

**SKRIPSI GEOFISIKA**

**ANALISIS NILAI TEGASAN COULOMB SESAR POSO AKIBAT  
GEMPA BESAR DI SULAWESI (STUDI KASUS GEMPA 2017 POSO Mw  
6.7 DAN GEMPA 2018 PALU-DONGGALA Mw 7.5)**

Disusun dan diajukan oleh:

**TSAQIF RAZIN  
H061 17 1312**



**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**HALAMAN JUDUL**

**ANALISIS NILAI TEGASAN COULOMB SESAR POSO AKIBAT GEMPA  
BESARDI SULAWESI (STUDI KASUS GEMPA 2017 POSO Mw 6.7 DAN  
GEMPA 2018  
PALU-DONGGALA Mw 7.5)**

**SKRIPSI**

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

**OLEH:**

**TSAQIF RAZIN  
H061171312**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

HALAMAN PENGESAHAN

Penentuan Nilai Coulomb Stress Sesar Poso Akibat Gempa Besar di Sulawesi (Studi Kasus Gempa 2018 Palu-Donggala Mw 7.5 dan Gempa 2017 Poso Mw 6.7)

Disusun dan diajukan oleh:

TSAQIF RAZIN

H061 17 1312

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

Pada tanggal, 28 Maret 2023

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama

Dr. Ir. Muh Altin Massinai, MT, Surv. IPM

NIP. 196406161989031006

Dr. Muhammad Taufiq Rafie, S.Si., MT.

NIP. 199502072022115001

Ketua Departemen

Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng

NIP. 196709291993031003

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Tsaqif Razin  
NIM : H061171312  
Program Studi : Geofisika  
Jenjang : SI

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**Penentuan Nilai Coulomb Stress Sesar Poso Akibat Gempa Besar di Sulawesi  
(Studi Kasus Gempa 2018 Palu-Donggala Mw 7.5 dan Gempa 2017 Poso Mw  
6.7)**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa 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, 02 Mei 2023

Yang menyatakan,

  
Tsaqif Razin

## ABSTRAK

Gempa 2017 Mw. 6.7 Poso dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu – Donggala merupakan gempa besar terkini ( $M_w \geq 6.5$ ) yang terjadi di Sulawesi Tengah. Gempa ini secara langsung mendistribusikan tegasan pada sesar - sesar sekitarnya. Hal ini menjadi sangat penting untuk dikaji mengingat distribusi tegasan akibat gempa besar akan mempengaruhi akumulasi tegasan suatu sesar. Sesar Poso merupakan salah satu sesar yang berada di *Central Sulawesi Fault System* (CSFS). Penting untuk dilakukan kajian mengenai kondisi tegasan pada sesar ini mengingat lokasinya yang dekat dengan gempa 2017 Poso Mw 6.7 sehingga sesar ini dapat menimbulkan ancaman yang signifikan terhadap penduduk di sekitar sesar (Kota Poso). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisa distribusi tegasan yang diakibatkan gempa 2017 Mw. 6.7 Poso dan gempa 2018 Mw. 7.5 Palu – Donggala menggunakan fungsi tegasan *Coulomb failure* ( $\Delta CFS$ ) dengan data model *slip* dari penelitian sebelumnya. Perhitungan  $\Delta CFS$  dilakukan menggunakan pendekatan *specified orientation* dengan parameter *multi-strike* sebanyak 20 segmen pada sesar Poso. Untuk membuat model tegasan menjadi lebih kompleks, dilakukan pula estimasi laju peningkatan tegasan tektonik di sesar Poso menggunakan data geodesi berupa GSRM (*Global Strain Rate Model*).

Hasil perhitungan  $\Delta CFS$  gempa dengan menggunakan parameter *dip* dan  $\mu'$  yang berbeda tidak menunjukkan perubahan pola yang cukup signifikan, sehingga perhitungan  $\Delta CFS$  tidak sensitif terhadap variasi *dip* dan  $\mu'$ . Hasil perhitungan  $\Delta CFS$  gempa 2017 Mw. 6.7 Poso bervariasi dengan nilai positif 7 kPa hingga 27 kPa pada segmen bagian tengah sesar Poso, nilai negatif -4 kPa hingga -10 kPa pada segmen dibagian utara sesar, dan nilai yang kurang signifikan pada segmen bagian selatan. Selanjutnya, gempa 2018 Mw. 7.5 Palu – Donggala memberikan  $\Delta CFS$  negatif sebesar -16 hingga -27 kPa pada segmen bagian utara sesar serta kurang signifikan pada segmen bagian selatan sesar Poso. Pengaruh  $\Delta CFS$  yang diakibatkan oleh kedua gempa di segmen bagian utara sesar Poso menunjukkan bahwa gempa tersebut memperlambat segmen bagian utara sesar Poso untuk mencapai titik kritisnya. Terlebih lagi, hasil kumulatif dari kedua gempa tersebut menjelaskan bahwa pengaruh  $\Delta CFS$  gempa 2018 Mw 7.5 Palu – Donggala lebih besar dibanding  $\Delta CFS$  gempa 2017 Mw 6.7 Poso. Selain itu, berdasarkan model fungsi waktu yang telah dibuat, perubahan akumulasi tegasan akibat  $\Delta CFS$  gempa 2017 Mw 6.7 Poso dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu – Donggala yang cukup besar ( $\Delta CFS$  negatif  $> \sim -10$  kPa) pada segmen di bagian utara sesar menjelaskan bahwa pengaruh  $\Delta CFS$  akibat gempa besar lebih dominan pada segmen tersebut. Namun, pengaruh  $\Delta CFS$  akibat gempa besar kurang signifikan ( $\Delta CFS \approx -2$  kPa) terhadap akumulasi tegasan pada segmen bagian selatan sesar Poso, di mana hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh laju tegasan tektonik lebih dominan di segmen bagian selatan sesar Poso.

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh  $\Delta CFS$  yang dihasilkan oleh gempa

2018 Mw 7.5 Palu – Donggala di sesar Poso lebih dominan dibanding gempa 2017 Mw 6.7 Poso dengan perbedaan hingga 4 kali lebih besar. Sementara itu, berdasarkan model fungsi waktu  $\Delta CFS$  yang dihasilkan, akumulasi tegasan tertinggi terdapat pada segmen bagian selatan sesar Poso ( $> \sim 45$  kPa). Sesuai dengan hasil penelitian ini, diperlukan evaluasi lebih lanjut mengenai segmen bagian mana yang telah mendekati titik kritisnya.

**Kata kunci:** Tegasan *Coulomb failure*, Sesar Poso, Gempa besar darat, Akumulasi tegasan

## ABSTRACT

*The 2017 Mw 6.7 Poso earthquake and the 2018 Mw 7.5 Palu-Donggala earthquake are the recent major earthquakes ( $M_w \geq 6.5$ ) that occurred in Central Sulawesi. These earthquakes distributed their stress on the surrounding faults. Stress distribution imparted by large earthquakes becomes crucial because it could influence to the stress condition on a fault. Poso fault is located in the Central Sulawesi Fault System (CSFS). It is essential to assess the stress conditions on this fault due to its proximity to the 2017 Mw 6.7 Poso earthquake, which can pose significant threat to the community around the fault (Poso City). Therefore, this research focuses on analysing the stress distribution caused by the 2017 Mw. 6.7 Poso earthquake and the 2018 Mw. 7.5 Palu-Donggala earthquake. The stress changes were calculated based on Coulomb failure criterion ( $\Delta CFS$ ) using slip data from previous studies. The  $\Delta CFS$ s were generated by applying the specified orientation approach with 20 multi-strike parameters on the Poso fault. To obtain a detail stress change time function, the estimation of the tectonic stress rate on the Poso fault was also estimated from geodetic data of GSRM (Global Strain Rate Model).*

*The results of  $\Delta CFS$  calculation applied for different dip and  $\mu'$  parameters showing no significant changes in pattern, indicating that the  $\Delta CFS$  calculation is insensitive to the variations in dip and  $\mu'$ . The calculation of  $\Delta CFS$  of the 2017 Mw 6.7 Poso earthquake varies from positive values of 7 kPa to 27 kPa in the central segment of the Poso fault, negative values of -4 kPa to -10 kPa in the northern segment, and less significant values in the southern segment of the fault. The  $\Delta CFS$  of the 2018 Mw 7.5 Palu – Donggala earthquake imparted on Poso fault shows a negative  $\Delta CFS$  of -16 to -27 kPa in the northern segment of the Poso fault and less significant values in the southern segment. The  $\Delta CFS$  distribution caused by both earthquakes on the northern segment of the Poso fault implies that the earthquakes have lengthened the northern segment from reaching its critical point. Moreover, the cumulative results of both earthquakes inferred that the effect of the 2018 Mw 7.5 Palu – Donggala earthquake is greater than the 2017 Mw 6.7 Poso earthquake. In addition, based on the stress change time function model, the change of accumulated stress caused by the  $\Delta CFS$  of the two earthquakes is significantly higher in the northern segments ( $\Delta CFS > \sim -10$  kPa) of the fault, this explains that the effect of those two large earthquakes is dominant in those segments. However, the effect of the  $\Delta CFS$  large earthquakes is less significant in the southern segments ( $\Delta CFS \approx -2$  kPa) of the faults, this indicates that the influence of the tectonic strain rate is more dominant in those segments.*

