utama (*mainshock*) – gempa susulan (*aftershock*).
- 3) *Swarm Earthquake*.

Kejadian-kejadian gempa bumi sering kali digambarkan oleh parameter-parameter yang mengikutinya. Parameter yang dimaksud merupakan parameter gempa yang berkaitan dengan kegempaan suatu wilayah. Parameter tersebut adalah; waktu (*origin time*), hiposenter (*latitude, longitude* dan *focal depth*), *magnitude*, dan intensitas maximum. Intensitas menyatakan ukuran terjadinya akibat gempa bumi di suatu tempat tertentu dan mempunyai pengaruh secara langsung terhadap alam, manusia dan segala kepentingannya. Adapun skala yang dipakai secara internasional adalah MMI (*Modified Mercally Intensity*) dengan skala terendah I dan skala tertinggi XII (Kumar et al., 2016).

Karakteristik gempa bumi disebut sebagai studi seismisitas, yang meliputi; kekuatan gempa bumi yaitu besaran energi yang dihasilkan saat terjadinya gempa bumi yang disebut sebagai magnitudo, lokasi terjadinya gempa bumi atau pusat gempa bumi dalam bentuk koordinat geografis dan disertai dengan kedalaman dari sumber gempa bumi, mekanisme gempa bumi yaitu penentuan model pensesaran akibat terjadinya gempa bumi seperti sesar normal, sesar naik, sesar geser, atau gabungan dari ketiganya dan karakteristik yang terakhir adalah frekuensi kejadian gempa bumi yaitu distribusi atau persebaran *event* gempa bumi yang terjadi pada suatu daerah yang menunjukkan seberapa aktif suatu daerah tertentu terhadap kejadian gempa bumi (Sili, 2013).

II.2.2 Deformasi Batuan

Bumi tersusun oleh dua bagian yaitu bagian litosfer dan astenosfer. Astenosfer memiliki densitas yang kecil dan bersuhu tinggi serta bersifat fluida yang kental. Litosfer mempunyai densitas yang lebih besar dan mudah patah, karena di astenosfer memiliki suhu yang tinggi sehingga timbul arus yang dinamakan sebagai arus konveksi. Arus konveksi ini selalu bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan yang rendah. Gerakan dari astenosfer akan menggerakkan litosfer yang berada di atasnya sehingga litosfer yang berupa lempeng-lempeng akan terus bergerak.



Gambar II. 2 Proses deformasi batuan (Bignami et al.,2020).

Berdasarkan Teori *Elastic Rebound* yang menyatakan bahwa gempa bumi merupakan salah satu gejala alam yang disebabkan oleh pelepasan energi regangan elastik batuan dari dalam bumi bumi sehingga menyebabkan adanya deformasi batuan yang terjadi di litosfer seperti Gambar II.2. Deformasi batuan terjadi akibat adanya gaya tekanan (*stress*) dan tarikan (*strain*) yang terus-menerus pada lapisan bumi sehingga daya dukung pada batuan mencapai batas maksimum dan mulai terjadi pergeseran dan akhirnya patah secara tiba-tiba, dari kejadian tersebut menimbulkan energi *stress* yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran yang dikenal sebagai gempa bumi.

Apabila dua gaya yang bekerja memiliki arah yang berlawanan pada batuan, maka batuan tersebut akan terdeformasi atau mengalami perubahan

bentuk karena batuan mempunyai sifat elastik. Apabila gaya yang bekerja pada batuan dalam waktu yang lama maka daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan mulai terjadi pergeseran, akibat dari proses tersebut batuan akan mengalami patahan secara tiba-tiba sepanjang bidang sesar (Bignami et al., 2020).

II.2.3 Magnitudo Gempa Bumi

Ukuran atau kekuatan (*size* atau *strength*) yang terstandarisasi dari gempa bumi merupakan sebuah kebutuhan, tidak hanya untuk tujuan klasifikasi tetapi digunakan untuk semua jenis aplikasi *tectonophysical* atau studi tentang proses fisik yang mendasari deformasi tektonik dan aplikasi rekayasa (*engineering*). Magnitudo merupakan perkiraan ukuran relatif atau ukuran pelepasan energi dari suatu gempa bumi. Terdapat beberapa sistem pengukuran dan umumnya diukur pada data seismogram. Magnitudo adalah parameter gempa bumi yang berkaitan dengan besarnya energi yang dilepaskan oleh sumber gempa bumi berdasarkan pengukuran amplitudo gelombang gempa.

