

Analisis *Coulomb Stress Change* pada Gempa Kepulauan Tanimbar 2023 dan Kaitannya terhadap Distribusi Gempa Susulan

Marasi Bless Suryan^{1✉}, Gazali Rachman¹

¹ Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Poka, Ambon, Maluku 97233, Indonesia

Article History

Received May 18, 2026

Received in revised June 13, 2026

Accepted June 21, 2026

Available online June 28, 2026

✉ Corresponding Author:

Marasi Bless Suryan

E-mail Address:

marasi.suryan@lecturer.unpatti.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi distribusi spasial gempa susulan di Kepulauan Tanimbar, Indonesia, dengan pendekatan *Coulomb Stress Change* (CSC) pascagempa utama tahun 2023. Wilayah ini termasuk zona tektonik aktif akibat interaksi Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, sehingga rawan gempa menengah hingga besar. Analisis CSC digunakan untuk menilai perubahan tegangan yang mempengaruhi potensi terjadinya gempa susulan, dengan menganalisis dua pola patahan berbeda. Data gempa susulan dikumpulkan dan dipetakan secara spasial untuk mengidentifikasi hubungan antara gempa utama dan distribusi gempa susulan. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi signifikan antara area dengan peningkatan tegangan *Coulomb* dan frekuensi gempa susulan, dimana daerah berwarna merah menunjukkan daerah yang mengalami kenaikan *Coulomb Stress*, sedangkan daerah yang berwarna biru menunjukkan daerah yang mengalami penurunan *Coloumb Stress*, dari 2 metode CSC terbukti efektif dalam memprediksi potensi aktivitas seismik pascagempa. Peta sebaran *Coulomb stress* ini memberikan kontribusi penting untuk mitigasi risiko bencana gempa di wilayah Kepulauan Tanimbar dan daerah tektonik aktif serupa.

Kata kunci: *Coulomb Stress Change* (CSC); Coulomb Stress; Tanimbar; Gempa Susulan; Tegangan Coulomb

Abstract

This study evaluates the spatial distribution of aftershocks in the Tanimbar Islands, Indonesia, using the Coulomb Stress Change (CSC) approach following the 2023 mainshock. The region is located within an active tectonic zone resulting from the interaction of the Indo-Australian, Eurasian, and Pacific Plates, making it highly susceptible to moderate-to-large earthquakes. CSC analysis was applied to assess stress changes that influence the potential occurrence of aftershocks by examining two different faulting models. Aftershock data were collected and spatially mapped to identify the relationship between the mainshock and the distribution of subsequent seismic events. The results indicate a significant correlation between areas experiencing increased Coulomb stress and the frequency of aftershocks. Red-colored areas represent regions with positive Coulomb stress changes, indicating stress increases, whereas blue-colored areas represent regions with negative Coulomb stress changes, indicating

stress decreases. The findings from both CSC methods demonstrate that the CSC approach is effective in predicting potential post-earthquake seismic activity. The resulting Coulomb stress distribution maps provide important contributions to earthquake disaster risk mitigation in the Tanimbar Islands and other similar tectonically active regions.

Keywords: Coulomb Stress Change (CSC); Coulomb Stress; Tanimbar; Aftershocks; Coulomb Stress Distribution

1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan salah satu fenomena geodinamika yang sering terjadi di wilayah tektonik aktif akibat interaksi antar lempeng bumi. Indonesia sebagai bagian dari jalur cincin api Pasifik memiliki tingkat aktivitas seismik yang sangat tinggi karena berada pada pertemuan Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik (Mokodenseho dkk., 2023). Salah satu wilayah yang aktif secara tektonik adalah Kepulauan Tanimbar yang berada di kawasan timur Indonesia dan dipengaruhi oleh sistem subduksi Banda Arc. Aktivitas tektonik di wilayah ini menyebabkan sering terjadinya gempa bumi dengan magnitudo menengah hingga besar yang berpotensi menimbulkan kerusakan serta memicu rangkaian gempa susulan. Fenomena gempa susulan menjadi aspek penting dalam kajian seismologi karena berkaitan erat dengan redistribusi tegangan setelah terjadinya gempa utama (Sutrisno dkk., 2023).