*This study describes that the  $\Delta CFS$  distribution of the 2018 Mw 7.5 Palu – Donggala earthquake imparted on Poso fault is greater than the 2017 Mw 6.7 Poso earthquake, with a difference of up to 4 times larger. Based on the stress change time function model, the highest stress accumulation occurs in the southern segment of the Poso fault ( $> \sim 45$  kPa). From this study, it is important to evaluate more on*

*this fault to determine which segments of the fault have advanced to failure.*

*Keywords:  $\Delta CFS$ , Poso fault, Large earthquake, Stress accumulation*

## KATA PENGANTAR



*Assalamualaikum Warohmatullahi Wabarokatuh*

Alhamdulillahirobbil ‘alamin, segala puji bagi Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada baginda besar Nabi Allah, Muhammad SAW, beserta keluarganya, para sahabat, serta para pengikutnya yang senantiasa istiqomah menjalankan sunnahnya.

Skripsi dengan judul **ANALISIS NILAI TEGASAN COULOMB SESAR POSO AKIBAT GEMPA BESAR DI SULAWESI (STUDI KASUS GEMPA 2017 POSO Mw 6.7 DAN GEMPA 2018 PALU-DONGGALA Mw 7.5)** merupakan hasil penelitian Tugas Akhir penulis sebagai syarat untuk bisa mendapatkan gelar Sarjana Sains di Departemen Geofisika Universitas Hasanuddin.

Perjalanan penulis penyelesaian tugas akhir ini tidak terlepas dari berbagai hambatan dan keterbatasan, akan tetapi berkat bantuan juga dukungan dari berbagai pihak penulis dapat menyelesaikannya penyusunan tugas akhir ini. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Ayahanda tercinta, **Bapak Drs Taslim** dan Mama tersayang, **Zimmy Rafda**, terima kasih telah menjadi orang yang berada pada posisi terdepan dalam memberikan dukungan, doa serta berbagai pengorbanan untuk penulis. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada keluarga besar penulis serta kerabat atas

segala bentuk dukungan tulus menjadi ungkapan terindah yang penulis dapat sampaikan. Pada kesempatan ini pula izinkan penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada yang terhormat:

1. **Bapak Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT, Surv. IPM** selaku pembimbing utama dan **Dr. Muhammad Taufiq Rafie, S.Si., MT.**, selaku pembimbing pertama yang selalu meluangkan waktunya dan memberi perhatian, bimbingan, nasihat, motivasi serta masukan-masukan yang memberi semangat penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. **Bapak Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T.** dan **Bapak Andi Muhamad Pramadi, ST., M.Eng., Ph.D.**, selaku tim penguji yang telah memberikan saran, kritik, koreksi dan masukan dalam penyelesaian skripsi juga selama penulis menempuh studi.
3. **Bapak Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku ketua Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan **Bapak Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku Sekretaris Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin .
4. Dosen-dosen pengajar terkhusus **Dosen-dosen Departemen Geofisika** yang telah memberikan banyak pengajaran dan bimbingan selama saya menempuh pendidikan serta staf pegawai yang telah banyak membantu.
5. **Khusnul Khatimah**, yang selalu memberi dukungan, perhatian, dan motivasi kepada penulis, terima kasih untuk selalu ada dan menjadi

partner terbaik yang selalu bisa diandalkan dalam segala kondisi dan situasi.

6. **Ale, Angga, Gabe, Dandung, Madan, Khalis, Sabran, Puad, Fajar, Aldo, Indah, Ardy, Agung, Ate', Callu dan Zahary** yang selalu menyempatkan waktunya untuk membantu atau menyemangati penulis di masa – masa pengerjaan penelitian ini.
7. **Himafi 2017 dan HMGF 2017** yang bersama – sama penulis dalam susah dan senang selama perkuliahan.
8. Kanda dan Adinda **Himafi FMIPA Unhas dan HMGF FMIPA Unhas** yang telah memberikan kesempatan penulis untuk berproses dan mengenal arti kebersamaan hingga menjadi tempat untuk selalu belajar.

Serta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih telah membantu penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan. Mohon maaf jika terdapat kesalahan dan kekurangan yang penulis tidak sadari. Saran dan kritik akan sangat membantu penulis untuk terus belajar di masa depan, akhir kata semoga Tugas Akhir ini dapat mencapai tujuannya dan bermanfaat baik bagi penulis juga pembaca umumnya.

*Billahi Taufiq Wal Hidayat*

*Waassalamu 'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Makassar, 22 Maret 2023

Tsaqif Razin

## DAFTAR ISI

SAMPUL .....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN .....	iv
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG .....	xviii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	4
I.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
I.4 Tujuan Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
II.1 Tatanan Tektonik Sulawesi.....	6
II.2 Gempa Besar Terkini Sulawesi Tengah .....	8
II.2.1 Gempa 2017 Poso Mw 6.7 .....	8
II.2.2 Gempa 2018 Palu – Donggala Mw 7.5 .....	11
II.3 Sesar Poso.....	14
II.4 Tegasan <i>Coulomb</i> Failure (CFS) .....	14
II.4.1 Tegasan Coulomb Failure (CFS) dengan Specified Orientation ..	15
II.4.2 Tegasan Coulomb failure dengan Optimally Oriented Fault .....	16
II.5 Pemodelan Segmented Receiver Fault .....	17
II.6 Sumber Gempabumi .....	18
II.7 Hubungan konstitutif regangan – tegasan .....	20
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
III.1 Data dan Perangkat Penelitian .....	21
III.1.1 Data Penelitian .....	21
III.1.2 Perangkat Penelitian .....	23
III.2 Tahapan Penelitian .....	23
III.2.1 Studi Literatur.....	23
III.2.2 Segmentasi.....	24
III.2.3 Pemodelan CFS .....	24
III.2.4 Model Fungsi Waktu perubahan tegasan Coulomb Failure Sesar Poso 27	
III.2.5 Analisis .....	27
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>30</b>
IV.1 Hasil .....	30
IV.1.1 Perubahan Tegasan Coulomb Failure ( $\Delta$ CFS) Statik.....	30

IV.1.2 Estimasi Laju peningkatan tegasan tektonik.....	37
IV.2 Pembahasan.....	38
IV.2.1 Evaluasi $\Delta$ CFS gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan gempa 2018 Palu - Donggala Mw 7.5.....	38
IV.2.2 Model Fungsi Waktu $\Delta$ CFS Sesar Poso 2010 – 2030 .....	41
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	46
V.1 Kesimpulan .....	46
V.2 Saran.....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	49
<b>LAMPIRAN</b> .....	53

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Model Fungsi Waktu .....	54
-------------------------------------	----

