

## Studi Pergeseran Koseismik Gempa Pasaman M6.1 2022 Menggunakan Data Pengamatan GPS Harian

*Coseismic Displacement Study of M6.1 2022 Pasaman Earthquake Using daily GPS Observation*

Putra Maulida\*<sup>1</sup>, Putra Rizkiya<sup>2</sup>, Akbar Kurniawan<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Departemen Teknik Geomatika, FTSLK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

\*Korespondensi penulis: putra@its.ac.id

Diterima: 19092022; Diperbaiki: 23092022; Disetujui: 24092022; Dipublikasi: 01102022

**Abstrak:** Sesar Sumatra merupakan patahan aktif yang telah menyebabkan banyak gempa di sepanjang Pulau Sumatra dalam 15 tahun terakhir. Sesar Sumatra terbagi menjadi segmen-segmen yang memanjang dari utara hingga selatan Pulau Sumatra. Setelah gempa besar pada zona subduksi M9.2 Sumatra-Andaman pada tahun 2004, banyak gempa-gempa yang terjadi di sepanjang Sumatra bagian barat. Beberapa gempa ini belum terdefinisi sebelumnya pada sumber gempa di Indonesia terutama dengan sumber di daratan. Gempa Pasaman M6.1 pada tanggal 25 Februari 2022 merupakan salah satu gempa yang belum diketahui sebelumnya. Gempa dengan mekanisme sesar geser ini telah menyebabkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur di kota Pasaman, Sumatra Barat. Kami menggunakan data pengamatan dari stasiun GPS yang telah terpasang di barat Sumatra untuk menganalisis pergeseran yang diakibatkan oleh gempa ini. Data pengamatan GPS diolah dengan menggunakan perangkat lunak GAMIT-GLOBK untuk menghasilkan koordinat harian. Selanjutnya dengan menggunakan deret waktu harian, kami mengestimasi pergeseran akibat gempa Pasaman M6.1. Pergeseran sebesar 17 mm ke arah tenggara terekam pada stasiun CPSM yang terletak 27 km dari epicenter gempa, sedangkan pada stasiun lainnya tidak ditemukan pergeseran yang signifikan. Pada komponen vertikal tidak ditemukan pergeseran menunjukkan bahwa gempa ini murni sesar geser. Hasil analisis dari rentetan *foreshock* dan *aftershock* dengan magnitudo lebih besar dari 4.5 menunjukkan bahwa pergeseran dari data harian tidak terkontaminasi oleh gempa-gempa susulan setelah gempa utama dikarenakan pengaruhnya yang tidak signifikan. Hasil perbandingan pemodelan menggunakan model *half-space* dan data stasiun CPSM menunjukkan adanya potensi deformasi susulan yang dipicu oleh *postseismic* beberapa jam setelah gempa ini terjadi. Pergeseran koseismik dari data hariannya ini tidak menutup kemungkinan terpengaruh juga deformasi lokal lainnya.

Copyright © 2022 Geoid. All rights reserved.

**Abstract:** The Sumatran fault is an active fault that has caused many earthquakes along the Sumatra Island in the last 15 years. The Sumatran fault is divided into many segments extending north to south of Sumatra Island. After the occurrence of megathrust earthquake M9.2 Sumatra-Andaman in 2004 in subduction zone, many earthquakes occurred along the western Sumatra. Some of these earthquakes have not been previously defined at earthquake sources in Indonesia, especially inland earthquakes. The M6.1 Pasaman earthquake on February 25, 2022, was one of the previously unknown earthquakes. This earthquake with a strike-slip fault mechanism has caused casualties and damage to the infrastructure in the Pasaman City, West Sumatra. We utilized observation data from GPS stations installed in western Sumatra to analyze the displacement caused by the earthquake. GPS observation data is processed using GAMIT-GLOBK software to generate daily coordinates. Furthermore, we estimate the displacement due to the M6.1 Pasaman earthquake using the daily time series. A displacement of 17 mm to the southeast recorded at the CPSM station, which is located 27 km away from the epicenter of the earthquake, while at other stations, no significant displacement was found. There is not significant displacement was found in the vertical component either, indicating that this earthquake was a purely strike slip. The analysis of the foreshock and aftershock sequences with a magnitude greater than 4.5 indicate that aftershocks do not contaminate the shift of the estimation of the coseismic displacement based on the daily time series due to their insignificant effect. The comparison of the modeling using the half-space model and CPSM station data indicate that the potential for subsequent deformation triggered by postseismic a few hours after this earthquake occurred. The coseismic displacement of the daily data does not rule out the possibility of being affected by other local deformations.

Kata kunci: Gempa Pasaman, GPS, Pergeseran Koseismik

Cara untuk sitasi: Maulida, P., Kurniawan, A., & Rizkiya, P. (2022). Studi Pergeseran Koseismik Gempa Pasaman M6.1 2022 Menggunakan Data Pengamatan GPS Harian. *Geoid*, 18(1), 176-184.