Pada tahun 2023, wilayah Kepulauan Tanimbar mengalami gempa bumi signifikan yang memicu banyak gempa susulan dalam rentang waktu tertentu. Distribusi spasial gempa susulan tersebut diduga dipengaruhi oleh perubahan tegangan *Coulomb* atau *Coulomb Stress Change* (CSC) akibat pelepasan energi pada gempa utama (Banyunegoro dkk., 2019). Konsep CSC menjelaskan bahwa suatu gempa dapat meningkatkan maupun menurunkan tegangan pada sesar di sekitarnya. Area yang mengalami peningkatan tegangan *Coulomb* cenderung lebih mudah mengalami kegagalan batuan sehingga berpotensi memicu gempa susulan, sedangkan area dengan penurunan tegangan relatif menjadi lebih stabil. Analisis CSC telah banyak digunakan untuk memahami mekanisme transfer tegangan antar sesar dan hubungan antara gempa utama dengan pola distribusi gempa susulan (An dkk., 2023).

Metode CSC menjadi salah satu pendekatan penting dalam mitigasi bencana gempa karena mampu memberikan gambaran daerah yang mengalami peningkatan potensi aktivitas seismik pascagempa utama (Maletckii, 2023). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa distribusi gempa susulan umumnya terkonsentrasi pada zona dengan nilai ΔCSC positif. Kajian terhadap gempa Nepal 2015, Turki 2023, hingga Aceh dan Cianjur di Indonesia menunjukkan adanya keterkaitan kuat antara perubahan tegangan *Coulomb* dengan pola persebaran gempa susulan (Ding dkk., 2023). Dengan demikian, analisis CSC dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi bahaya seismik lanjutan di suatu wilayah aktif tektonik (Thapa, 2023).

Secara geologi dan tektonik, Kepulauan Tanimbar berada pada zona kompleks yang dipengaruhi oleh tumbukan dan subduksi lempeng di kawasan Laut Banda. Kompleksitas struktur sesar di wilayah ini menyebabkan distribusi tegangan menjadi sangat dinamis setelah terjadinya gempa utama. Oleh karena itu, analisis perubahan tegangan *Coulomb* pada gempa Kepulauan Tanimbar 2023 menjadi penting untuk memahami mekanisme pemicu gempa susulan serta arah propagasi aktivitas seismik di kawasan tersebut (Meilano dkk., 2021). Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi risiko bencana

melalui identifikasi zona-zona yang mengalami peningkatan tegangan dan berpotensi mengalami aktivitas gempa lanjutan (Melani dkk., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan CSC akibat gempa Kepulauan Tanimbar 2023 serta mengkaji keterkaitannya dengan distribusi gempa susulan yang terjadi setelah gempa utama. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi zona-zona yang mengalami peningkatan nilai *Coulomb Stress* sebagai daerah yang berpotensi menjadi lokasi terjadinya gempa susulan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai pola transfer tegangan di wilayah tektonik aktif, menjadi referensi ilmiah dalam pengembangan studi mitigasi bencana gempa bumi di Indonesia bagian timur, serta mendukung perencanaan mitigasi berbasis informasi perubahan tegangan seismik.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan metode CSC untuk menganalisis perubahan distribusi tegangan akibat gempa utama Kepulauan Tanimbar tahun 2023 sebagai dasar dalam mengidentifikasi zona-zona yang berpotensi mengalami peningkatan tegangan *Coulomb* (*Positive Coulomb Stress Change*). Informasi tersebut penting karena daerah dengan peningkatan tegangan *Coulomb* memiliki peluang yang lebih besar untuk mengalami gempa susulan dibandingkan dengan daerah dengan penurunan tegangan.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman mengenai mekanisme transfer tegangan pascagempa, tetapi juga menghasilkan informasi spasial mengenai wilayah yang berpotensi mengalami aktivitas seismik lanjutan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai salah satu dasar dalam penyusunan strategi mitigasi bencana gempa bumi, penentuan prioritas pemantauan seismik, evaluasi tingkat bahaya pascagempa, serta mendukung pengambilan keputusan oleh pemerintah dan instansi terkait dalam upaya pengurangan risiko bencana di wilayah Kepulauan Tanimbar dan kawasan tektonik aktif lainnya.