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peta lokasi penelitian beserta mekanisme fokus gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu - Donggala. Bintang berwarna merah merupakan lokasi hiposenter gempa Poso dan Palu. Mekanisme fokus gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu - Donggala diperoleh melalui Global Centroid Moment Tensor (CMT) (Dziewonski dkk., 1981; Ekström dkk., 2012). Data seismisitas pulau Sulawesi diperoleh melalui International Seismological Center – Global Earthquake Model (ISC-GEM) (Storchak dkk, 2013; 2015; Di Giacomo dkk, 2018) .....	3
Gambar 2.1	Peta sesar - sesar yang ada di Pulau Sulawesi (modifikasi dari PuSGeN, 2017) .....	7
Gambar 2.2	Model <i>slip</i> gempa Poso 2017 (Wang dkk, 2019). Terdapat dua zona <i>asperity</i> pada gempa Poso 2017 yang mana zona ini merupakan daerah awal dari <i>slip</i> gempa Poso 2017 .....	10
Gambar 2.3	Model <i>slip</i> gempa Palu 2018 (USGS, 2018). Model <i>slip</i> gempa Palu 2018 memiliki geometri yang cukup panjang dari bagian tengah Sulawesi hingga utara Sulawesi.....	13
Gambar 2.4	(a) Perubahan tegasan Coulomb akibat pergerakan sesar geser mengangan. (b) perubahan tegasan Coulomb akibat pergerakan sesarsumber mengangan pada optimally oriented fault dengan tegasan regional berarah N7°E (tanda panah) dengan besar tegasan 100 bar.Koefisien $\mu'$ yaitu 0.4 (Rafie dkk,2023). .....	17
Gambar 2.5	Model 3 dimensi <i>finite source slip distribution</i> dari gempa Nima/Rogma (Li, 2020).....	18
Gambar 2.6	Ilustrasi <i>point source</i> dalam pemodelan sumber gempa. Titik berwarna merah menandakan lokasi terjadinya gempa atau <i>hypocenter</i> dan <i>epicenter</i> merupakan titik dipermukaan bumi yang berada tepat diatas <i>hypocenter</i> .....	19
Gambar 3.1	Poligon yang ditunjukkan dengan warna merah merupakan model <i>slip</i> gempa 2017 Poso yang direkonstruksi dari Wang dkk (2019) dengan nilai <i>slip</i> lebih dari 0.8 m. Kotak berwarna biru merupakan geometri model <i>slip</i> gempa 2018 Palu yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data dari USGS (2018). .....	21
Gambar 3.2	Hasil segmentasi pada Sesar Poso dengan menggunakan parameter nilai strike yang berbeda - beda, didapatkan sebanyak 20 segmen...24	24
Gambar 3.3	Geometri dari 4 <i>point source</i> yang berbeda (Okada, 1992). .....	26
Gambar 3.3	Bagan Alir .....	29
Gambar 4.1	Hasil perhitungan $\Delta$ CFS gempa 2017 Poso dengan parameter strike berbeda.....	31
Gambar 4.2	Hasil perhitungan $\Delta$ CFS gempa 2018 Palu dengan parameter <i>strike</i> berbeda.....	32
Gambar 4.3	Hasil pemodelan CFS gempa 2017 Poso Mw 6.7 (a) nilai dip 25 dan $\mu'$ 0.4, (b) nilai dip 25 dan $\mu'$ 0.1, (c) nilai dip 45 dan $\mu'$ 0.4, (d) nilai dip 45 dan $\mu'$ 0.1. Model slip gempa 2017 Mw 6.7 ditunjukkan oleh polygon berwarna merah. Segmen 1 pada bagian utara sesar Poso	

	hingga segmen 20 berada pada bagian selatan sesar Poso dengan masing – masing segmen dibagi menjadi beberapa grid yang menandakan nilai kedalaman pada segmen tersebut dengan spasi 5 km di tiap grid. ....	34
Gambar 4.4	Hasil pemodelan CFS gempa 2018 Palu - Donggala Mw 7.5 a) nilai dip 25 dan $\mu'$ 0.4, (b) nilai dip 25 dan $\mu'$ 0.1, (c) nilai dip 45 dan $\mu'$ 0.4, (d) nilai dip 45 dan $\mu'$ 0.1. Segmen 1 pada bagian utara sesar Poso hingga segmen 20 berada pada bagian selatan sesar Poso dengan masing – masing segmen dibagi menjadi beberapa grid yang menandakan nilai kedalaman pada segmen tersebut dengan spasi 5 km di tiap grid. ....	35
Gambar 4.5	Hasil pemodelan CFS gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu - Donggala a) nilai dip 25 dan $\mu'$ 0.4, (b) nilai dip 25 dan $\mu'$ 0.1, (c) nilai dip 45 dan $\mu'$ 0.4, (d) nilai dip 45 dan $\mu'$ 0.1. Model slip gempa 2017 Mw 6.7 ditunjukkan oleh polygon berwarna merah Segmen 1 pada bagian utara sesar Poso hingga segmen 20 berada pada bagian selatan sesar Poso dengan masing – masing segmen dibagi menjadi beberapa grid yang menandakan nilai kedalaman pada segmen tersebut dengan spasi 5 km di tiap grid. ....	36
Gambar 4.6	Hasil perhitungan <i>azimuth</i> komponen <i>strain</i> utama dan <i>stress</i> utama pada sesar Poso. Titik merah menandakan titik observasi. ....	38
Gambar 4.7	Nilai absolut model fungsi waktu perubahan tegasan <i>Coulomb failure</i> pada Sesar Poso dari tahun 2010 – 2030. Garis berwarna hijau menandakan $\Delta$ CFS yang diakibatkan oleh tegasan tektonik, garis berwarna merah menandakan $\Delta$ CFS yang diakibatkan oleh gempa 2017 Poso dan garis warna biru menandakan $\Delta$ CFS yang diakibatkan oleh gempa 2018 Palu. ....	43
Gambar 4.8	Ilustrasi pengaruh akumulasi tegasan di segmen – segmen sesar Poso berdasarkan model fungsi waktu. Segmen berwarna merah mengindikasikan $\Delta$ CFS akibat gempa yang lebih dominan. Sedangkan, segmen berwarna biru menandakan bahwa laju tegasan tektonik yang lebih dominan. ....	45

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1 Tabel geometri tiap segmen pada Sesar Poso .....	22
--	----

## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

Singkatan	Nama	Pemakaian Pertama pada Halaman
BNPB	Badan National Penanggulangan Bencana	2
CFS	<i>Coulomb Failure Stress</i>	13
CMT	<i>Centroid Moment Tensor</i>	7
CSFS	<i>Central Sulawesi Fault System</i>	1
GSF	<i>Great Sumatran Fault</i>	38
InSAR	<i>Interferometric Data Synthetic Aperture Radar</i>	9
MMI	<i>Modified Mercalli Intensity</i>	7
MTL	<i>Median Tectonic Line</i>	38
PSN	<i>Palukoro Sulawesi Neck</i>	11
PusGeN	Pusat Studi Gempa Nasional	3
USGS	<i>United States Geological Survey</i>	3

### LAMBANG

$C_f^L$	Tegasan Coulomb sesar geser mengiri	14
$C_f^R$	Tegasan Coulomb sesar geser menganan	14
$C_f$	<i>Coulomb Failure Function</i>	13
$u_i$	Medan <i>displacement</i>	23
$\Delta u_j$	Medan <i>dislocation</i>	23
$v_k$	Cosinus arah dari normal ke permukaan	23
$u^0$	Bidang perpindahan internal	23
$M_o$	<i>Moment tensor</i>	23
$\delta_{ij}$	Knocker Delta	24
$\sigma_{ij}$	Parameter Lamé	24
$\mu$	Rigiditas	24
$\theta$	Sudut yang dibentuk antara $\sigma_1$ dan bidang patahan	24
$\sigma_1$	<i>Principal stress</i> maksimum	17
$\sigma_2$	<i>Principal stress</i> intermediet	17
$\sigma_3$	<i>Principal stress</i> minimum	17
$\mu_x$	Komponen <i>displacement</i> pada sumbu x	21
$\mu_y$	Komponen <i>displacement</i> pada sumbu y	21
$\mu_z$	Komponen <i>displacement</i> pada sumbu z	21
$\sigma_\beta$	Tegasan Normal	13
$\tau_\beta$	Tegasan Geser	13
E	Modulus Young	16
p	Tegasan Pori	13

$\nu$	Poisson ratio	16
$\lambda$	Konstanta dari medium	21
$\mu$	Koefisien friksi	13
$\mu$	Konstanta dari medium	21
$\mu'$	Koefisien friksi efektif	13

## **BAB I PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Pulau Sulawesi memiliki tatanan tektonik kompleks yang dihasilkan dari konvergensi *triple-junction* antara Lempeng Filipina, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Sunda yang merupakan bagian tenggara dari Lempeng Eurasia. Proses konvergensi antara Lempeng Filipina dan Indo-Australia relatif terhadap Lempeng Sunda diakomodasi oleh subduksi dan rotasi blok dari Laut Maluku, Laut Banda, dan Lempeng Timor menghasilkan banyak patahan aktif yang ada di Pulau Sulawesi (Bellier dkk., 2006; Vigny dkk., 2002).