Skala Richter (M_L) adalah paling populer digunakan, yang secara kuantitatif hanya efektif untuk mengukur gempa bumi dangkal dengan energi yang tidak terlalu besar dan jarak yang dekat. Richter pada tahun 1935 memperkenalkan skala magnitudo lokal atau M_L untuk gempa bumi California Selatan yang dicatat dengan menggunakan seismograf torsi Wood - Anderson dan merupakan dasar dalam pengembangan selanjutnya. Skala magnitudo ini digunakan untuk gempa bumi dangkal dan gempa lokal dengan jarak lebih kecil dari 600 km di California Selatan.

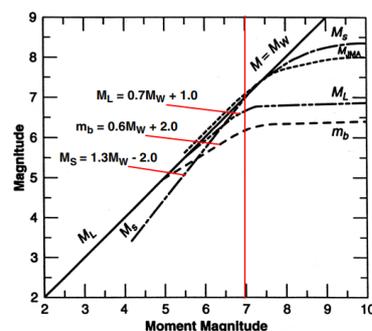
Kemudian Gutenberg di tahun 1945 memperkenalkan magnitudo gelombang badan (m_b) berdasarkan P, PP, S dari gempa bumi fokus dangkal. Karena gelombang seismik yang merambat baik sebagai gelombang badan dan gelombang permukaan, maka dua skala magnitudo ini juga selalu digunakan yaitu m_b , dengan m_b menggunakan amplitudo primer dengan perioda 1–10 detik dan M_s menggunakan gelombang Rayleigh dengan perioda 18-22 detik. Akan tetapi peristiwa gempa bumi yang menghasilkan energi menggunakan skala yang berbeda-beda. Misalkan, gempa bumi besar dengan bidang sesar yang luas akan menyebarkan energinya dalam gelombang perioda panjang yang tidak dapat secara akurat terukur oleh skala (m_b).

Untuk menentukan besarnya ukuran gempa bumi secara tepat, skala momen (M_0) digunakan. Perhitungan M_0 berdasarkan pergeseran di sepanjang bidang sesar, M_0 setara dengan kekuatan geser batuan yang dikalikan dengan besar pergeseran patahan (*slip*). Sehingga M_0 dianggap mengukur jumlah energi yang dilepaskan di seluruh luasan bidang sesar. Hingga saat ini skala momen telah berkembang menjadi skala baru, yaitu skala magnitudo momen (M_w) yang lebih akurat untuk mengukur gempa bumi yang besar, karena mengandalkan parameter fisik seperti luas bidang sesar yang bergerak, panjang pergeseran patahan dan jumlah energi yang dilepaskan (Bath, 1981; Husein, 2016).

Skala magnitudo berupa M_L (magnitudo lokal), M_s (magnitudo permukaan) dan m_b (magnitudo badan) merupakan magnitudo yang paling banyak digunakan. Hal ini juga dipahami dalam pengoperasian instrumentasi *bandwidth* yang terbatas pada karakteristik frekuensi dan tergantung besarnya radiasi elastis

yang dieksitasi oleh sumber gempa. Skala magnitudo pada M_L , M_S , dan m_b dikatakan tersaturasi pada magnitudo yang besar. Untuk gempa besar, semua pengukuran amplitudo domain waktu pada batas ini tidak lagi mengukur karakteristik sepanjang sesar yang luas akan tetapi mengukur di sepanjang zona sesar kerak.

Skala M_w dikatakan tidak tersaturasi karena pengukuran gempa-gempa besar menggunakan skala magnitudo yang tidak tergantung pada derajat guncangan tanah (Hanks & Kanamori, 1979). Sejak skala M_w pertama kali diperkenalkan banyak penelitian telah dilakukan di berbagai wilayah dan dalam lingkungan seismoteknik untuk membangun hubungan skala besaran lain dengan M_w . Alasan terpenting untuk menyusun katalog gempa bumi dengan semua magnitudo dalam satu skala umum yaitu M_w untuk memecahkan masalah praktik yang penting (yaitu dalam penilaian bahaya seismik dan lain-lain) serta teoritis (perhitungan deformasi kerak dan lain-lain). Pengukuran parameter gerakan tanah akibat gempa akan cenderung kurang sensitif untuk gempa besar dibanding dengan gempa-gempa kecil, ini disebut sebagai *earthquake magnitude saturation*. *Saturation* merupakan titik batas yang mana hitungan magnitudo gempa menjadi kurang teliti atau dikatakan sebagai batas penelitian.