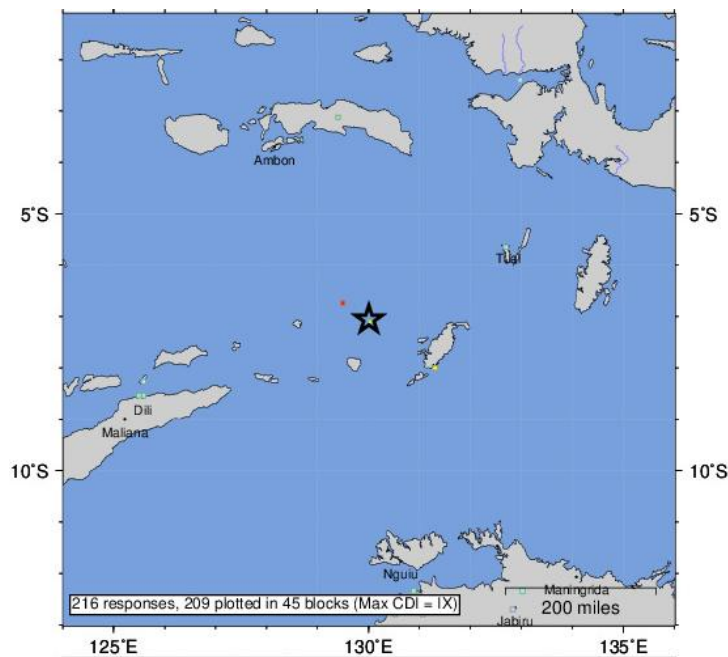
2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis seismotektonik untuk mengkaji perubahan *Coulomb Stress Change* (CSC), akibat gempa Kepulauan Tanimbar tahun 2023 serta hubungannya terhadap distribusi gempa susulan. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran matematis dan spasial mengenai transfer tegangan yang terjadi setelah gempa utama, sehingga dapat digunakan untuk memahami pola pemicu gempa susulan di wilayah tektonik aktif. Wilayah penelitian difokuskan pada kawasan Kepulauan Tanimbar dan sekitarnya yang secara geologis berada pada zona interaksi kompleks antara Lempeng Indo-Australia dan Busur Banda sehingga memiliki aktivitas seismik yang tinggi (Xiong dkk., 2023).

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini berupa data gempa utama dan data gempa susulan yang diperoleh dari katalog Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), *United States Geological Survey* (USGS), serta *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT). Data tersebut meliputi waktu kejadian gempa, koordinat episenter, kedalaman hiposenter, magnitudo, mekanisme fokus, *strike*, *dip*, *rake*, serta parameter sesar lainnya (Kobayashi dkk., 2016). Gempa susulan yang dianalisis merupakan gempa yang terjadi setelah gempa utama dalam rentang waktu tertentu dengan batas magnitudo minimum yang memenuhi kelengkapan katalog gempa (*magnitude of completeness*). Pemilihan data ini bertujuan untuk memperoleh

distribusi gempa susulan yang representatif terhadap perubahan tegangan yang terjadi setelah gempa utama.

Tahapan awal penelitian dilakukan dengan pengumpulan dan seleksi data gempa untuk memastikan kualitas dan konsistensi parameter seismik yang digunakan. Data yang memiliki ketidaklengkapan parameter atau lokasi hiposenter yang tidak stabil dieliminasi dari proses analisis. Selanjutnya dilakukan identifikasi mekanisme fokus gempa utama guna menentukan orientasi bidang sesar aktif yang menjadi sumber gempa. Parameter *strike*, *dip*, dan *rake* digunakan untuk mendefinisikan geometri sesar dalam proses pemodelan perubahan tegangan *Coulomb*. Selain itu, dilakukan analisis distribusi spasial gempa susulan untuk mengetahui pola persebaran aktivitas seismik pascagempa utama (Mokodenseho dkk., 2023).



Gambar 1. Peta Titik Gempa pulau Tanimbar 9 Januari 2023 (USGS)

Pemodelan CSC dilakukan menggunakan perangkat lunak *Coulomb* 3.4. Perangkat lunak ini digunakan untuk menghitung distribusi perubahan tegangan statik akibat pelepasan energi pada bidang sesar selama gempa utama. Dalam pemodelan ini digunakan model medium elastik homogen isotropik dengan asumsi bahwa deformasi kerak bumi mengikuti teori elastisitas linier. Parameter yang dimasukkan ke dalam model meliputi panjang sesar, lebar sesar, besar slip, orientasi sesar, kedalaman sumber gempa, serta nilai koefisien friksi efektif. Nilai koefisien friksi efektif yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 0,4 karena nilai tersebut umum digunakan dalam studi transfer tegangan gempa bumi dan dianggap mampu merepresentasikan kondisi kerak bumi pada wilayah tektonik aktif (Coudurier & Singh, 2021). Dalam penelitian ini, perubahan tegangan *Coulomb* dinyatakan sebagai *Coulomb Stress Change* (ΔCSC), yang dihitung menggunakan persamaan *Coulomb Failure Stress* (ΔCFS) sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (1).

$$\Delta CFS = \Delta \tau_s + \mu' \Delta \sigma_n \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dengan ΔCFS (perubahan *Coulomb Failure Stress*); $\Delta \tau_s$ (perubahan tegangan geser pada bidang sesar); μ' (koefisien friksi efektif); dan $\Delta \sigma_n$ (perubahan tegangan normal).