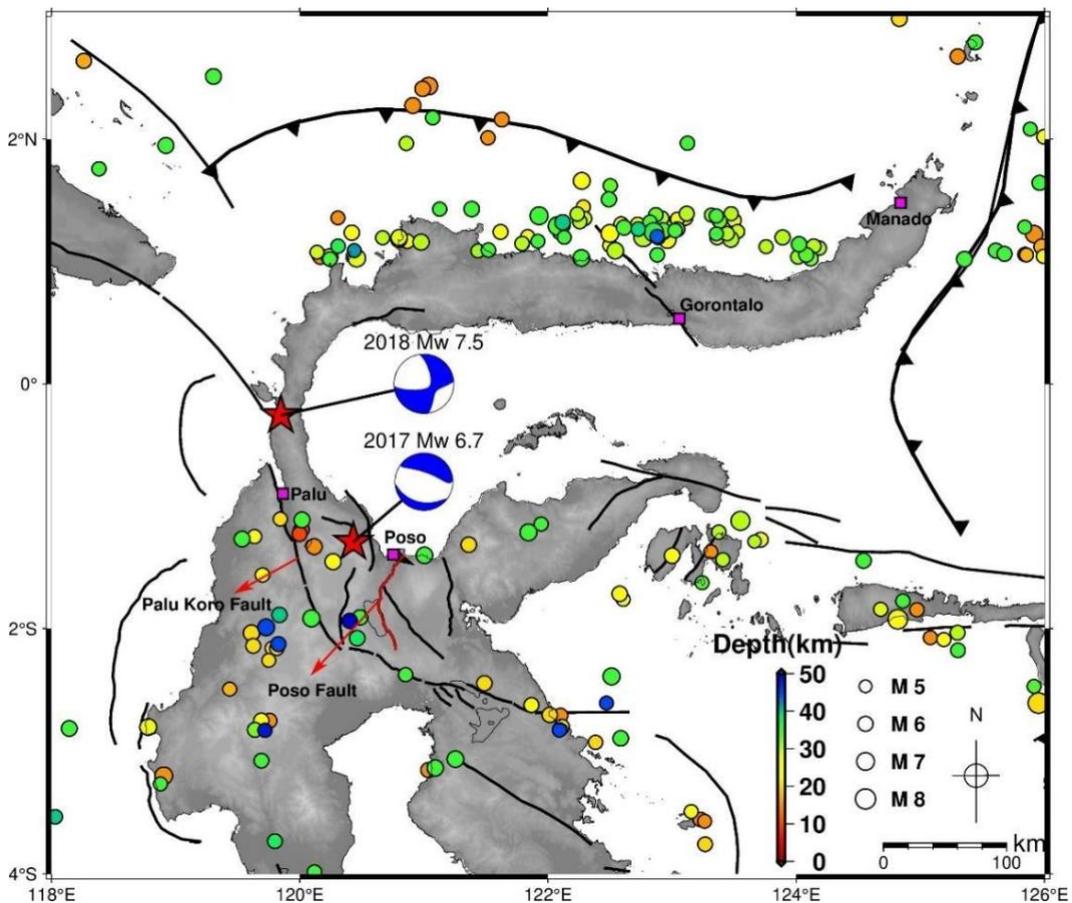
*Central Sulawesi Fault System* (CSFS) merupakan salah satu struktur utama yang menghubungkan zona subduksi pada bagian utara Sulawesi dengan zona deformasi Laut Banda. Seismisitas yang terekam baik pada jaringan seismik global dan lokal mengindikasikan bahwa aktifitas seismik pada CSFS didominasi pada kedalaman yang dangkal (Katili, 1970; Bellier dkk, 1998; Beaudouin dkk, 2003). Melalui studi kinematika lempeng, paleomagnetik, dan beberapa studi lainnya menyimpulkan aktifitas yang tinggi dengan nilai *slip rate* pada CSFS berkisar antara 30 – 50 mm/th (Katili, 1970; Bellier dkk, 1998; Beaudouin dkk, 2003; Silver dkk, 1983; Walpersdorf dkk, 1998a; Surmont dkk, 1994). Hal tersebut setidaknya mengakibatkan terjadinya dua gempa besar ( $M_w > 6.5$ ) di awal abad dua puluh satu yaitu gempa 2017  $M_w$  6.7 Poso dan gempa 2018  $M_w$  7.5 Palu - Donggala.

Gempa 2017  $M_w$  6.7 Poso terjadi pada tanggal 29 Mei 2017 dengan mekanisme patahan normal. Gempa ini terjadi pada Sesar Tokorondo di bagian timur Sulawesi Tengah. Gempa 2017  $M_w$  6.7 Poso merupakan gempa dengan mekanisme normal terbesar yang terjadi di Sulawesi Tengah yang pernah terekam. Hal tersebut mengisyaratkan jika terjadi akumulasi energi jangka panjang yang terjadi pada sesar tersebut (Daniarsyad dkk, 2021). Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) melaporkan sebanyak 211 bangunan yang rusak dan 549 keluarga harus diungsikan (BNPB, 2017).

Sementara itu gempa 2018 Palu-Donggala terjadi pada Sesar Palu-Koro dengan mekanisme patahan geser. Gempa ini dikategorikan sebagai gempa *supershear* dengan kecepatan *rupture* yang tinggi ( $\sim 4.1$  km/s)(Natawidjaja dkk, 2020). Gempa ini memicu terjadinya longsoran bawah laut sehingga terjadi tsunami. Bentuk teluk Palu dan pendangkalan pada garis pantai kemungkinan besar mengamplifikasi ukuran tsunami. BNPB melaporkan sebanyak 2200 korban jiwa, dan 68000 bangunan rusak.

Studi mengenai interaksi gempabumi mengalami kemajuan selama beberapa dekade terakhir. Gempabumi besar dapat memberikan tegasan pada sesar - sesar sekitarnya. Penelitian yang dilakukan di Turki (King and Deves, 2015) dan Sumatra (Rafie dkk, 2023; McClosey dkk, 2005; Cattin dkk, 2009; Qiu dan Chan, 2019) berhasil memprediksi gempabumi merusak. Perubahan tegasan *Coulomb* gempabumi sangat berperan penting terhadap akumulasi tegasan *Coulomb* patahan

sekitarnya. Selain itu, laju penambahan tegasan tektonik juga perlu diestimasi agar dapat mengetahui potensi gempa bumi merusak yang akan terjadi pada suatu patahan (Rafie dkk, 2023; King dan Deves, 2015; Hurukawa dkk., 2014).



Gambar 1.1 Peta lokasi penelitian beserta mekanisme fokus gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu - Donggala. Bintang berwarna merah merupakan lokasi hiposenter gempa Poso dan Palu. Mekanisme fokus gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu - Donggala diperoleh melalui Global Centroid Moment Tensor (CMT) (Dziewonski dkk., 1981; Ekström dkk., 2012). Data seismisitas pulau Sulawesi diperoleh melalui International Seismological Center – Global Earthquake Model (ISC-GEM) (Storchak dkk, 2013; 2015; Di Giacomo dkk, 2018)

Penelitian ini akan menganalisis akumulasi tegasan yang ada pada sesar Poso akibat pengaruh gempa 2017  $M_w$  6.7 Poso dan gempa 2018  $M_w$  7.5 Palu – Donggala serta laju tegasan tektonik di sesar Poso. Selain itu dilakukan pula proses

segmentasi pada Sesar Poso dalam pemodelan akumulasi tegasan dikarenakan geometri sesar yang melengkung agar dihasilkan model yang relatif lebih detail. Hasil akumulasi tegasan di sesar Poso pada penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai model awal dalam melakukan mitigasi bencana gempabumi pada wilayah sekitar Sesar Poso.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah berdasarkan latar belakang dalam mengkaji dan melakukan penelitian untuk menjelaskan pemodelan tegasan gempabumi di sesar Poso antara lain:

1. Distribusi tegasan Coulomb failure pada sesar Poso yang diakibatkan oleh gempa 2017 Mw 6.7 Poso dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu-Donggala perlu dianalisis untuk mengetahui efek gempa tersebut terhadap sesar Poso.
2. Akumulasi tegasan Coulomb failure yang diakibatkan oleh gempa 2017 Mw 6.7 Poso dan gempa 2018 Mw 7.5 Palu-Donggala serta pengaruh laju tegasan tektonik yang terjadi pada sesar Poso diperlukan untuk mengetahui kondisi terkini tegasan pada sesar Poso.

## **I.3 Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini dibatasi pada pemodelan tegasan *Coulomb* gempabumi, yaitu gempa besar 2017 Poso Mw 6.7 dan 2018 Palu – Donggala Mw 7.5 serta distribusi tegasannya pada sesar Poso. Penelitian ini menggunakan model *slip* yang dipublikasikan oleh USGS (2018) dan Wang (2019). Geometri sesar Poso merujuk pada data yang dipublikasikan oleh PusGeN (2017). Lokasi penelitian ini dibatasi pada daerah sekitar Sulawesi Tengah ( $\sim 4^{\circ}\text{S} - 3^{\circ}\text{N}$  dan  $118^{\circ}\text{E} - 126^{\circ}\text{E}$ ).