## Pendahuluan

Pulau Sumatra memiliki aktivitas tektonik yang cukup tinggi akibat zona konvergensi lempeng Hindia-Australia dan lempeng Sunda di sebelah barat. Kejadian gempa besar telah banyak melanda Pulau Sumatra dalam 20 tahun terakhir. Sejak terjadinya gempa M9.2 Sumatra-Andaman pada tahun 2004 yang mengakibatkan lebih dari 300000 jiwa kematian di sepanjang Lautan Hindia, aktivitas kegempaan yang signifikan banyak dirasakan. Gempa Sumatra-Andaman mengakibatkan sobekan pada zona subduksi sepanjang 1200 km dalam durasi 515 detik. Ini merupakan gempa dengan durasi terlama dan terbesar yang terekam jaringan seismik modern (Bilham dkk., 2005; Ammon dkk., 2005). Selang beberapa bulan kemudian terjadi gempa besar di sisi selatan sobekan ini yaitu gempa Nias M8.6 2005 yang mengakibatkan getaran hingga ke pantai timur Sumatra (Briggs dkk., 2006). Beberapa gempa besar lainnya juga terjadi seperti gempa Bengkulu M8.4 pada tahun 2007, gempa Mentawai M7.8 pada tahun 2010 dan gempa Samudra-Hindia M8.6 dan M8.2 pada tahun 2012 (Konca dkk., 2008; Hill dkk., 2012; Wei dkk., 2013). Berdasarkan katalog gempa dari *Advanced National Seismic System* (ANSS), telah terjadi kenaikan frekuensi gempa terutama dengan magnitudo  $> 6$  setelah gempa *megathrust* pada tahun 2004 baik di zona subduksi maupun gempa di daratan Sumatra. Peningkatan aktivitas kegempaan ini dipicu oleh stress yang dilepaskan oleh gempa Sumatra-Andaman (Cattin dkk., 2009; Qiu dan Chan, 2019).

Sumber gempa bumi di Pulau Sumatra bukan hanya berasal dari zona subduksi di sepanjang pantai barat Sumatra, namun juga dari sesar Sumatra yang memanjang dari utara hingga selatan. Zona konvergensi Indian-Australian dan Lempeng Sunda yang bersifat *oblique* berimplikasi pada adanya dorongan pada komponen paralel dan tegak lurus dengan *trench*. Komponen tegak lurus diakomodasi oleh zona subduksi sedangkan komponen paralel tumbukan diakomodasi oleh sesar Sumatra dengan mekanisme sesar geser mengangan (McCaffrey, 2009). Sesar ini terbagi menjadi 19 segmen yang memiliki *slip* yang bervariasi. Beberapa gempa besar di sesar Sumatra yang terjadi di setelah tahun 2004 dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Beberapa gempa  $M > 6$  di sesar Sumatra setelah tahun 2004

Gempa	Provinsi	Penulis
2007 M6.4 dan M6.3 Singkarak	Sumatra Barat	Daryono dkk. (2012)
2013 M6.1 Tanah Gayo	Aceh	Gunawan dkk., (2018)
2016 M6.6 Pidie jaya	Aceh	Muzli dkk., (2018)

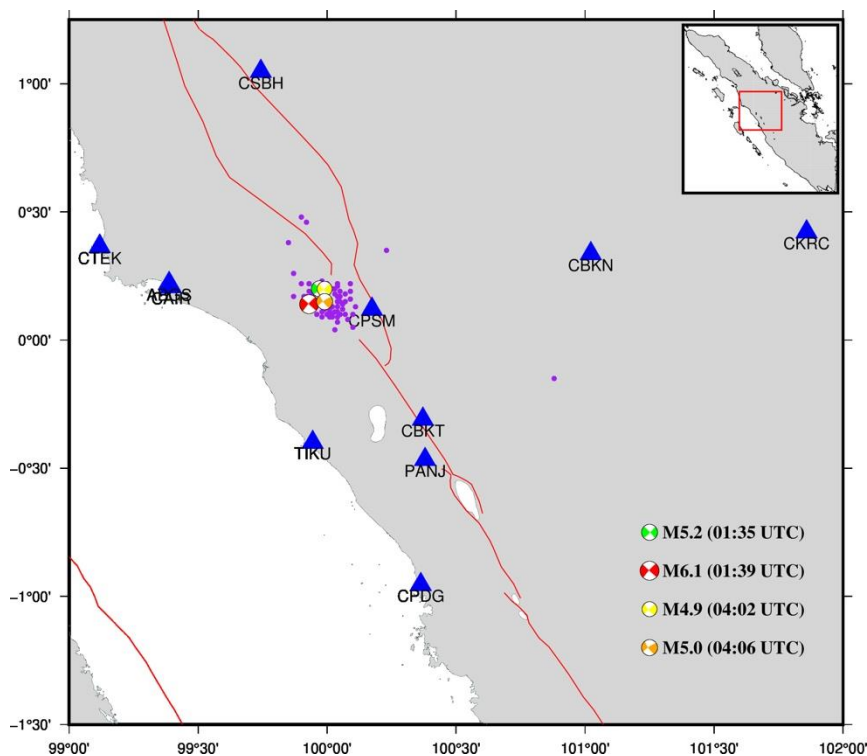
Gempa-gempa yang terjadi di sesar sumatra telah banyak menimbulkan korban terutama di kawasan padat penduduk. Kerugian dialami baik dari segi materiil maupun non-materiil. Salah satu kegiatan pengurangan risiko bencana yang dilakukan adalah pendefinisian sumber gempa bumi di Indonesia oleh Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen). Secara umum, struktur geologi digunakan untuk memetakan sesar lokal. Selanjutnya, kejadian gempa bumi merupakan salah satu gambaran aktivitas sesar. Namun, beberapa gempa di Pulau Sumatra belum terdefiniskan sumbernya dan belum didokumentasikan dengan baik sebelumnya akibat tidak adanya catatan aktivitas seismik di masa lampau. Sebagai contoh adalah gempa M6.6 Pidie Jaya di utara Sumatra (Gunawan dkk., 2020). Kejadian gempa ini mengakibatkan kematian bagi 102 orang, dan lebih dari 7000 bangunan rusak serta kerugian hingga milyaran rupiah pada tahun 2016.