Gambar II. 3 Saturasi magnitudo gempa bumi (Antomi, 2010).

Pada Gambar II.3 merupakan saturasi magnitudo gempa bumi, dimana pada *body-wave magnitude* (m_b) dan *local magnitude* (M_L) akan mengalami saturasi pada $M = 6-7$. Sedangkan pada *surface-magnitude* (M_s) akan mengalami saturasi pada $M = 8$. Maka proses perhitungan magnitudo gempa tidak lagi memakai *wave amplitude* tetapi memakai besaran *energi released* (Akkoyunlu, 2020).

Giacomo et al., (2014), menguraikan perhitungan ulang dan kumpulan magnitudo yang terdapat dalam katalog Gempa Instrumen Global Referensi ISC-GEM (1900-2009). Perhitungan ulang M_s (gelombang permukaan) dan nilai m_b (gelombang badan) diperoleh dari hiposenter baru, data periode amplitudo yang sebelumnya tidak tersedia kemudian digitalkan. M_s dan m_b yang dihitung ulang dengan data yang ada memberikan dasar dalam penurunan hubungan konversi baru ke M_w (besaran momen). Terdapat hubungan empiris baru menggunakan model regresi linear ortogonal untuk mendapatkan nilai M_w dari M_s dan m_b . Nilai M_w biasanya diperoleh melalui hubungan konversi empiris ke skala magnitudo standar seperti M_s dan m_b , model-model baru yang diperoleh kemudian diuji terhadap nilai sebenarnya dari M_w , yang mengarah pada keputusan bahwa hanya model eksponensial yang baru diturunkan yang lebih banyak digunakan pada penelitian untuk menghitung nilai M_w pada katalog ISC-GEM.

Sebagian besar penelitian menerapkan teknik regresi linear ke kumpulan data global atau regional seperti penelitian yang dilakukan oleh Scordilis (2006). Salah satu utama literatur terbaru yaitu menggunakan metode *Generalized Orthogonal Regression* (GOR) berkinerja lebih baik daripada metode standar

regresi linear, tetapi untuk metode regresi tetap digunakan untuk data heterogen seperti M_s dan m_b . Adapun rumus yang digunakan untuk mengubah magnitudo gelombang badan dan gelombang permukaan ke magnitudo momen sebagai berikut :

1) Konversi magnitudo gelombang permukaan ke magnitudo momen

Model GOR (*Generalized Orthogonal Regression*) dirumuskan sebagai berikut (Giacomo, et al., 2014) :

$$M_w = 0.67 \times M_s + 2.13 \quad (2.1)$$

Untuk, $M_s \leq 6.47$, $n = 15723$

$$M_w = 1.10 \times M_s - 0.67 \quad (2.2)$$

Untuk, $M_s > 6.1$ dan, $n = 15723$

Model Regresi bi-linear dirumuskan sebagai berikut (Scordilis, 2006) :

$$M_w = 0.67 (\pm 0.005) M_s + 2.07 (\pm 0.03) \quad (2.3)$$

Untuk, $3.0 \leq M_s \leq 6.1$, $n = 23.921$

2) Skala magnitudo gelombang badan

Model GOR (*Generalized Orthogonal Regression*) dirumuskan sebagai berikut (Giacomo, et al., 2014) :

$$M_w = 1.38 \times M_b - 1.79 \quad (2.4)$$

Untuk, $n = 27.634$

Model Regresi bi-linear dirumuskan sebagai berikut (Scordilis, 2006) :

$$M_w = 0.87 (\pm 0.04) M_b + 1.03 (\pm 0.03) \quad (2.5)$$

Dengan, $3.5 \leq M_s \leq 6.2$, $n = 39.784$

II.3 *Seismicity Declustering*

Deklastering seismisitas merupakan sebuah proses pemisahan katalog gempa utama (*mainshock*) terhadap gempa awal (*foreshock*) dan gempa susulan (*aftershock*). Metode ini banyak digunakan dalam seismologi khususnya untuk penilaian bahaya seismik dan dalam model prediksi gempa. Algoritma deklastering yang telah diusulkan selama bertahun-tahun hingga masih digunakan sampai sekarang, salah satu metode yang digunakan adalah Reasenberg (1985). Secara umum, para ilmuwan memahami seismisitas terdiri dari dua bagian yaitu (Stiphout et al., 2012).