#### **I.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang hendak dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa perubahan tegasan Coulomb di sesar Poso akibat kehadiran gempa 2017 Poso Mw 6.7 dan 2018 Palu Mw 7.5, serta laju perubahan tegasan tektonik pada sesar Poso.
2. Mengetahui segmen dari sesar Poso yang lebih berpotensi menimbulkan gempabumi berdasarkan model fungsi waktu akumulasi tegasan Coulomb.

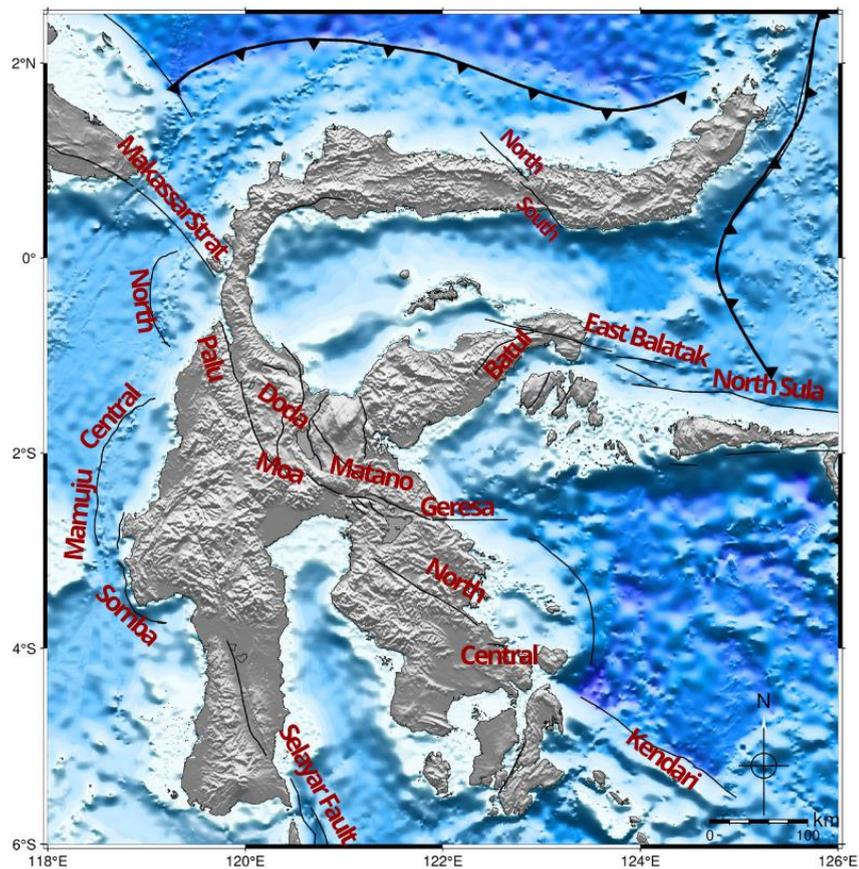
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### II.1 Tatanan Tektonik Sulawesi

Berlokasi di pertemuan lempeng besar, bentuk khas Pulau Sulawesi dihasilkan dari sejarah kompleks akibat tumbukan dan rotasi lempeng benua, busur pulau, dan lempeng samudera yang berkelanjutan dengan paparan Sunda (*Sundaland*). Tumbukan yang kompleks ini akibat dari lempeng Filipina – Pasifik dan Indo – Australia, dimana prosesnya telah berlangsung sejak zaman kapur (*Cretaceous*). Selama fase Miosen Awal, fragmen mikrokontinen dari Australia bertubrukan dengan Sulawesi bagian tenggara sebagaimana dibuktikan oleh hadirnya ofiolit. Setelah tumbukan ini, selama fase Miosen Awal-Tengah kompleks inti metamorf berkembang di Sulawesi dalam fase perluasan regional yang mengakibatkan perkembangan beberapa cekungan di wilayah Banda.

Proses tumbukan terakhir di Sulawesi berlangsung selama fase Pliosen Awal sekitar lima juta tahun yang lalu, antara lengan Sulawesi bagian timur dengan Blok Banggai-Sula yang berasal dari Pulau Irian Jaya. Hal ini dapat diidentifikasi dengan terbentuknya sabuk ofiolit di lengan bagian timur pulau Sulawesi, pengangkatan (*uplift*), pelipatan (*folding*), dan dorongan (*thrusting*) dari Sulawesi bagian tengah ke barat, serta adanya inversi graben dari masa Paleogene. Peristiwa ini terjadi di bagian barat pulau Sulawesi, dorongan dan pelipatan ke arah barat, serta perkembangan sesar mendatar Palu-Koro yang berarah utara ke barat laut dan meleburkan bagian kerak yang lebih rendah, terjadinya proses *uplift* (pengangkatan) pegunungan dengan cepat sekitar 2.5 km, dan pengendapan sedimen hingga pasca orogenik (*syn to post-orogenic sediments*), seperti sedimen *molasse* dari fase

Pliosen Akhir ditemukan sekitar zona tumbukan pada fase Pliosen Awal (Bellier dkk, 2006).



Gambar 2.1 Peta sesar - sesar yang ada di Pulau Sulawesi (modifikasi dari PuSGeN, 2017) Pulau Sulawesi ini tersusun atas tatanan struktur geologi yang aktif bergerak dengan kecepatan pergeseran yang berbeda-beda. Di sebelah utara Pulau Sulawesi terdapat *North Sulawesi Subduction* dengan kecepatan pergeseran *geodetic* 42-50 mm/th (Socquet dkk., 2006). Di darat terdapat pergeseran dengan kecepatan pergeseran 11 mm/th di Sesar Gorontalo (Rangin dkk., 1999). Dari arah timur bergerak mendekati kemenerusan Sesar Sorong dengan besar pergeseran 32 mm/th (Rangin dkk., 1999). Di bagian tengah Pulau Sulawesi adalah Sesar Palukoro yang aktif bergerak (Socquet dkk., 2006) dengan besar pergeseran *geodetic* 41-45 mm/th (Socquet dkk.,

2006). Bellier (2001) mengelompokkan Sesar Palukoro sebagai sesar dengan besar pergeseran tinggi dengan kegempaan yang rendah. Kemenerusan ke arah timur adalah Sesar Matano dengan besar pergeseran sekitar 2 cm/thn (Socquet dkk, 2006).

## **II.2 Gempa Besar Terkini Sulawesi Tengah**

### **II.2.1 Gempa 2017 Poso Mw 6.7**

Pada tanggal 29 Mei 2017 terjadi gempa dengan magnitudo Mw 6.7 terjadi di Poso, Sulawesi Tengah, yang mengakibatkan guncangan sebesar V MMI (dimodifikasi intensitas Mercalli) di Poso dan Torue, IV MMI di Palu, III MMI di Toli-Toli, dan II – III MMI di beberapa wilayah Gorontalo dan Sulawesi Selatan. Seperti dilansir katalog *Global Centroid Moment Tensor (CMT)*, episenter gempa ini berada di 1.24° LS dan 120.40° BT sekitar 39 km arah barat ke barat laut kota Poso. Gempa Poso 2017 merupakan gempa dangkal terbesar yang melanda Sulawesi Tengah sejak penerapan instrumen seismik modern yang berdampak memberikan retakan pada wilayah pegunungan dengan ketinggian rata-rata 2300 m. Peristiwa ini menunjukkan adanya energi potensial gravitasi yang tinggi dan bukti dari konsep ekstensi litosfer (Wang dkk, 2019).