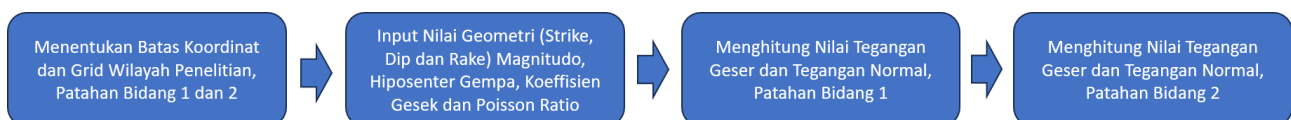
Dalam konsep ini, peningkatan nilai ΔCFS menunjukkan bahwa bidang sesar semakin mendekati kondisi gagal (*failure condition*), sehingga peluang terjadinya gempa susulan menjadi lebih besar. Sebaliknya, nilai negatif menunjukkan pelemahan potensi aktivitas seismik akibat berkurangnya tegangan pada bidang sesar. Perubahan tegangan geser dan tegangan normal diperoleh dari hasil simulasi distribusi deformasi kerak bumi yang dipicu oleh gempa utama.

Perhitungan deformasi permukaan akibat slip sesar dilakukan berdasarkan model dislokasi elastik Okada yang digunakan secara luas dalam studi deformasi tektonik. Model ini memungkinkan estimasi distribusi tegangan pada berbagai kedalaman kerak bumi. Dalam penelitian ini, analisis dilakukan pada kedalaman yang sesuai dengan konsentrasi hiposenter gempa susulan sehingga hubungan antara perubahan tegangan dan distribusi gempa dapat diamati secara lebih akurat. Hasil simulasi berupa peta distribusi perubahan *Coulomb Stress Change* yang menunjukkan zona peningkatan dan penurunan tegangan di sekitar sumber gempa.

Setelah diperoleh hasil pemodelan CSC, dilakukan analisis spasial menggunakan perangkat lunak *Geographic Information System* (GIS). Tahapan ini bertujuan untuk memetakan distribusi episenter gempa susulan terhadap zona perubahan tegangan *Coulomb*. Gempa susulan kemudian diklasifikasikan berdasarkan lokasi kemunculannya pada area dengan nilai ΔCFS positif maupun negatif. Analisis ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana transfer tegangan dari gempa utama berkontribusi terhadap pemicu aktivitas seismik lanjutan di wilayah Kepulauan Tanimbar.

Selain analisis spasial, penelitian ini juga melakukan analisis statistik sederhana terhadap hubungan antara jumlah gempa susulan dan nilai perubahan tegangan *Coulomb*. Distribusi frekuensi gempa susulan dibandingkan dengan nilai ΔCFS untuk mengetahui kecenderungan konsentrasi aktivitas gempa pada zona peningkatan tegangan. Hubungan tersebut dianalisis secara deskriptif untuk memperoleh interpretasi mengenai pola propagasi tegangan dan arah migrasi aktivitas seismik setelah gempa utama.

Validasi hasil penelitian dilakukan dengan membandingkan lokasi aktual gempa susulan dengan hasil simulasi CSC. Jika sebagian besar gempa susulan berada pada area dengan nilai ΔCFS positif, maka model transfer tegangan dianggap mampu menjelaskan mekanisme pemicu gempa susulan di wilayah penelitian. Sebaliknya, apabila distribusi gempa tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dengan zona peningkatan tegangan, maka faktor lain seperti heterogenitas batuan, fluida kerak bumi, dan kompleksitas struktur sesar dipertimbangkan sebagai pengontrol aktivitas seismik.



Gambar 2. Diagram Alir penelitian

Diagram alir pada Gambar 2 menggambarkan tahapan metodologi penelitian CSC untuk gempa Tanimbar 2023 secara sistematis. Proses dimulai dengan penentuan batas koordinat dan grid wilayah penelitian, termasuk lokasi dua bidang sesar utama. Grid ini menjadi kerangka spasial untuk perhitungan distribusi tegangan *Coulomb* di seluruh area penelitian.