- 1) Gempa bumi yang *independent* atau gempa bumi yang berdiri sendiri atau bisa dikatakan sebagai gempa bumi utama yang tidak bergantung pada kejadian sebelumnya dan dapat diasumsikan sebagian besar disebabkan oleh beban sekuler, tektonik atau dalam kasus *swarms* yang tidak disebabkan oleh gempa bumi sebelumnya.
- 2) Gempa bumi yang *dependent* atau gempa bumi yang bergantung satu sama lain seperti *aftershocks* atau *foreshocks*. Gempa bumi ini dipicu oleh perubahan tegangan statis atau dinamis, aliran fluida yang diaktifkan secara seismik, *after-slip*, dan lain-lain. Sehingga pada proses mekanis yang sebagian dikendalikan oleh gempa sebelumnya.

Proses pemisahan gempa bumi dari dua kelas tersebut dikenal sebagai seismisitas deklastering. Tujuan akhir dari deklastering gempa adalah untuk memisahkan kelas gempa utama atau *independent* yang tidak bergantung pada semua gempa bumi sebelumnya, dengan kata lain memisahkan gempa bumi

dependent. Gempa bumi *swarm* biasanya disebabkan oleh magma atau instruksi cairan yang dikelompokkan dalam kasus khusus. Proses deklastering dimulai dari parameter kegempaan seperti waktu kejadian (*origin time*), lokasi hiposenter dan magnitudo. Tujuan dari seismisitas deklastering adalah untuk memisahkan gempa bumi dalam katalog kegempaan menjadi gempa independen dan dependen. Oleh karena itu, untuk menghubungkan gempa susulan dengan gempa utama diperlukan penentuan ukuran jarak ruang-waktu antara keduanya.

Algoritma Reasenberg (1985) merupakan metode pengelompokkan data dengan karakter yang sama. Saat mendefinisikan sebuah klaster, hanya gempa bumi terbesar yang akhirnya disimpan sebagai *mainshock* klaster, pada metode ini adalah bahwa jarak ruang-waktu didasarkan pada Hukum Omori. Reasenberg (1985) memperkenalkan metode untuk mengidentifikasi gempa susulan dengan menghubungkan gempa bumi yang diklaster menurut zona interaksi spasial dan temporal. Metode ini didasarkan pada peneliti sebelumnya yaitu Savage (1972), yang mengidentifikasikan kelompok gempa bumi di Nevada dengan mengaitkan *event* gempa yang dipisahkan dalam ruang dan waktu dalam kurang dari batas 10 menit dan beberapa ratus meter. Metode ini memiliki keunggulan yaitu tidak ada *windowing* atau jendela dalam bentuk klaster sehingga dapat digunakan dalam kasus umum. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Reasenberg (1985) yang mengidentifikasikan populasi atau kumpulan gempa susulan dengan memodelkan zona interaksi setiap gempa bumi dalam katalog gempa bumi, yang mengasumsikan bahwa setiap gempa bumi yang terjadi dalam zona interaksi gempa sebelumnya merupakan gempa susulan sehingga dikelompokkan menjadi

sebuah kluster. Ketika gempa bumi utama (belum dikelompokkan dalam sebuah kluster) tersebut kemudian dikelompokkan dalam sebuah kluster sebelumnya, sehingga menjadi bagian dari kluster yang ada. Ketika dua *events* berada pada kluster yang berbeda kemudian dikelompokkan maka masing-masing kluster didefinisikan ulang menjadi satu kluster.

Fokus penelitian asli dari Reasenber (1985) adalah deteksi *foreshock* dan *aftershock* di California tengah antara tahun 1969 dan 1982 untuk kejadian dengan $M \leq 4$. Sejak kemudian, algoritma ini telah menjadi salah satu yang sangat populer di kalangan komunitas seismologi.