Pada tanggal 25 Februari 2022, tepatnya pada pukul 01:38 UTC (08:39 WIB) terjadi gempa dengan magnitudo 6.1 di Sumatra bagian tengah. Guncangan dengan intensitas skala V MMI dirasakan di kota Pasaman yang terletak cukup dekat dengan epicenter gempa. Peristiwa ini menyebabkan korban jiwa sebanyak 7 orang dan puluhan korban luka-luka, serta kerusakan 1765 bangunan. Gempa ini didahului oleh gempa *foreshock* M5.1 empat menit sebelumnya. Empat jam setelah terjadinya gempa juga terekam gempa susulan M4.9 dan M5.1. Sebaran gempa utama dan susulan menunjukkan bahwa gempa ini terjadi pada sesar yang belum terdefiniskan pada dokumen gempa nasional, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut terkait dengan gempa ini.

Pada studi ini, kami menggunakan data pengamatan jaringan GPS kontinyu yang telah terpasang di Pulau Sumatra. Data pengamatan GPS telah digunakan secara luas untuk menghitung pergeseran akibat gempa bumi di zona subduksi (Feng dkk., 2015). Hasil pengolahan data pengamatan GPS akan digunakan untuk mengestimasi pergeseran yang diakibatkan oleh Gempa Pasaman M6.1. Analisis ini diharapkan dapat menjadi langkah awal untuk memahami kejadian-kejadian gempa yang sumbernya tidak terdefiniskan sebelumnya. Selanjutnya, penelitian ini diharapkan dapat menjadi bagian dari upaya pengurangan risiko bencana di masa depan.

## Data dan Metode

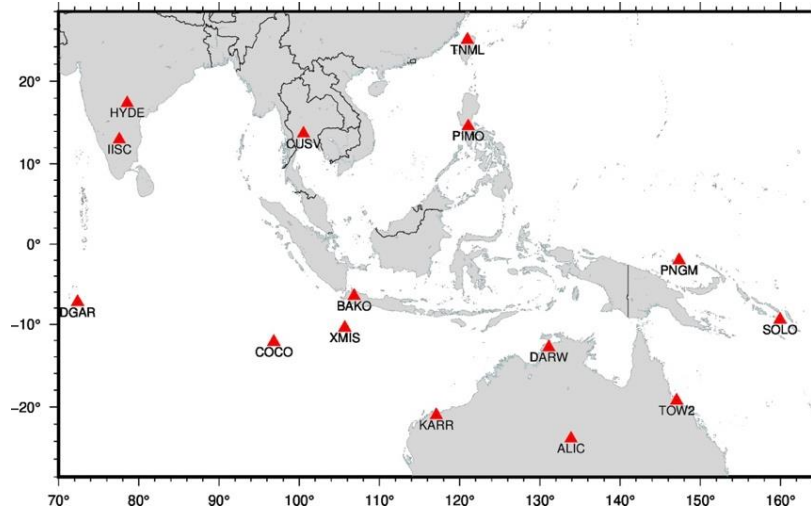
Pulau Sumatra sangat rentan terhadap gempa bumi, baik bersumber di lautan lepas maupun daratan. Sumber gempa bumi di Pulau Sumatra berasal dari zona subduksi baik pada kedalaman dangkal maupun dalam, Sesar Sumatra dan gempa dari aktivitas vulkanik (McCaffrey, 2009). Untuk mengantisipasi aktivitas tektonik ini, telah banyak dipasang jaringan pengamatan GPS maupun seismik. Badan Informasi Geospasial (BIG) dalam 3 tahun terakhir ini telah menambah distribusi jaringan dari utara hingga selatan Sumatra yang disebut sebagai jaringan INACORS. Sebagai tambahan, stasiun pengamatan GPS juga telah dipasang oleh *Earth Observatory of Singapore* (EOS) bekerja sama dengan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang disebut sebagai stasiun *Sumatran GPS Array* (SuGAR). Stasiun SuGAR telah banyak digunakan untuk mengkaji aktivitas kegempaan di Sumatra sejak 2002 hingga sekarang (Gunawan dkk, 2016; Feng dkk, 2015). Kami menggunakan stasiun pengamatan GPS yang terletak berdekatan dengan pusat gempa Pasaman M6.1 yaitu stasiun CTEK, CSBH, CAIR, CPSM, CBKT, PANJ, CBKN, CKRC, CPDG milik BIG, serta TIKU dan ABGS yang merupakan jaringan SuGAR. Lokasi dari stasiun pengamatan GPS dan pusat gempa dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Posisi dari stasiun GPS (segitiga warna biru). Garis merah mengacu kepada segmen sesar Sumatra di Sumatra Barat. Titik berwarna ungu merupakan sebaran gempa dalam 7 hari sejak 25 Februari 2022.