Langkah berikutnya adalah memasukkan nilai geometri sesar, yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*, serta parameter gempa seperti magnitudo, hiposenter, koefisien gesek, dan rasio *Poisson*. Parameter ini menentukan orientasi dan arah slip sesar, sifat mekanik batuan, dan redistribusi energi akibat gempa.

Berdasarkan input tersebut, perhitungan dilakukan untuk menentukan tegangan geser dan tegangan normal pada masing-masing bidang sesar. Nilai tegangan ini menjadi dasar untuk menghitung perubahan tegangan *Coulomb* (ΔCFS) yang menunjukkan area dengan peningkatan atau penurunan risiko gempa susulan.

Tahap akhir menghasilkan peta distribusi tegangan *Coulomb* untuk kedua bidang sesar. Hasil ini memungkinkan analisis spasial terhadap interaksi sesar dan prediksi area yang lebih rentan terhadap gempa susulan. Diagram alir ini menekankan pendekatan kuantitatif berbasis model elastostatik yang sistematis, dari definisi wilayah hingga *output* distribusi tegangan, sehingga metodologi penelitian dapat direplikasi dan diterapkan pada studi gempa berikutnya.

Tabel 1. Variabel Gempa

Bidang Patahan	<i>Strike</i>	<i>Dip</i>	<i>Rake</i>	Hiposenter	Koefisien Gesek	Lintang	Bujur	Magnitudo
1	320°	56°	120°	105 km	0.4	7.059°S	130.009°E	7.6 Mw
2	95°	44°	54°	105 km	0.4	7.059°S	130.009°E	7.6 Mw

Tabel 1 menunjukkan variabel gempa yang digunakan dalam analisis perubahan tegangan *Coulomb* untuk dua bidang sesar di gempa Tanimbar 2023. Variabel yang disajikan meliputi geometri sesar, kedalaman hiposenter, sifat mekanik batuan, lokasi, dan magnitudo gempa. Untuk Bidang Patahan 1, nilai geometri ditentukan sebagai *strike* 320°, *dip* 56°, dan *rake* 120°, dengan hiposenter berada pada kedalaman 105 km. Koefisien gesek diasumsikan 0,4. Titik ini berada pada 7.059°S dan 130.009°E dengan magnitudo 7,6 Mw. Bidang Patahan 2 memiliki geometri berbeda, yakni *strike* 95°, *dip* 44°, dan *rake* 54°. Namun, hiposenter, koefisien gesek, koordinat, dan magnitudo sama dengan bidang 1.

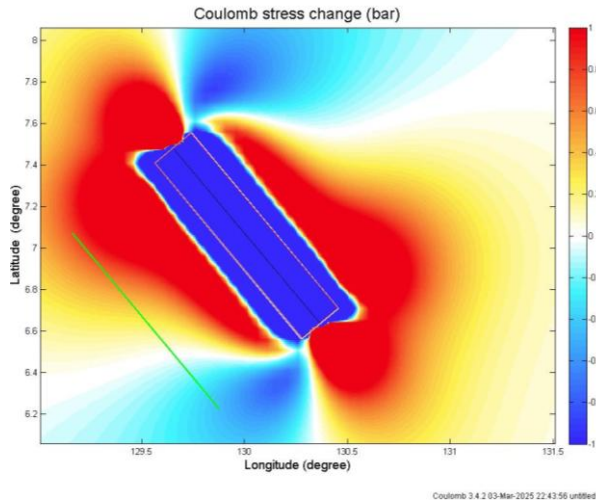
Tabel ini menunjukkan bahwa meskipun kedua bidang sesar berada pada lokasi yang sama secara geografis dan pada kedalaman yang sama, orientasi geometris berbeda, sehingga redistribusi tegangan *Coulomb* di sekitar setiap sesar akan bervariasi. Perbedaan *strike*, *dip*, dan *rake* ini penting karena menentukan arah dan intensitas slip sesar yang memengaruhi pola tegangan positif dan negatif pada peta *Coulomb Stress Change*. Koefisien gesek yang sama mengasumsikan sifat batuan konsisten di kedua bidang, sehingga perbedaan distribusi tegangan lebih dipengaruhi oleh orientasi sesar.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai karakteristik transfer tegangan pada Gempa Kepulauan Tanimbar 2023 serta kontribusinya terhadap distribusi gempa susulan. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam pengembangan mitigasi bencana gempa bumi di Indonesia bagian timur, khususnya dalam identifikasi zona yang berpotensi mengalami peningkatan aktivitas seismik setelah terjadinya gempa besar.