Tabel 2. 1 Input parameter untuk declustering algoritma (Reasenber, 1985)

Parameter	Standar
τ_{\min} (days)	1
τ_{\max} (days)	10
P_1	0.95
χ^k	0.5
χ_{meff}	1.5
τ_{fact}	10

Zona interaksi dimodelkan secara dinamis yaitu satu spasial dan satu temporal. Pada tingkat spasial zona interaksi didasarkan pada perkiraan redistribusi tegangan di sekitar pada setiap gempa bumi. Luas spasial dari zona interaksi dipilih menurut distribusi tegangan di dekat gempa utama dan menggabungkan *after-slip*. Sedangkan tingkat temporal pada zona interaksi ditentukan dengan model probabilistik. Untuk gempa bumi sebelumnya terkait dengan urutan gempa susulan perlu untuk mengetahui berapa lama interval waktu τ setelah gempa bumi, ini harus dipertimbangkan agar cukup yakin untuk mengamati peristiwa berikutnya.

Pada eksponen peluruhan laju menjadi 1 dan $M = M_{\text{mainshock}} - \chi_{\text{meff}}$, dengan P adalah probabilitas menaksirkan peristiwa klaster berikutnya yang digunakan untuk menghitung τ , τ_{min} adalah nilai minimum *look-ahead time* untuk membuat klaster saat gempa bumi pertama belum diklasterkan, τ_{max} adalah nilai maksimum *look-ahead time* untuk membuat klaster, xk adalah peningkatan besarnya *cutt-off* yang lebih rendah selama klasteringnya, χ_{meff} menunjukkan batas magnitudo minimum untuk katalog gempa, untuk parameter τ_{fact} menunjukkan jumlah jari-jari retak yang mengelilingi setiap kejadian gempa yang dianggap sebagai klaster baru. Dapat disimpulkan bahwa perilaku algoritma klaster pada dasarnya mencerminkan pola seismisitas ruang-waktu dalam katalog dan tidak sensitif terhadap pilihan parameter zona interaksi. Semua peristiwa yang terkait mendefinisikan sebuah klaster, dimana gempa terbesar dianggap sebagai gempa utama dan gempa yang kecil dibagi menjadi *aftershock* dan *foreshock* (Reasenber, 1985).

II.4 Hukum Gutenberg-Richter

Berdasarkan hubungan frekuensi – magnitudo pada Hukum Gutenberg – Richter yaitu dinyatakan dengan persamaan :

$$\log N = a - bM \quad (2.6)$$

Jumlah gempa bumi (N) yang besarnya sama atau lebih besar dari M , dapat juga ditulis sebagai :

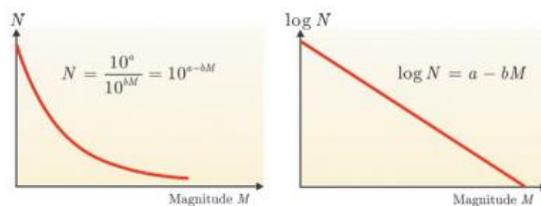
$$N = \frac{10^a}{10^{bM}} \quad (2.7)$$

Parameter nilai-a merupakan ukuran tingkat kegempaan dan parameter nilai-b menggambarkan perbandingan jumlah relatif dari getaran kecil dan besar atau nilai-b merupakan parameter tektonik. Relasi pada Hukum Gutenberg - Richter sangat penting dalam studi seismik karena dapat digunakan untuk menggambarkan seismisitas tektonik dan induksi, dapat digunakan dalam skala waktu yang berbeda dan berlaku untuk interval besaran magnitudo gempa.

Kedua parameter tersebut telah digunakan dalam berbagai studi seismologi, terutama dalam simulasi seismisitas, prediksi gempa, penilaian bahaya dan risiko seismik. Berdasarkan catatan pendek yang ditulis oleh Kijko dan Smit (2021), mengatakan bahwa Aki (1965) menurunkan estimasi kemungkinan maksimum dari nilai-b yang setara dengan :

$$\beta = \frac{1}{\bar{M} - M_{min}} \quad (2.8)$$

dengan $\beta = b \ln(10)$. Parameter \bar{m} dan m_{min} adalah magitudo rata-rata dan magnitudo minimum. Dalam catatan pendek tersebut juga menjelaskan cara Utsu (1965) adalah orang pertama yang menurunkan persamaan ini dengan memanfaatkan metode momen; yaitu dengan membandingkan momen populasi pertama dengan momen sampel ekuivalen. Berdasarkan persamaan di atas disebut sebagai penafsiran Aki-Utsu dari nilai-b (Kijko & Smit, 2012).