Kami menggunakan data pengamatan GPS sejak 1 Januari 2022 hingga 7 hari setelah terjadinya gempa. Hasil dan ketelitian dari pengolahan GPS sangat bergantung kepada strateginya. Strategi pengolahan yang mencapai akurasi hingga orde milimeter (mm) tentunya akan berbeda dengan strategi pada pengolahan GPS dengan

ketelitian centimeter (cm). Pada penelitian ini, kami menggunakan perangkat lunak GAMIT-GLOBK versi 10.71 untuk mengestimasi koordinat stasiun pengamatan dalam ITRF 2014 (Herring dkk, 2008). Data pengamatan RINEX diolah menggunakan data *final precise orbit* sebagai informasi orbit teliti. Selanjutnya koreksi ionosfer orde kedua menggunakan data IONEX. VMF1 digunakan untuk meningkatkan akurasi hasil pengolahan dibandingkan dengan menggunakan model standar yang telah tersedia. Selanjutnya kami menggunakan titik ikat dengan distribusi cukup merata yang terletak di sekitar stasiun pengamatan. Sebaran dari titik ikat dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi titik ikat (IGS)

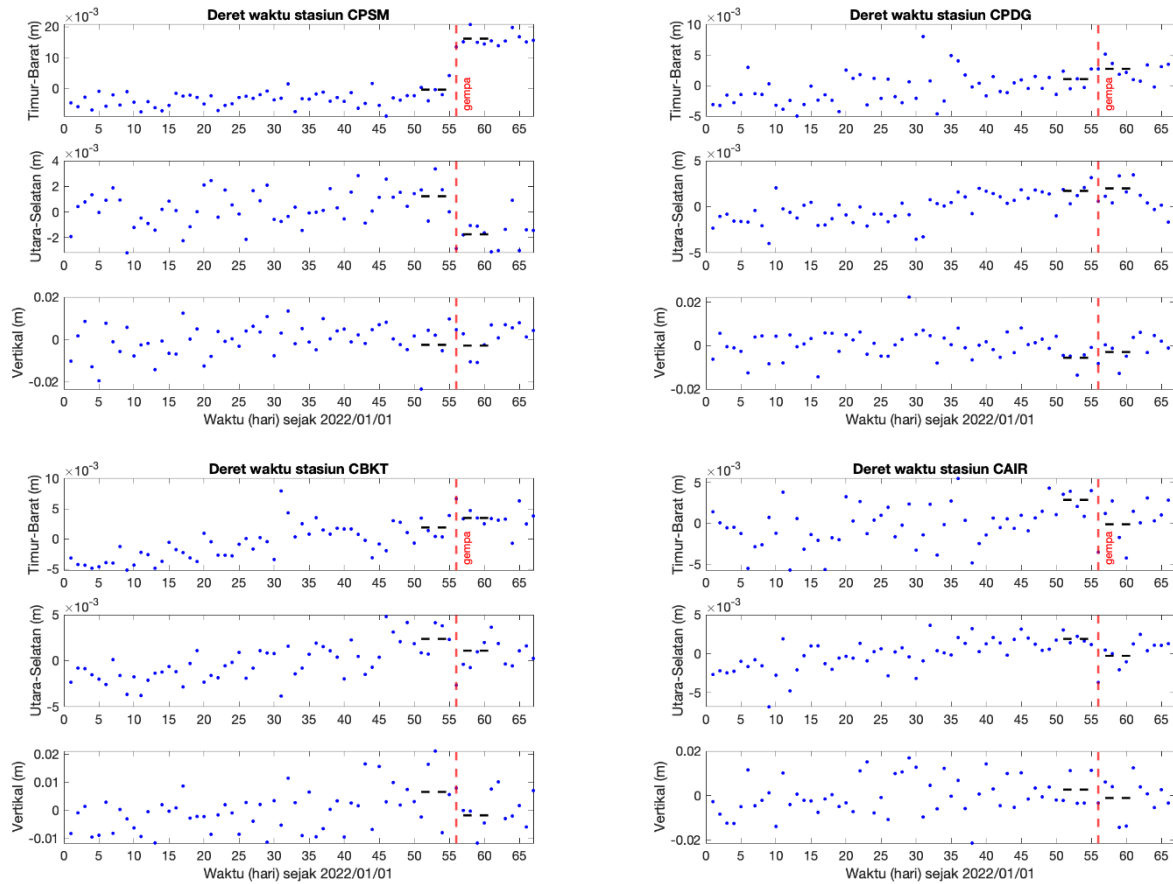
Efek gempa yang terekam dengan baik pada stasiun GPS adalah berupa pergeseran. Pergeseran akibat gempa bumi sangat bergantung pada orientasi dari geometri sumber gempa serta posisi relatif stasiun. Kami mengestimasi pergeseran akibat gempa Pasaman M6.1 menggunakan perbedaan rata-rata posisi GPS lima hari sebelum dan setelah gempa. Kami menggunakan metode ini daripada melakukan regresi linier karena data pengamatan setelah dan sebelum gempa memiliki durasi yang tidak sama. Selain itu, dalam melakukan regresi pengaruh dari pergerakan gempa yang tidak diakomodasi oleh model dapat mempengaruhi hasil estimasi.

Sebagai data tambahan, kami menggunakan sebaran-sebaran gempa (*aftershocks*) dengan durasi waktu yang serupa dengan data pengamatan GPS setelah terjadinya gempa. Data gempa ini dapat diperoleh dari situs Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Sebaran gempa menunjukkan kumpulan gempa yang dipicu oleh aktivitas gempa utama, meski sangat sulit untuk menjelaskan bidang sobekan gempa dari data tersebut akibat ketelitian estimasi epicenter gempa susulan. Untuk informasi orientasi bidang gempa, kami menggunakan data *centroid moment tensor* (CMT) dari BMKG.

## Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengolahan data GPS, kami membuat deret waktu setiap stasiun sejak *day of year* (doy) 001 hingga doy 064. Deret waktu koordinat stasiun ditampilkan dalam koordinat toposentrik untuk merepresentasikan pergerakan sebenarnya pada bumi fisik. Deret waktu sebagian stasiun GPS dapat dilihat pada Gambar 3. Pergeseran stasiun GPS menunjukkan pergerakan titik pengamatan sebelum dan sesudah terjadinya gempa. Sebelum terjadinya gempa, tren dari pergeseran stasiun menunjukkan arah timur-laut. Pergerakan ini didominasi oleh gerakan sekular yang dipengaruhi oleh pergerakan blok. Selain itu, efek dari fase interseismik dan postseismik setelah terjadinya gempa mungkin terekam pada durasi ini. Beberapa gempa besar terjadi di utara pulau Sumatra seperti gempa M8.6 Samudra Hindia mempengaruhi titik yang jaraknya cukup jauh (Pratama dkk, 2018). Meskipun gempa ini cukup jauh dari posisi stasiun, efek koseismik terekam hingga mencapai Pulau Jawa dalam orde  $\sim$ mm (Gunawan dkk, 2016). Selain itu potensi efek pasca gempa akibat gempa M8.4 Bengkulu 2007 dan M7.8 Mentawai 2010 juga terekam pada sebagian GPS di Sumatra bagian tengah (Feng, 2016). Pada penelitian ini, kami tidak akan terlalu fokus pada kejadian sebelum gempa Pasaman.

Efek pascagempa besar ini dapat diabaikan karena dalam perhitungan pergeseran gempa Pasaman, kami hanya menggunakan data pengamatan 10 hari. Efek *postseismic* sangat kecil pada durasi tersebut.



Gambar 3. Deret waktu stasiun pengamatan GPS: CPSM, CPDG, CBKT dan CAIR. Garis merah menunjukkan waktu terjadinya gempa rentetan gempa Pasaman.

Pergeseran akibat rentetan gempa Pasaman dapat dilihat pada Gambar 4. Pergeseran hanya terdeteksi terutama pada stasiun yang terletak cukup dekat dengan epicenter gempa. Besarnya pergeseran koseismik gempa dapat dilihat pada Tabel 2. Pada stasiun CPSM terdeteksi pergeseran horizontal mencapai 17 mm ke arah tenggara, sedangkan pada stasiun GPS lainnya pergeseran yang diperoleh hanya mencapai orde 3 mm. Pergeseran yang dideteksi pada stasiun lainnya cukup kecil dibandingkan dengan ellips kesalahan. Ini menyebabkan sangat sulit untuk menyatakan bahwa adanya pergeseran pada stasiun tersebut. Pada stasiun CPSM diperoleh pergeseran yang signifikan. Stasiun ini berada di kota Pasaman dan berjarak 27 km dari epicenter gempa utama. Berdasarkan data CMT, Jika dilihat dari tren pergeseran koseismik gempa, ini dapat terjadi dengan orientasi *strike* yaitu  $132.1^\circ$  dengan mekanisme sesar geser mengangan.

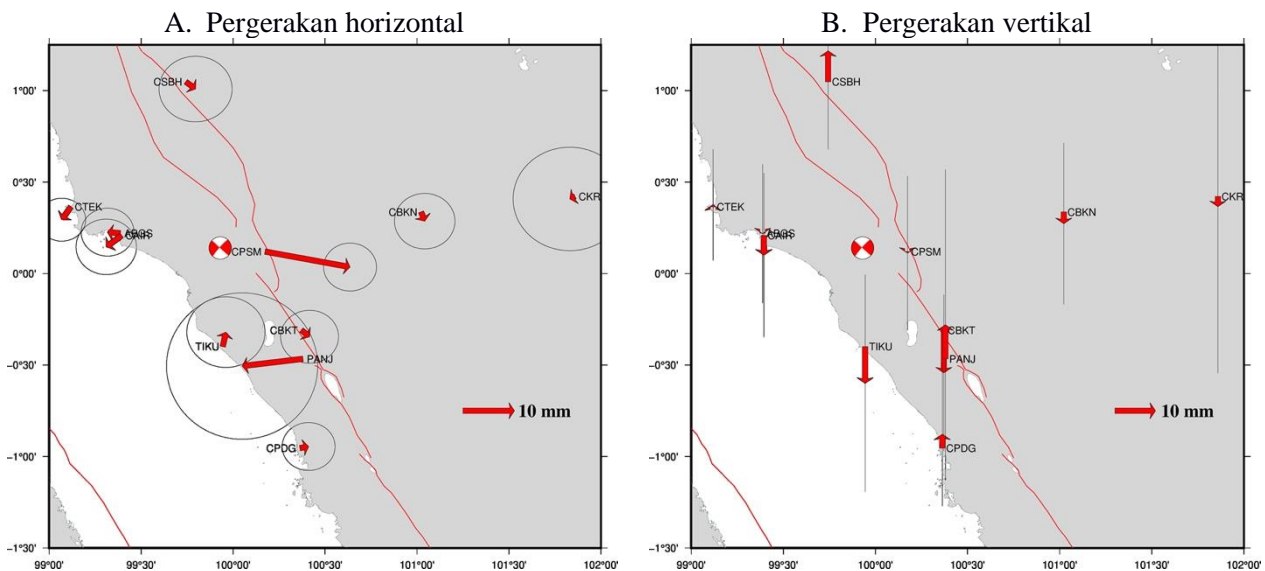
Pada komponen vertikal tidak ditemukan pergeseran yang signifikan. Jika pada komponen horizontal, stasiun CPSM memperlihatkan tren pergeseran, maka pada komponen vertikal diperoleh bahwa pergeseran pada titik ini lebih kecil dari 1 mm. Sehingga kami menyatakan bahwa tidak ada pergeseran yang signifikan pada komponen vertikal akibat gempa Pasaman. Hal ini menunjukkan bahwa gempa ini merupakan gempa dengan mekanisme murni sesar geser. Berdasarkan data CMT diketahui bahwa *dip* gempa adalah  $89^\circ$ , sehingga sulit untuk menghasilkan pergerakan vertikal. Besarnya displacement akibat rentetan gempa ini dapat dilihat pada Tabel 2.