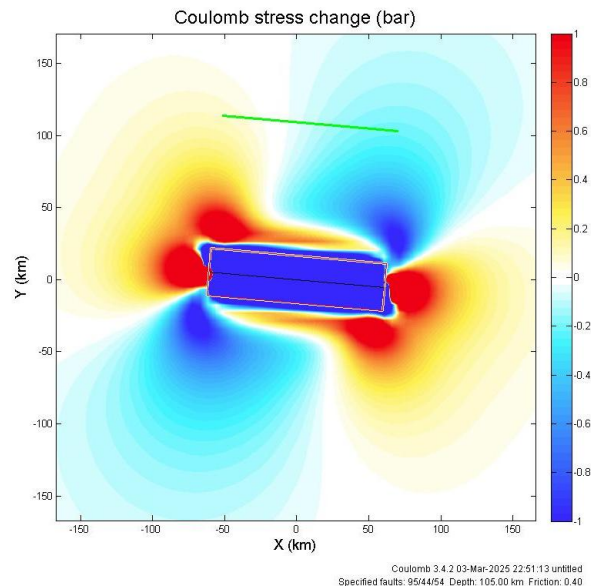
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian studi efektivitas redistribusi tegangan setelah gempa besar, perubahan tegangan *Coulomb* (ΔCFS – *Coulomb Failure Stress*) dipandang sebagai indikator utama yang

menunjukkan area mana yang mengalami peningkatan stres (mendorong terjadinya gempa susulan) versus penurunan stres (menghambat terjadinya gempa) (Coudurier & Singh, 2021). Gambar *fault plane* 1 dan *fault plane* 2 yang berasal dari model USGS (Gambar 2.a dan 2.b) merepresentasikan perbedaan geometris dan nilai ΔCFS pada bidang sesar dengan bingkai koordinat yang berbeda (geografis vs. lokal). Perbedaan ini menghasilkan perubahan *Coulomb stress* yang berbeda juga.



Gambar 2.a. Sebaran Coulomb Stress bidang Patahan 1



Gambar 2.b. Sebaran Coulomb Stress bidang Patahan 2

Kedua peta (Gambar 2.a dan 2.b) menunjukkan pola bipolar ΔCFS khas: area merah (positif) di sekitar *plane* sesar yang menunjukkan peningkatan tegangan setelah slip utama, dan area biru (negatif) yang menunjukkan penurunan tegangan yang biasanya terjadi pada sisi berlawanan dari gaya slip (Melani dkk., 2024). Pada *fault plane* 1, peta diplot dalam koordinat geografis (longitude-latitude) yang mempermudah melihat distribusi tegangan relatif terhadap lokasi nyata di wilayah Tanimbar. Sementara pada *fault plane* 2, peta diplot dalam kerangka lokal (X-Y dalam kilometer) yang menunjukkan distribusi nilai ΔCFS secara simetris terhadap sumber sesar berdasarkan model elastostatik.

Pada kedua visualisasi, zona ΔCFS positif memanjang paralel dengan sumbu sesar, konsisten dengan teori transfer tegangan statis di mana slip pada satu segmen menaikkan tegangan pada segmen lanjutannya (Pranantyo dkk., 2021). Area merah di sisi utara dan selatan dari *plane* pada kedua peta memiliki konsistensi spasial, menunjukkan bahwa analisis kedua model menangkap arah dominan rekonstruksi stres yang sama meskipun dalam sistem koordinat yang berbeda. Hal ini sesuai dengan hasil studi global yang menegaskan bahwa perubahan tegangan *Coulomb* (ΔCFS) akibat gempa besar cenderung memicu gempa kecil hingga menengah pada segmen yang paralel dan komplementer (Vidya dkk., 2026).

Perbedaan paling mencolok antara kedua peta adalah skala resolusi dan orientasi pola ΔCFS . *Fault plane* 1 memperlihatkan pembesaran area ΔCFS dalam konteks geografis—misalnya, dampak yang meluas hingga ratusan kilometer dalam arah lintang-bujur. Pola ini mendemonstrasikan dampak regional gempa Tanimbar dalam meredistribusikan tegangan di seluruh blok tektonik lokal. Adapun *fault plane* 2, karena diplot dalam grid lokal terhadap

sumbu X dan Y, memperlihatkan pola lobes merah dan biru yang lebih simetris serta mencerminkan efek geometris slip pada kedalaman sumber sejak depth dan friction parameter yang sama diterapkan sembari mengabaikan proyeksi geografis. Pendekatan ini sering dipakai dalam kajian lokalisasi perubahan stres tanpa keterkaitan fisiografis langsung.