Gambar II. 4 Dua representasi berbeda dari hukum Gutenberg-Richter yang menggambarkan hubungan logaritma frekuensi kejadian gempa bumi dan magnitudo (Zalohar, 2018).

Gambar II.4 menggambarkan hubungan logaritma frekuensi kejadian gempa bumi dan magnitudo. Parameter seismisitas atau biasa disebut sebagai nilai-a merupakan parameter seismik yang nilainya bergantung pada jumlah kejadian gempa bumi atau bergantung pada banyaknya *event* gempa bumi yang berada pada batasan penelitian. Nilai seismisitas tersebut dapat menunjukkan karakteristik suatu data dengan tingkat seismisitas suatu daerah atau dapat menggambarkan aktivitas seismik pada suatu daerah dalam kurung waktu tertentu. Nilai-a adalah suatu tetapan yang besarnya bergantung pada periode, luas daerah dan aktivitas daerah pengamatan. Nilai-a dapat divariasikan secara spasial, dimana wilayah dengan nilai-a yang tinggi menunjukkan bahwa wilayah tersebut memiliki aktivitas seismik yang tinggi atau sering terjadi gempa bumi, sedangkan wilayah dengan nilai-a yang rendah menunjukkan bahwa wilayah tersebut memiliki aktivitas seismik yang rendah. Rendahnya aktivitas seismik pada suatu wilayah yang berada pada zona aktif gempa bumi, dikarenakan daerah tersebut terjadi akumulasi energi (Arimuko et al., 2018).

Parameter tektonik atau nilai-b dapat menunjukkan *stress* lokal sehingga dapat menjadi parameter kegempaan yang diperoleh dari hubungan antara frekuensi relatif dan jumlah kejadian gempa besar dan gempa kecil dari suatu wilayah. Nilai-b digunakan untuk mengetahui perubahan fenomena fisis yang diamati sebelum terjadinya gempa bumi. Fenomena fisis tersebut yang dapat diamati adalah akumulasi tegangan yang kemudian akan dilepaskan pada saat terjadi gempa bumi.

Variasi spasial pada nilai- b dapat menunjukkan lokasi yang memiliki potensi terjadi gempa signifikan di setiap wilayah penelitian, nilai- b yang rendah berkorelasi dengan *stress* yang tinggi dan nilai- b yang tinggi berkorelasi dengan *stress* yang rendah. Wilayah dengan nilai- b yang tinggi memiliki tingkat kerapuhan yang tinggi sehingga *stress* yang disimpan akan lebih mudah dilepaskan dalam bentuk gelombang seismik (Arimuko et al., 2018).

II.5 *Maximum Likelihood*

Metode *Maximum likelihood* merupakan metode yang digunakan untuk menentukan hubungan antara frekuensi dan magnitudo gempa. Metode ini mempunyai keunggulan untuk menghitung secara statistik nilai parameter keaktifan gempa bumi karena dapat menghindari kekosongan magnitudo pada interval tertentu. Analisis statistik dengan model ini memberikan hasil yang lebih stabil karena memodelkan kemiringan garis. Metode yang digunakan dalam menentukan parameter aktivitas gempa adalah metode *Maximum likelihood* yang dikembangkan oleh Gutenberg - Richter, kerentanan batuan di suatu wilayah ditentukan oleh besarnya nilai- b di suatu wilayah. Nilai- b diperoleh dari persamaan magnitudo dan frekuensi gempa yang dirumuskan oleh Gutenberg-Richter:

$$b = \frac{\log e}{\overline{M} - M_0} \quad (2.9)$$

Berkesesuaian dengan nilai- a yang diperhitungkan dari hubungan frekuensi kumulatif untuk $M \geq M_0$ adalah :

$$a = \log N (M \geq M_0) + \log(b \ln 10) + M_0 b \quad (2.10)$$

dengan \bar{M} adalah magnitudo rata-rata, M_{min} adalah magnitudo terkecil dari sampel data dan N adalah jumlah dari sampel data. Nilai-b tidak bervariasi secara sistematis (konstan), nilai-b bervariasi secara signifikan di beberapa zona sesar dan nilai-b juga bervariasi lateral sampai kedalaman. Nilai-b dapat menunjukkan tingkat getas batuan. Semakin besar nilai-b berarti semakin besar tingkat getas batuan dan semakin kecil ketahanannya terhadap tenggangan dan semakin besar nilai-a berarti semakin besar tingkat kegempaan di daerah tersebut (Simangunsong et al., 2019; Arimuko et al., 2018).