Tabel 2. Pergeseran koseismik akibat gempa Pasaman

Stasiun	Bujur	Lintang	dE (m)	dN (m)	dU (m)	sdE (m)	sdN (m)	sdU (m)
ABGS	99.388	0.221	-0.003	0.000	0.000	0.002	0.002	0.006
CAIR	99.395	0.208	-0.003	-0.002	-0.004	0.002	0.002	0.007
CBKN	101.022	0.337	0.001	-0.002	-0.002	0.002	0.002	0.006
CBKT	100.371	-0.309	0.002	-0.001	-0.008	0.002	0.002	0.006
CDRI	101.192	1.267	-0.002	-0.001	-0.002	0.003	0.002	0.007
CKRC	101.859	0.422	-0.001	-0.001	-0.002	0.005	0.004	0.013
CPDG	100.363	-0.954	0.002	0.000	0.003	0.002	0.002	0.006
CPSM	100.174	0.120	0.017	-0.003	0.000	0.002	0.002	0.006
CSBH	99.743	1.048	0.002	-0.001	0.006	0.003	0.003	0.008
CTEK	99.119	0.365	-0.002	-0.003	0.000	0.002	0.002	0.004
PANJ	100.380	-0.466	-0.012	-0.001	0.007	0.006	0.006	0.012

Pada pengolahan ini, data yang digunakan adalah solusi koordinat harian, sehingga koseismik yang diturunkan dari deret waktu ini adalah koseismik kumulatif semua gempa yang terjadi pada doy pengamatan yang sama. Vektor dari pergeseran akibat rentetan gempa ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pergeseran koseismik gempa Pasaman pada bidang: (a) horizontal dan (b) vertikal dengan ellips kesalahan pada selang kepercayaan 95%. Mekanisme fokal mengacu kepada *mainshock* M6.1 pada pukul 01:39 UTC.

Berdasarkan waktu kejadiannya, durasi dari kejadian *foreshock* dengan gempa utama hanya 4 menit serta disusul oleh *aftershocks* dengan magnitudo lebih dari 4.5 adalah 2.5 jam kemudian. Kami membandingkan magnitudo dari rentetan gempa sebagai dasar untuk menghitung pergeseran akibat setiap gempa. Kami menghitung geometri gempa dengan model empiris dari bidang gempa menggunakan persamaan di bawah:

$$Mw = \frac{2}{3} \log Mo - 6.07 \tag{1}$$

$$Mw = 4.07 + 0.98 \log D \tag{2}$$

$$Mo = \mu DS \tag{3}$$

$$\log(L) = 0.58Mw - 2.3 \tag{4}$$

Persamaan di atas permukaan persamaan empiris untuk menghitung bidang gempa dari magnitudo gempa berdasarkan Well dan Coppersmith (1994), Kanamori dan Rivera (2004) dan Papazachos dkk. (2004). *Mw*

merupakan magnitudo gempa,  $M_0$  magnitudo momen dalam satuan Nm,  $D$  merupakan luas permukaan bidang gempa dalam  $\text{km}^2$ ,  $S$  merupakan *slip* dalam m dan  $L$  merupakan panjang bidang gempa searah *strike*.

Berdasarkan persamaan empiris tersebut diperoleh model geometri dan energi dari gempa. Magnitudo momen dari gempa *foreshocks* dan *aftershocks* hanya mencapai 2~4% dari kekuatan gempa utama. Namun hal ini tidak menutup kemungkinan adanya kontaminasi dari kedua kejadian ini pada pergeseran akibat gempa utama yang diperoleh dari solusi koordinat harian jika dilihat dari posisi relatif gempa terhadap stasiun CPSM. Model geometri dari rentetan gempa Pasaman dapat dilihat pada tabel 3. Panjang, lebar dan *slip* dari bidang gempa diperoleh dari persamaan empiris, sedangkan *strike*, *dip* dan *rake* diperoleh dari CMT.

Tabel 3. Model geometri dari *foreshock*, *mainshock* and *aftershock* gempa Pasaman 25 Februari 2022

Waktu (UTC)	Mw	$M_0$ (Nm)	Panjang (km)	Lebar (km)	<i>Slip</i> (m)	<i>Strike</i> (°)	<i>Dip</i> (°)	<i>Rake</i> (°)
01:35	M5.2	$8.04 \times 10^{16}$	5.200	2.736	0.188	315.5	87.3	174.7
01:39	M6.1	$1.80 \times 10^{18}$	17.298	6.814	0.509	132.1	89.0	174.1
04:02	M4.9	$2.85 \times 10^{16}$	3.483	2.018	0.135	138.1	76.4	177.2
04:06	M5.0	$4.03 \times 10^{16}$	3.981	2.233	0.151	143.3	78.0	169.3

Kami membandingkan hasil estimasi dengan hitungan dari pergeseran teoritis dari setiap kejadian gempa *foreshock*, *mainshock* and *aftershock* dengan menggunakan model *half-space* (Okada, 1985). Kami melakukan perhitungan kemuka (*forward calculation*) pada stasiun CPSM menggunakan model geometri dari data CMT dan model geometri empiris. Kami menggunakan stasiun CPSM karena merupakan stasiun terdekat yang memiliki nilai pergeseran yang paling signifikan. Kami mengasumsikan posisi pusat gempa pada kedalaman 12 km dengan mekanisme sesar geser mengangan. Pusat dari bidang gempa ada pusat geometri yang berada di centroid. Perbandingan dari pergeseran teoritis dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pergeseran dari *foreshock*, *mainshock* and *aftershock* gempa Pasaman 25 Februari 2022 pada stasiun CPSM pada komponen horizontal dE (Barat-Timur) dan dN (Utara-Selatan)