Kedua peta konsisten menunjukkan bahwa area positif ΔCFS tidak selalu berada langsung di sepanjang garis sesar, tetapi bisa terjadi di luar plane tergantung pada orientasi slip, sudut sesar, dan gaya regional. Hal ini konsisten dengan temuan Meilano dkk. (2021) yang menunjukkan bahwa metafisika tegangan dapat menghasilkan area peningkatan tegangan jauh dari sumber utama bila struktur bawah permukaan kompleks.

Secara aplikatif, kedua set visualisasi menyiratkan bahwa segmen sesar di timur laut dan barat daya dari sumber gempa memiliki potensi peningkatan tegangan yang lebih tinggi, yang sesuai dengan pola gempa susulan yang umum diamati dalam 6–12 bulan pertama pasca gempa besar (Melani dkk., 2024). Ini relevan dalam manajemen risiko seismik, di mana model ΔCFS dipakai untuk memetakan kemungkinan akumulasi stres pada segmen lain yang dianggap rawan.

Pada ujungnya, kesamaan fundamental yang ditunjukkan oleh kedua peta adalah keberadaan pola bipolar $\pm$ nilai ΔCFS yang mencerminkan redistribusi tegangan akibat slip sesar besar, sedangkan perbedaannya adalah referensi koordinat dan representasi spasial yang berbeda—geografis pada *fault plane* 1 dan kerangka X-Y lokal pada *fault plane* 2. Kedua pendekatan saling melengkapi dalam memahami dampak gempa beserta implikasi tegangan terhadap risiko gempa susulan di wilayah Tanimbar.

Hasil pemodelan CSC menunjukkan bahwa sebagian besar gempa susulan pascagempa utama Kepulauan Tanimbar 2023 terkonsentrasi pada zona yang mengalami peningkatan nilai ΔCSC (ΔCSC positif). Distribusi spasial gempa susulan memperlihatkan kecenderungan mengikuti arah memanjang zona tegangan positif yang terbentuk di sekitar bidang sesar utama, terutama pada segmen timur laut dan barat daya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pelepasan tegangan akibat gempa utama telah menyebabkan redistribusi tegangan statis ke area di sekitarnya sehingga meningkatkan peluang terjadinya kegagalan batuan pada sesar-sesar yang telah berada dalam kondisi kritis. Sebaliknya, wilayah yang berada pada zona ΔCSC negatif menunjukkan jumlah gempa susulan yang relatif lebih sedikit, karena penurunan tegangan menyebabkan berkurangnya kemungkinan terjadinya reaktivasi sesar. Pola tersebut sejalan dengan teori transfer tegangan *Coulomb* yang menyatakan bahwa peningkatan tegangan efektif pada suatu bidang sesar akan mempercepat terjadinya kegagalan apabila orientasi sesar dan kondisi tegangan regional mendukung.

Kesesuaian antara pola distribusi gempa susulan dengan zona ΔCSC positif menunjukkan bahwa metode CSC memiliki kemampuan yang baik dalam mengidentifikasi wilayah yang berpotensi mengalami aktivitas seismik lanjutan setelah gempa utama. Temuan ini memperkuat hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa sebagian besar gempa susulan cenderung terjadi pada daerah yang mengalami peningkatan tegangan Coulomb, meskipun tidak semua gempa susulan harus berada tepat pada nilai ΔCSC maksimum karena masih dipengaruhi oleh kompleksitas struktur geologi, heterogenitas batuan, tekanan fluida pori, serta keberadaan sesar-sesar minor yang tidak seluruhnya terakomodasi dalam model elastostatik. Oleh karena itu, peta CSC tidak hanya berfungsi sebagai alat untuk menjelaskan mekanisme transfer tegangan pascagempa, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar

dalam pemetaan zona prioritas mitigasi, penentuan wilayah yang memerlukan pemantauan seismik intensif, serta evaluasi potensi bahaya gempa susulan di wilayah Kepulauan Tanimbar.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis Coulomb Stress Change pada *fault plane* 1 dan *fault plane* 2, gempa utama Kepulauan Tanimbar 2023 menghasilkan pola perubahan tegangan bipolar, yaitu zona Δ CSC positif dan negatif. Peningkatan tegangan terutama terlihat pada segmen utara–timur laut dan barat daya dari sumber gempa. Distribusi gempa susulan cenderung berada pada atau di sekitar zona Δ CSC positif, yang menunjukkan bahwa peningkatan tegangan akibat gempa utama berperan dalam memicu aktivitas seismik lanjutan. Namun, persebarannya juga dipengaruhi oleh geometri sesar, kondisi batuan, dan kompleksitas tektonik setempat. Oleh karena itu, peta Δ CSC dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona yang memerlukan pemantauan lebih intensif serta mendukung mitigasi bahaya gempa susulan di wilayah Tanimbar.