II.6 *Least Square*

Metode *Least Square* (Regresi Linear) merupakan salah satu cara untuk menghitung nilai-a dan nilai-b dari hubungan magnitudo dan frekuensi gempa, dengan mengumpulkan pengamatan jumlah gempa untuk masing-masing selang magnitudo didalam untuk magnitudo urutan tertentu. Metode ini disebut sebagai suatu analisis statistik untuk mengetahui seberapa jauh hubungan antara variabel terikat dan variabel bebas yang memanfaatkan hubungan antara dua variabel atau lebih yang memiliki tingkat eror yang kecil. Persamaan regresi linear sederhana secara matematik diekspresikan persamaan:

$$Y = a + bX \quad (2.11)$$

Besarnya konstanta a dan b dapat ditentukan menggunakan persamaan :

$$a = \frac{(\sum Y) - (b \sum X)}{n} \quad (2.12)$$

$$b = \frac{n(\sum X.Y) - (\sum X).(\sum XY)}{(n \sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (2.13)$$

dengan n merupakan banyaknya kelas magnitudo, X adalah titik tengah dari kelas magnitudo, Y adalah logaritma dari frekuensi gempa untuk kelas magnitudo tertentu. Untuk mendapatkan seberapa besar pengaruh frekuensi kejadian gempa terhadap magnitudo, dapat menggunakan koefisien korelasi dengan persamaan berikut :

$$r = \frac{n(\sum X.Y) - (\sum X).(\sum Y)}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2). (n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (2.14)$$

dengan nilai r yang negatif dan mendekati -1 mengidentifikasikan bahwa terdapat hubungan linear antara magnitudo dengan logaritma frekuensi kejadian gempa (Arimuko et al., 2018; Dwiyantri et al., 2020).

II.7 Interpolasi

Interpolasi spasial memiliki atribut data yang bersifat kontinu di dalam ruang dan saling berhubungan secara spasial, dalam interpolasi spasial memiliki nilai titik observasi yang berdekatan tersebut akan memiliki nilai yang sama atau mendekati dibandingkan dengan titik yang lebih jauh. Interpolasi spasial memperkirakan nilai sebuah variabel lapangan yang tidak termasuk dalam sampel penelitian dan berlokasi di dalam area yang dicakup oleh lokasi sampel, hal ini bertujuan untuk menghasilkan nilai-nilai pada bagian yang tidak disampel. Untuk tipe interpolasi yang mengasumsikan bahwa nilai di antara titik kontrol yang diketahui nilainya adalah kontinu seperti Metode *Kriging*.

Kriging merupakan langkah-langkah geostatistik yang dapat membuat estimasi bentuk permukaan dari sebaran titik yang mempunyai nilai x , y , dan z dengan mempelajari karakter dari nilai z untuk menentukan metode estimasi

permukaan yang terbaik. Untuk metode *kriging* yang akan diprediksi bukan hanya jarak akan tetapi memperhatikan karakteristik dari kondisi keruangannya. Pada Metode *Kriging*, bobot tidak hanya didasarkan pada jarak atau terfokus pada jarak dari nilai observasi tetapi juga pada keseluruhan letak titik-titik yang diukur, dan menimbang nilai yang terukur di sekitarnya untuk memperoleh prediksi di lokasi yang tidak terukur. Kelebihan dari Metode *Kriging* yaitu kemampuannya memadukan korelasi spasial antara data.

Metode *Kriging* bergantung pada model matematika dan statistik. Metode *Kriging* mengandalkan gagasan autokorelasi, dengan autokorelasi adalah fungsi jarak. Untuk data geostatistik, rumus matematika sederhana sebagai berikut:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (2.15)$$

dengan, $Z(s)$ adalah variabel yang diinginkan, diurai menjadi sebuah tren deterministik $\mu(s)$ dan bentuk *error* autokorelasi $\varepsilon(s)$. Simbol s hanya menunjukkan lokasi yang dianggap mengandung koordinat spasial x (bujur) dan y (lintang).