Pergeseran dari-	dE (m)	dN (m)
Data GPS	0.0171	-0.0032
<i>Mainshock</i>	0.0118	-0.0001
<i>Foreshock</i> M5.2	0.0002	-0.0001
<i>Aftershock</i> M4.9	0.0001	0.0000
<i>Aftershock</i> M5.0	0.0004	-0.0001

Hasil dari perhitungan *forward calculation* menunjukkan pergerakan yang mencapai lebih dari 12 mm pada stasiun CPSM. Nilai yang dihasilkan dengan menggunakan pemodelan relatif lebih kecil dibandingkan dengan data pengamatan sebenarnya. Perbedaan yang signifikan ditemukan pada komponen utara-selatan. Ini dapat diakibatkan oleh pemilihan orientasi bidang gempa dan penentuan kedalamannya. Perhitungan di atas menunjukkan kontribusi dari gempa *foreshock* dan *aftershock* yang sangat kecil yaitu hampir 1-2 orde lebih kecil dari gempa utama. Oleh karena itu, mengabaikan efek dari gempa susulan ini dapat ditoleransi. Pengaruh dari *postseismic* setelah terjadinya gempa dapat juga mengakibatkan perbedaan dari pergeseran dari data dengan pergeseran teoritis. Beberapa gempa besar memicu *afterslip* yang mencapai ~10% pergeseran koseismik dalam jangka waktu 12 jam pertama (Twardzik dkk., 2019). Sehingga efek *postseismic* masih terekam dalam pergeseran koseismik harian. Selain itu, perlu diperhatikan bahwa koseismik dari data harian juga mengakomodasi pengaruh dari pergeseran permukaan lokal. Beberapa gempa yang terjadi di daratan juga memicu pergeseran lokal seperti gempa Palu-Donggala M7.5 pada tahun 2018 (Jalil dkk., 2018).

Beberapa penelitian telah menganalisis pergeseran koseismik dan pengaruh dari *postseismic* gempa yang terjadi dalam durasi beberapa jam setelah gempa (Twardzik dkk., 2019). Analisis data pengamatan GPS dilakukan menggunakan data kinematik epok-per-epok dibandingkan dengan data harian. Dengan menggunakan data epok-per-epok, detil dari pergeseran pada stasiun GPS dalam durasi yang beberapa menit bahkan detik dapat dianalisis, baik itu pergeseran akibat koseismik maupun pergeseran lanjutan akibat *postseismic*. Salah satu kelemahan dari analisis kinematik adalah sumber kesalahan yang semula dapat dirata-ratakan pada pengolahan harian akan muncul dengan amplitudo yang lebih besar. Strategi pengolahan yang baik diperlukan untuk mereduksi efek dari troposfer dan *multipath* yang bisa mengkontaminasi data GPS kinematik. Meskipun data kinematik dapat menjelaskan fase-fase setelah terjadinya gempa dengan detil, Analisis kegempaan dengan data geodetik sangat bergantung pada distribusi jaringan pengamatan GPS yang rapat. Pada penelitian ini, kurangnya jumlah stasiun GPS yang berdekatan dengan sumber gempa Pasaman menjadi salah satu kendala untuk menganalisis lebih lanjut karakteristik gempa di sesar Sumatra. Salah satu cara mengatasi ini adalah menggunakan gabungan data GPS dan data pengamatan InSAR (interferometric Synthetic Aperture Radar). Data InSAR dapat mendukung data pengamatan GPS untuk mengkonstrain geometri gempa dan menghitung slip pada sumber gempa dengan lebih detil (Ghayournajarkar dan Fukushima, 2020).

## Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini telah diperoleh pergeseran akibat gempa Pasaman M6.1 dengan menggunakan data pengamatan GPS. Data pengamatan pada stasiun CPSM menunjukkan pergeseran sebesar 17 mm ke arah tenggara. Stasiun GPS yang lain tidak menunjukkan pergerakan yang signifikan diakibatkan oleh posisi relatif stasiun terhadap sumber gempa. Secara empiris, moment magnitudo *foreshock* dan *aftershock* hanya 2~4% dibandingkan dengan energi yang dilepaskan saat gempa utama. Hasil dari pemodelan *forward calculation* menunjukkan efek dari gempa *foreshock* dan *aftershock* tidak signifikan terhadap perhitungan koseismik gempa Pasaman M6.1.

## Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BIG dan EOS-BRIN yang telah menyediakan akses yang mudah terhadap data pengamatan GPS INACORS dan SuGAR. Beberapa gambar dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak GMT (Generic Mapping Tools).