Umumnya tatanan tektonik ekstensional menjadi penyebab adanya sesar normal, dimana sesar normal yang diidentifikasi pada daerah pegunungan memiliki karakteristik sistem tektonik *strike – slip*. Hubungan sistem patahan utama dan topografi yang tinggi pada wilayah timur Sulawesi Tengah ini merupakan hasil dari proses tektonik pada fase Miosen akhir hingga Pliosen akhir yang memiliki struktur berbentuk “corong terbalik”. Seismisitas di struktur “corong terbalik” ini lebih aktif dari daerah sekitarnya, dimana kerak struktur tersebut menyerap sebagian besar

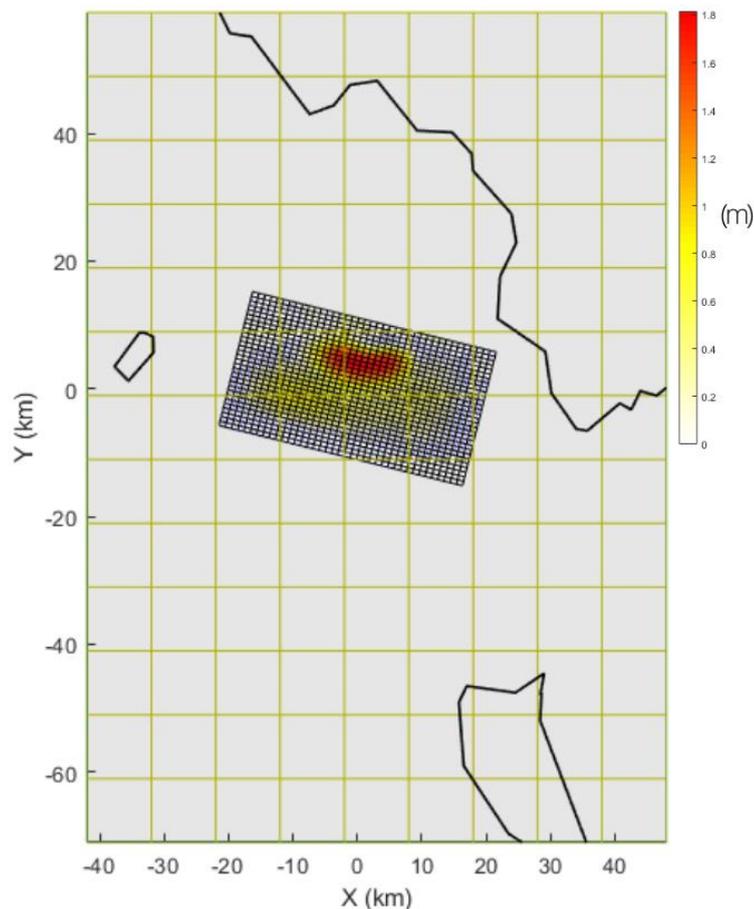
regangan elastis di Sulawesi Tengah (Socquet dkk, 2006). Struktur “corong terbalik” ini dibatasi oleh sesar Palu-Koro di bagian barat dan kompleks metamorf Tokorondo di bagian timur.

Sesar mendatar dalam skala besar umumnya dianggap terkait dengan proses transformasi lateral massa atau adanya pelepasan tegasan secara lateral pada arah sumbu tegasan normal terkecil dan terdapat pemendekan pada arah sumbu tegasan normal terbesar, maka sesar aktif Palu-Koro kemungkinan mendominasi transformasi massa bagian timur wilayah Sulawesi Tengah. Hal ini dibuktikan pula dengan penyelidikan geologi yang menunjukkan deformasi fase Kuartar tersebar luas disepanjang segmen utara sesar Palu-Koro, namun relatif berkurang dan terelokalisasi di sepanjang segmen bagian selatan (Bellier dkk, 2001). Selain berkontribusi terhadap keruntuhan ekstensional, sesar aktif Palu-Koro sebagai batas utama mikroblok kerak juga mendominasi pergerakan serta deformasi blok tektonik di bagian timur wilayah Sulawesi Tengah (Wang dkk, 2019).

Gempa 2017 Mw 6.7 Poso berperan dalam proses penambahan tegasan dari arah timur laut – barat daya di Sulawesi Tengah dengan mekanisme sesar normal (Daniarsyad dkk, 2021). Gempa Poso 2017 juga menjadi indikasi awal akan terjadinya gempadengan frekuensi yang lebih besar di sekitar wilayah tersebut karena gempa bumi dengan kekuatan Mw > 6 belum pernah tercatat sebelumnya pada wilayah tersebut, sehingga untuk mengidentifikasi resiko seismik regional dilakukan perhitungan tegasan *Coulomb failure* (Wang dkk, 2019).

Badan Nasional Penanggulangan Bencana Indonesia (BNPB) melaporkan bahwa

gempa telah menyebabkan kerusakan parah pada 211 bangunan, dan setidaknya 549 keluarga harus dievakuasi (BNPB, 2017). Berdasarkan pengamatan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), ada sekitar 400 gempa susulan selama 1 bulan setelah gempa utama. Namun, gempa Poso ini diperkirakan bukan disebabkan oleh aktivitas Sesar Palukoro atau Matano, dipertegas dengan mekanisme sesar normal dan pusat gempa terletak di Pegunungan Tokorondo di bagian timur Sulawesi Tengah (Daniarsyad dkk, 2021).



Gambar 2.2 Model *slip* gempa Poso 2017 (Wang dkk, 2019). Terdapat dua zona *asperity* pada gempa Poso 2017 yang mana zona ini merupakan daerah awal dari *slip* gempa Poso 2017

Berdasarkan parameter seismik dan parameter geomorfologi, didapatkan bahwa gempa Poso 2017 tidak terjadi di sepanjang sesar Palolo ataupun sesar Sausu. Tetapi, patahan pada gempa ini terdapat di sesar Tokorondo. Gempa Poso juga memicu gempa disekitarnya berupa *aftershocks* di luar sesar utama (Daniarsyad dkk, 2021).

Penelitian yang telah dilakukan oleh Wang dkk (2019) merekonstruksi parameter sumber gempa Poso 2017 menggunakan data deformasi *coseismic* dari *Interferometric Data Synthetic Aperture Radar* (InSAR) sebagai respon kinematik permukaan bumi terhadap dislokasi patahan yang terjadi. Rekonstruksi ini (lihat Gambar 2.2) dilakukan dengan dua langkah, yaitu pemodelan *slip* yang pertama untuk menentukan geometri patahan, tahap selanjutnya ialah pemodelan *slip* yang terdistribusi untuk mencitrakan model *slip* yang lebih terperinci.

### **II.2.2 Gempa 2018 Palu – Donggala Mw 7.5**

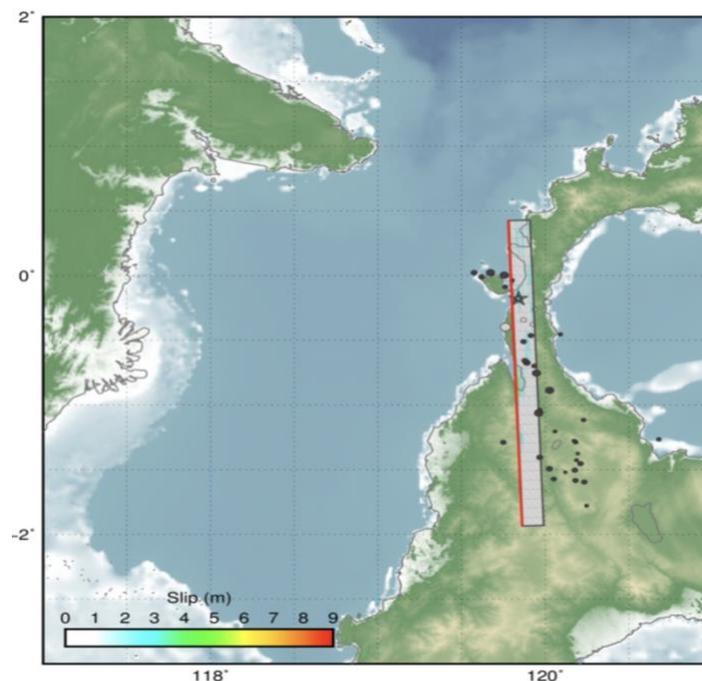
Gempa Palu terjadi pada tanggal 28 September 2018 dengan magnitudo sebesar Mw 7.5 yang diikuti dengan terjadinya Tsunami setinggi 4 – 7 m. Episenter gempa berada di 75 km utara dari kota Palu. Gempa ini disebabkan oleh *strike-slip* aktif sesar Palu-Koro (Socquet, 2019). Sesar Palu-Koro memiliki banyak segmen dan terbagi menjadi empat segmen utama yang dipisahkan oleh lengkungan besar. Dari utara terdapat segmen Tanimbaya, Donggala, Palu, dan di selatan terdapat segmen Saluki. Sesar ini secara regional melengkung searahjarum jam dari Semenanjung Tanimbaya menuju Palung Sulawesi Utara, sehingga menghasilkan kompresional tektonik yang luas menghubungkan sistem sesar mendatar dengan zona subduksi (Natawidjaja dkk., 2020).

Segmen Tanimbaya merupakan awal dari kepadatan sistem sesar *strike-slip*, segmen ini terpisah dengan segmen Donggala oleh *gap* selebar 4.2 km di bagian selatan, dengan sistem sesar sekunder *reverse* disepanjang zona kompresional sesar *strike-slip*. Segmen Donggala memiliki batas lengkungan yang kecil di tengah, dimana berdasarkan relokasi gempa utama ditemukan bahwa lokasi *mainshock* gempa Palu 2018 berada sekitar 15 km arah timur laut dari lengkungan ini (Supendi dkk., 2020).