II.8 Indeks Seismisitas dan Periode Ulang Gempa

Indeks seismisitas adalah parameter fisis yang menggambarkan jumlah total kejadian gempa bumi yang berlangsung dalam periode satu tahun dengan magnitudo besar dari megnitudo kecil, atau bisa disebut sebagai jumlah frekuensi kumulatif gempa bumi pertahun magnitudo. Indeks Seismisitas dengan $N_1 (M)$ menggambarkan total kejadian total kejadian gempa tahunan. Harga indeks seismisitas dapat dijabarkan dalam rumus sebagai berikut :

$$N_1(M) = 10^{a'_1 - bM} \quad (2.16)$$

dengan;

$$a'_1 = a' - \log T \text{ dan } a' = a - \log(b \ln 10)$$

dengan,

$N_1(M)$ = indeks seismisitas

a, a', a'_1 = parameter-parameter untuk mendapatkan harga indeks seismisitas

T = waktu (lama pengamatan dalam satuan tahun)

Periode ulang gempa bumi digunakan untuk menentukan terjadinya kembali gempa bumi dengan magnitudo tertentu di suatu wilayah. Periode ulang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\theta = \frac{1}{N(M \geq M_0)} \quad (2.17)$$

dengan,

θ = periode ulang gempa bumi

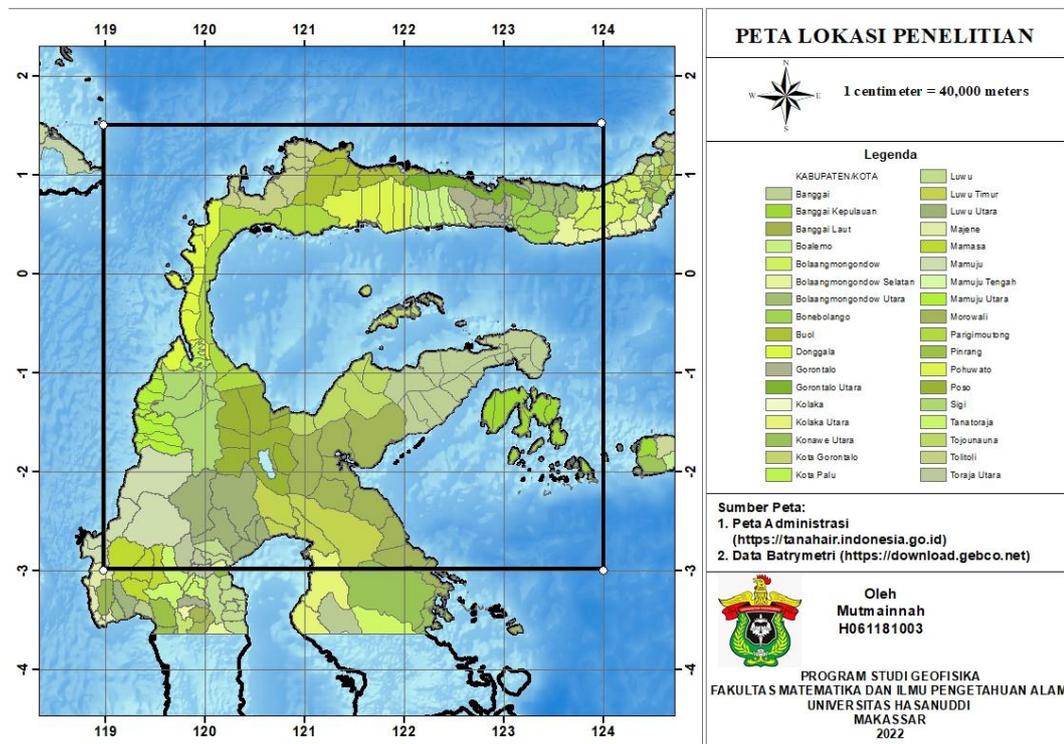
$N(M \geq M_0)$ = Rata-rata jumlah komulatif gempa bumi

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Sulawesi Tengah dan daerah di sekitarnya pada koordinat $3^{\circ} 30' \text{ LS} - 1^{\circ} 50' \text{ LU}$ dan $119^{\circ} 0' \text{ BT} - 123^{\circ} 20' \text{ BT}$ berdasarkan Gambar III.1. Pengolahan data dilakukan di Kantor BMKG Stasiun Geofisika Kelas 1 Palu, Sulawesi Tengah. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang berupa waktu terjadinya gempa (*origin time*) dan hiposenter atau pusat terjadinya gempa dan magnitudo.



Gambar III. 1 Peta Lokasi Penelitian