## Daftar Pustaka

- Ammon, C. J., Ji, C., Thio, H. K., Robinson, D., Ni, S., Hjorleifsdottir, V., ... & Wald, D. (2005). Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *science*, Vol: 308, Hal: 1133-1139.
- Bilham, R., Engdahl, R., Feldl, N., & Satyabala, S. P. (2005). Partial and complete rupture of the Indo-Andaman plate boundary 1847-2004. *Seismological Research Letters*, Vol: 76, Hal: 299-311.
- Briggs, R. W., Sieh, K., Meltzner, A. J., Natawidjaja, D., Galetzka, J., Suwargadi, B., ... & Bock, Y. (2006). Deformation and slip along the Sunda megathrust in the great 2005 Nias-Simeulue earthquake. *Science*, Vol: 311, Hal: 1897-1901.
- Cattin, R., Chamot-Rooke, N., Pubellier, M., Rabaute, A., Delescluse, M., Vigny, C., ... & Dubernet, P. (2009). Stress change and effective friction coefficient along the Sumatra-Andaman-Sagaing fault system after the 26 December 2004 (Mw= 9.2) and the 28 March 2005 (Mw= 8.7) earthquakes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vo: 10.
- Daryono, M. R., Natawidjaja, D. H., & Sieh, K. (2012). Twin-surface ruptures of the March 2007 M> 6 earthquake doublet on the Sumatran Fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol: 102, Hal: 2356-2367.
- Feng, Lujia, et al. "A unified GPS-based earthquake catalog for the Sumatran plate boundary between 2002 and 2013." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120.5 (2015): Hal: 3566-3598.
- Ghayournajarkar, N., & Fukushima, Y. (2020). Determination of the dipping direction of a blind reverse fault from InSAR: case study on the 2017 Sefid Sang earthquake, northeastern Iran. *Earth, Planets and Space*, Vol: 72, Hal: 1-15.
- Gunawan, E., Maulida, P., Meilano, I., Irsyam, M., & Efendi, J. (2016). Analysis of coseismic fault slip models of the 2012 Indian Ocean earthquake: Importance of GPS data for crustal deformation studies. *Acta Geophysica*, Vol: 64, Hal: 2136-2150.



- Gunawan, E., Nishimura, T., Susilo, S., Widiyantoro, S., Puspito, N. T., Sahara, D. P., ... & Agustan, A. (2020). Fault source investigation of the 6 December 2016 Mw 6.5 Pidie Jaya, Indonesia, earthquake based on GPS and its implications of the geological survey result. *Journal of Applied Geodesy*, Vol: 14, Hal: 405-412.
- Gunawan, E., Widiyantoro, S., Rosalia, S., Daryono, M. R., Meilano, I., Supendi, P., ... & Ismail, N. (2018). Coseismic slip distribution of the 2 July 2013 Mw 6.1 Aceh, Indonesia, earthquake and its tectonic implications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol: 108, Hal: 1918-1928.
- Herring, T.A., King, R.W., dan McClusky, S.C. (2018). *Introduction to GAMIT/GLOBK*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science. Massachusetts Institute of Technology.
- Hill, E. M., Borrero, J. C., Huang, Z., Qiu, Q., Banerjee, P., Natawidjaja, D. H., ... & Sieh, K. (2012). The 2010 Mw 7.8 Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol: 117.
- Jalil, A., Fathani, T. F., Satyarno, I., & Wilopo, W. (2021). Liquefaction in Palu: the cause of massive mudflows. *Geoenvironmental Disasters*, Vol: 8, Hal: 1-14.
- Kanamori, H., & Rivera, L. (2004). Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol: 94, Hal: 314-319.
- Konca, A. O., Avouac, J. P., Sladen, A., Meltzner, A. J., Sieh, K., Fang, P., ... & Helmberger, D. V. (2008). Partial rupture of a locked patch of the Sumatra megathrust during the 2007 earthquake sequence. *Nature*, Vol: 456, Hal: 631-635.
- McCaffrey, R. (2009). The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol: 37, Hal: 345-366.
- Muzli, M., Umar, M., Nugraha, A. D., Bradley, K. E., Widiyantoro, S., Erbas, K., ... & Wei, S. (2018). The 2016 Mw 6.5 Pidie Jaya, Aceh, North Sumatra, earthquake: reactivation of an unidentified sinistral fault in a region of distributed deformation. *Seismological Research Letters*, Vol: 89, Hal: 1761-1772.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, Vol: 75, 1135-1154.
- Papazachos, C. B., Karakaisis, G. F., Scordilis, E. M., & Papazachos, B. C. (2004). Probabilities of activation of seismic faults in critical regions of the Aegean area. *Geophysical Journal International*, Vol: 159, Hal: 679-687.
- Pratama, C., Ito, T., Sasajima, R., Tabei, T., Kimata, F., Gunawan, E., ... & Meilano, I. (2017). Transient rheology of the oceanic asthenosphere following the 2012 Indian Ocean Earthquake inferred from geodetic data. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol: 147, Hal: 50-59.
- Qiu, Q., & Chan, C. H. (2019). Coulomb stress perturbation after great earthquakes in the Sumatran subduction zone: Potential impacts in the surrounding region. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol: 180, 103869.
- Tsang, L. L., Hill, E. M., Barbot, S., Qiu, Q., Feng, L., Hermawan, I., ... & Natawidjaja, D. H. (2016). Afterslip following the 2007 Mw 8.4 Bengkulu earthquake in Sumatra loaded the 2010 Mw 7.8 Mentawai tsunami earthquake rupture zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol: 121, Hal: 9034-9049.
- Twardzik, C., Vergnolle, M., Sladen, A., & Avallone, A. (2019). Unravelling the contribution of early postseismic deformation using sub-daily GNSS positioning. *Scientific reports*, Vol: 9, Hal: 1-12.
- Wei, S., Helmberger, D., & Avouac, J. P. (2013). Modeling the 2012 Wharton basin earthquakes off-Sumatra: Complete lithospheric failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol: 118, Hal 3592-3609.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, Vol: 84, Hal: 974-1002.



This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).