Model *slip* gempa Palu 2018 yang diterbitkan oleh USGS (2018) pada Gambar 2.3 dihasilkan dari hasil analisis gelombang P, gelombang SH, dan gelombang permukaan yang dipilih berdasarkan kualitas data dan distribusi azimuth. Kemudian, data *waveforms* dikonversi menjadi data *displacement* dengan menghilangkan respon instrumen dan hasilnya dilakukan pembatasan riwayat *slip* menggunakan algoritma *finite fault inverse*. Selanjutnya dilakukan pemodelan menggunakan pencocokan hiposenter (*hypocenter matching*) dan bidang patahan ditentukan menggunakan *W-Phase* momen tensor (untuk solusi *near-real-time*) atau menggunakan gCMT momen tensor (untuk solusi secara historis).

Gempa Palu 2018 memiliki *rupture* yang berinti dan berpusat di segmen Donggala kemudian merambat di sepanjang patahan yang sudah ada sebelumnya, struktur patahan geologi bawah laut yang aktif namun tidak dapat dipetakan, dikenal sebagai “*hidden fault*” atau sesar tersembunyi yang bergerak ke arah timur hingga ke leher pulau Sulawesi, sehingga dinamakan *Palukoro Sulawesi Neck* (PSN) *Fault* (Bao dkk, 2019; Fang dkk, 2019; Socquet dkk, 2019; dalam Natawidjaja dkk, 2020).

Selanjutnya, dikarenakan geometri sesar di Teluk Palu yang cukup rumit, memiliki daya *releasing* pada lengkungannya dan sesar yang bercabang dua. Oleh karena itu, Teluk Palu bertindak sebagai penahan terhadap perambatan *rupture* yang cepat ke arah selatan. Sehingga hal ini dapat menyebabkan guncangan tanah yang tinggi dan deformasi yang dapat memicu longsoran bawah laut yang besar dan mampu menghasilkan peristiwa tsunami yang besar (Natawidjaja dkk, 2020). Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) melaporkan sebanyak 2200 orang meninggal, 68,000 rumah hancur, diperkirakan kerugian ekonomi sebesar 900 juta USD (Gunawan dkk, 2020).



Gambar 2.3 Model *slip* gempa Palu 2018 (USGS, 2018). Model *slip* gempa Palu 2018 memiliki geometri yang cukup panjang dari bagian tengah Sulawesi hingga utara Sulawesi.

### II.3 Sesar Poso

Jalur sesar Poso dicirikan dengan gawir sesar, tekuk lereng, lembah Poso dan *triangular facet* yang memanjang 94 km. Bagian utara memiliki dua lajur sesar dengan arah N34°E yang kemudian membelok membentuk garis kurva dengan arah N10°E. Jalur sesar ini memiliki ekspresi morfologi yang jelas tetapi tidak adayang memperlihatkan aktifitas yang memotong sedimen muda (Daryono, 2016). Berdasarkan studi PusGeN, Sesar Poso memiliki mekanisme sesar *reverse* dengan nilai dip 45E serta memiliki kecepatan pergeseran sebesar 0.1 mm/th (PusGeN, 2017).

### II.4 Tegasan *Coulomb Failure* (CFS)

Sejumlah kriteria dapat digunakan untuk mengkarakterisasi *failure* pada batuan. Namun, Tegasan *Coulomb failure* yang digunakan secara umum (Scholz, 1998). Tegasan *Coulomb failure* didasarkan pada kriteria *Mohr-Coulomb* yang mana tegasan geser dan tegasan normal pada sesar mempengaruhi *failure* pada suatu batuan. (King dan Deves, 2015). Tegasan *Coulomb* juga digunakan dalam menjelaskan pola persebaran *aftershock* atau gempa yang dipicu oleh gempa besar tersebut. Proses batuan yang mengalami *failure* umumnya direpresentasikan sebagai fungsi tegasan *Coulomb failure* (CFS) dan dirumuskan sebagai berikut:

$$C_f = \tau_\beta + (\mu\sigma_\beta + p) \quad 2.1$$

Dimana  $\tau_\beta$  adalah tegasan geser pada bidang patahan,  $\sigma_\beta$  adalah tegasan normal (positif ketika *extension*),  $p$  adalah tekanan pori dan  $\mu$  adalah koefisien friksi. Perubahan tekanan pori sering dikaitkan dengan perubahan tegasan rata-rata dan dapat diasumsikan sebanding dengan perubahan tegasan normal, sehingga

persamaan 2.1 dapat diubah menjadi:

$$C_f = \tau_\beta + \mu' \sigma_\beta \quad 2.2$$

Dimana  $\mu'$  adalah koefisien friksi efektif atau koefisien friksi *apparent* didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu' = (1 - \beta).$$

Dengan asumsi bahwa akumulasi tegasan yang terjadi dapat menyebabkan *failure*, nilai positif pada  $C_f$  dapat menambah akumulasi tegasan pada patahan sehingga mempercepat terjadinya *failure* sedangkan nilai negatif pada  $C_f$  akan mengurangi akumulasi tegasan sehingga memperlambat terjadinya *failure*.

#### II.4.1 Tegasan Coulomb Failure (CFS) dengan Specified Orientation

Dalam sistem dimana sumbu x dan y dan perpindahan sesar adalah horizontal dan bidang sesar adalah vertikal. Tegasan pada suatu bidang dengan sudut  $\psi^0$  dari sumbu x yang dihasilkan dari sumber tertentu ialah sebagai berikut :

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \psi + 2\sigma_{xy} \sin^2 \psi + \sigma_{yy} \sin^2 \psi \quad 2.3$$

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx} \sin^2 \psi + 2\sigma_{xy} \sin^2 \psi + \sigma_{yy} \cos^2 \psi \quad 2.4$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2} (\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \sin 2\psi + \tau_{xy} \cos 2\psi \quad 2.5$$

Persamaan diatas untuk mekanisme sesar mengiri dan persamaan yang sama juga digunakan pada mekanisme sesar menganan. *Coulomb stress* pada sesar mengiri dan menganan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C_f^L = T_{13}^L + \mu' \sigma_{33} \quad 2.6$$

$$C_f^R = T_{13}^R + \mu' \sigma_{33} \quad 2.7$$

Kontribusi tegasan geser, tegasan normal dan tegasan *Coulomb* yang dihasilkan untuk sesar sangat kecil paralel dengan sesar target. Perhitungan ini menghasilkan nilai tegasan *Coulomb* pada sesar yang dihasilkan dari nilai *slip* sesar utama dan tidak bergantung nilai tegasan regional yang sudah pernahada sebelumnya.

#### II.4.2 Tegasan Coulomb failure dengan Optimally Oriented Fault

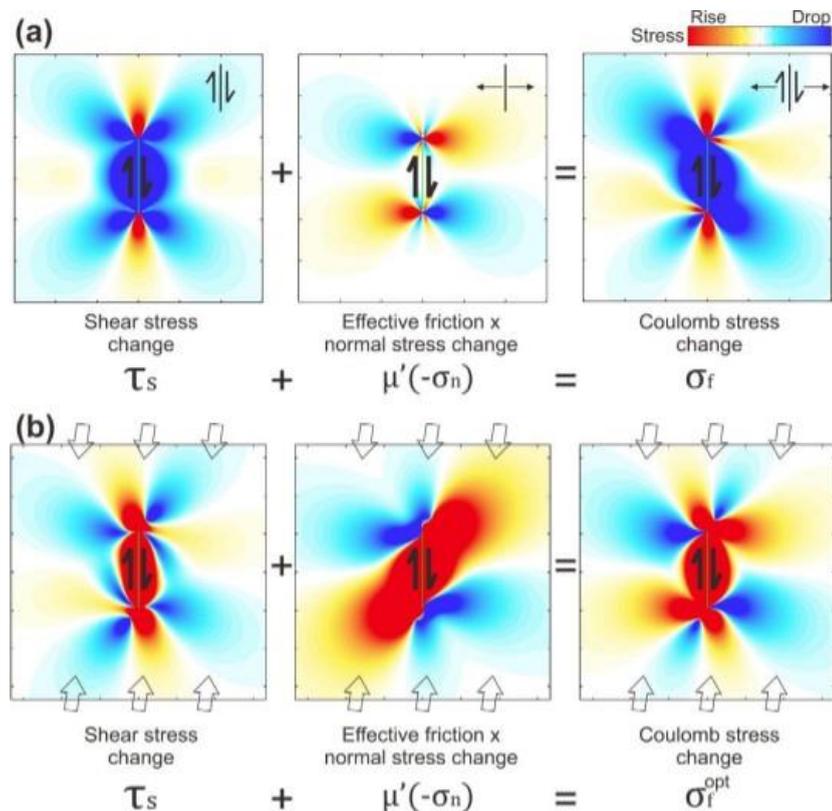
Jika stres atau perubahan stres diketahui, maka tegasan Coulomb atau perubahan tegasan dapat dihitung pada bidang manapun. Kasus yang lebih umum di mana perubahan tegasan, seperti yang disebabkan oleh gempa bumi, dikenakan pada medan tegasan yang sudah ada sebelumnya dapat dihitung. Bidang optimal dianggap sebagai bidang yang secara simultan dikenakan gaya tektonik dan tegasan yang diakibatkan oleh patahan utama. *Optimal Fault* didefinisikan sebagai bidang yang memiliki medan tegasan yang seragam. Arah optimum ditentukan berdasarkan perubahan tegasan yang diakibatkan oleh gempa bumi dan tegasan regional pada wilayah tersebut. Perubahan tegasan pada bidang optimum dapat dihitung menggunakan formula sebagai berikut:

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx}^q \sin^2 \psi_0 - 2\sigma_{xy}^q \sin \psi_0 \cos \psi_0 + \sigma_{yy}^q \cos^2 \psi_0 \quad 2.8$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_{yy}^q - \sigma_{xx}^q) \sin^2 \psi_0 + \tau_{xy}^q \cos 2\psi_0 \quad 2.9$$

Dan nilai perubahan tegasan *Coulomb* pada bidang tersebut ialah

$$C_f^{opt} = \tau_{13} + \mu' \sigma_{33} \quad 2.10$$



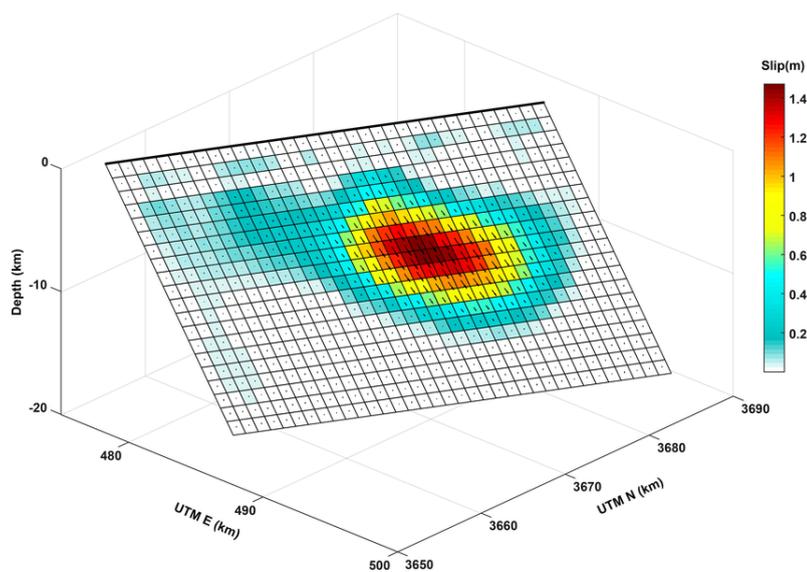
Gambar 2.4 (a) Perubahan tegasan Coulomb akibat pergerakan sesar geser menganan. (b) perubahan tegasan Coulomb akibat pergerakan sesarsumber menganan pada optimally oriented fault dengan tegasan regional berarah N7°E (tanda panah) dengan besar tegasan 100 bar.Koefisien  $\mu'$  yaitu 0.4 (Rafie dkk, 2023).

## II.5 Pemodelan Segmented Receiver Fault

Perubahan *coulomb stress* dapat dihitung baik dengan pendekatan *Specified Orientation* dengan menggunakan parameter geometri pada sesar target (*receiver fault*) dan pendekatan *Optimally Oriented Fault* dengan menggunakan bidang yang berorientasi optimal. Mildon dkk (2016) menggunakan pendekatan pertama untuk membandingkan perbedaan dari patahan model *planar* dan *strike-variable*. Diketahui bahwa dalam melakukan perhitungan nilai Tegasan Coulom, nilai *strike* dan *dip* dari *receiver faults* sangat penting. Namun, yang belum banyak dipertimbangkan ialah menggunakan variable *strikes* disepanjang satu patahan utuh dalam pemodelan *coulomb*. Didapatkan *stress transfer* di sesar normal pada model

patahan *planar*, dengan *receiver fault* yang sejajar dengan sumber patahan umumnya mengalami positif *stress transfer* dan *receiver faults* yang tegak lurus dengan sumber patahan mengalami negatif *stress transfer*. Sedangkan untuk model patahan *strike-variable* geometri, meskipun memiliki pola yang sama, teridentifikasi ciri utama membedakannya dengan model *planar* yaitu nilai *stress* yang lebih besar terdapat pada area patahan yang memiliki bentuk melengkung. Hal ini mengindikasikan *stress* pada bagian melengkung suatu patahan tidak tepat jika diselesaikan dengan pendekatan model umum atau *planar* (Mildon dkk, 2016).

## II.6 Sumber Gempabumi

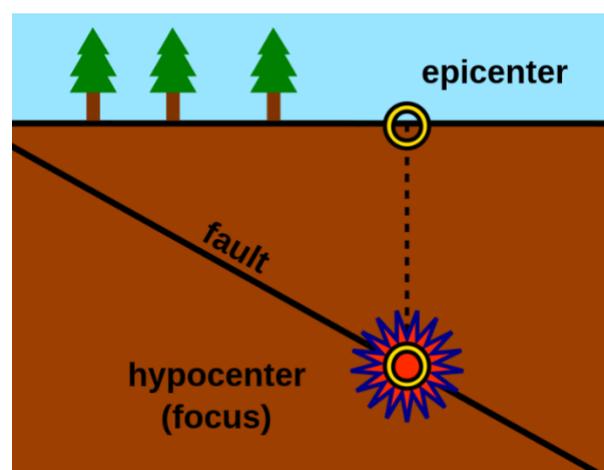


Gambar 2.5 Model 3 dimensi *finite source slip distribution* dari gempa Nima/Rogma (Li, 2020)

Proses terjadinya gempabumi dari suatu sesar yang mengalami tegasan sehingga menyebabkan adanya suatu energi potensial yang terakumulasi, kemudian sesar tersebut patah mengakibatkan energi potensial berubah menjadi energi kinetik yang menyebar dan memberikan getaran pada kerak bumi di sekitar sesar. Gempabumi

terjadi mulai dari pelepasan tegasan geser pada sebagian kecil sesar kemudian meluas sepanjang sesar tersebut. Pelepasan tegasan geser akan menyebabkan robekan di sekitar sesar. Proses dari awal robekan hingga percepatan perluasan robekan disebut nukleasi gempabumi, dan bagian dimana luas robekan dipercepat ialah zona nukleasi (Iio, 2011).

Umumnya ada dua pendekatan dalam penentuan sumber gempabumi, yaitu *point-source* dan *finite source*. Dalam peringatan dini gempabumi, pendekatan *point-source* penting untuk digunakan karena respon yang cepat terhadap terjadinya gempabumi penting untuk dilakukan. Selain itu, untuk gempabumi kecil yang memiliki zona nukleasi kecil, sehingga dapat menggunakan pendekatan *point-source*. Sedangkan untuk ukuran zona nukleasi yang besar yang disebabkan oleh gempa besar, digunakan pendekatan *finite-source*. Telah banyak riset yang dikerjakan untuk memodelkan robekan gempabumi melalui pergeseran (slip) pada bidang sesar menggunakan gelombang seismik (Iio, 2011).



Gambar 2.6 Ilustrasi *point source* dalam pemodelan sumber gempa. Titik berwarna merah menandakan lokasi terjadinya gempa atau *hypocenter* dan *epicenter* merupakan titik dipermukaan bumi yang berada tepat di atas *hypocenter*.

## II.7 Hubungan konstitutif regangan – tegasan

Nilai dari komponen tensor tegasan bergantung pada suatu koordinat sistem. Koordinat sistem tersebut dapat dirotasi untuk mendapat nilai diagonal pada matriks tensornya berupa (Vavryčuk, 2015)

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad 2.10$$

Di mana  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  dan  $\sigma_3$  masing – masing adalah tegasan utama maksimum, intermediate dan minimum. Perhitungan komponen tegasan didasarkan pada hukum Hooke untuk elastisitas menggunakan asumsi isotropis hubungan konstitutif antara regangan ( $\epsilon$ ) dan tegasan ( $\sigma$ ) (Slaughter, 2001):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \mathbf{0} \\ \nu & (1-\nu) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & (1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad 2.11$$

Dengan  $E$  adalah modulus Young dan  $\nu$  adalah poisson ratio.