Daftar Pustaka

- An, Q., Zhang, Y., Wang, H., Li, Z., Chen, J., Xu, C., & others. (2023). Three-dimensional coseismic deformation of the 2023 Mw 7.8 Türkiye earthquake sequence using multi-sensor data. *Remote Sensing*, 15(10), 2656. <https://doi.org/10.3390/rs15102656>.
- Banyunegoro, V. H., Alatas, Z. A., Yudistira, T., & others. (2019). Probabilistic seismic hazard analysis for Aceh region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 273, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/273/1/012015>.
- Coudurier-Curveur, A., & Singh, S. C. (2021). Timor collision front segmentation reveals potential for great earthquakes in the western Outer Banda Arc, eastern Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, 9, 640928. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.640928>.
- Ding, H., Zhou, Y., Ge, Z., Taymaz, T., Ghost, A., Xu, H., Irmak, T. S., & Song, X. (2023). High-resolution seismicity imaging and early aftershock migration of the 2023 SE Türkiye Mw 7.9 & 7.8 earthquake doublet. *Earthquake Spectra*, 26(6), 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2023.06.002>.
- Kobayashi, H., Koketsu, K., Miyake, H., Takai, N., Shigefuji, M., Bhattarai, M., & Sapkota, S. N. (2016). Joint inversion of teleseismic, geodetic, and near-field waveform datasets for rupture process of the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0441-1>.
- Maletckii, B., Astafyeva, E., Sanchez, S. A., Kherani, E. A., & de Paula, E. R. (2023). The 6 February 2023 Türkiye earthquake sequence as detected in the ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(9), e2023JA031663. <https://doi.org/10.1029/2023JA031663>
- Meilano, I., Salman, R., Rahmadani, S., Shi, Q., Susilo, S., Lindsey, E., Supendi, P., & Daryono, D. (2021). Source characteristics of the 2019 Mw 6.5 Ambon, Eastern Indonesia, earthquake inferred from seismic and geodetic data. *Seismological Research Letters*, 92(6), 3339–3348. <https://doi.org/10.1785/0220210021>.
- Melani, P., Prastowo, T., & Realita, A. (2024). Analisis seismisitas Maluku dan Barat Papua berdasarkan distribusi frekuensi magnitudo gempa. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(2), 25–36. <https://doi.org/10.26740/ifi.v13n2.p25-36>.

- Mokodenseho, S., Hasrullah, Mokodompit, M., Salinsehe, J., & Paputungan, N. (2023). Analisis Geologis Gempa di Cianjur : Karakteristik Seismik, Zona Patahan, dan Peran Geologi dalam Penilaian Risiko Gempa. *Jurnal Geosains West Science*, 1(2), 96–104. <https://doi.org/10.58812/jgws.v1i02.420>.
- Pranantyo, I. R., Mohammad, H., & Cummins, P. R. (2021). Complex tsunami hazards in eastern Indonesia from seismic and non-seismic sources: Deterministic modelling based on historical and modern data. *Geoscience Letters*, 8(1), Article 20. <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00190-y>.
- Sutrisno, S., Tjahjono, A., & Putra, F. R. (2023). Analysis of return period and seismic risk of shallow earthquake occurrence in Cianjur and surrounding areas. *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, 9(2), 109–116. <https://doi.org/10.21580/jnsmr.2023.9.2.18098>.
- Thapa, D. R. (2023). Ground motion characteristics of the 2015 Central Nepal and the 2023 SE Turkey earthquake doublets. *Journal of Nepal Geological Society*, 66(01), 131–136. <https://doi.org/10.3126/jngs.v66i01.57958>.
- Vidya, D. P., Virtriana, R., Meilano, I., Raharja, R., Attar S, M. N. A., & Atmaja, F. W. (2026). Taxonomy-driven exposure mapping for earthquake risk assessment in the active tectonic setting of Eastern Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 13(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40677-026-00371-x>.
- Xiong, J., Chen, C., Cao, J., Wang, J., & Liu, X. (2023). Co-seismic deformation for the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake using near-field GPS data. *Geodesy and Geodynamics*, 14(5), 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.07.001>.