



Estimasi Slip Rate di Sesar Semangko menggunakan ALOS PALSAR 1

Ongky Anggara*, Satrio Muhammad Alif, Jelita Rizki Simarmata, Elysabet Sitinjak

Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sumatera

Abstrak

Provinsi Lampung merupakan salah satu pulau yang memiliki potensi bencana gempa bumi di masa mendatang dikarenakan berada dalam jalur sesar Sumatera yaitu Sesar Semangko. Potensi gempa bumi di zona sesar Semangko dapat diestimasi dengan menghitung *slip rate* sesar Semangko. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi *slip rate* sesar Semangko menggunakan data *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) *Phased Array L-band SAR* (PALSAR 1) dengan rentang data 2007 hingga 2010. Data InSAR diestimasi menggunakan metode *the small baseline subset* (SBAS) *InSAR time-series technique* dengan menggunakan koreksi *velocity* dari stasiun GNSS. Hasil LOS *velocity* InSAR terkoreksi dengan *velocity* stasiun GNSS sebesar 2,97 mm/tahun sampai dengan 8,67 mm/tahun. Hasil estimasi *slip rate* sesar Semangko menggunakan ALOS PALSAR 1 sebesar 11,40 mm/tahun.

Kata kunci: Sesar Semangko; InSAR; ALOS PALSAR 1; *Slip rate*.

Abstract

Lampung Province is one of the islands that has the potential for earthquake disasters in the future because it is located on the Sumatran fault line, namely the Semangko Fault. The potential for earthquakes in the Semangko fault zone can be estimated by calculating the slip rate of the Semangko fault. This research aims to estimate the slip rate of the Semangko fault using Advanced Land Observing Satellite (ALOS) Phased Array L-band SAR (PALSAR 1) data with a data range from 2007 to 2010 InSAR data is estimated using the small baseline subset (SBAS) InSAR time-series technique using velocity corrections from GNSS stations. InSAR LOS speed results corrected with GNSS station velocity of 2.97 mm/year to 8.67 mm/year. The estimated slip rate of the Semangko fault using ALOS PALSAR 1 is 11.40 mm/year.

Keywords: *Semangko Fault; InSAR; ALOS PALSAR 1; Slip rate.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara pertemuan dari lempeng tektonik yang menyebabkan tingkat seismisitas yang tinggi (Bird, 2003). Pertemuan ini menyebabkan aktivitas tektonik yang signifikan di wilayah Indonesia (McCaffrey, 2009). Pergerakan Lempeng Indo-Australia menuju ke utara dengan kecepatan relatif 7 cm per tahun dan bergerak ke bawah Lempeng Eurasia di sepanjang zona subduksi yang mengapit Pulau Sumatra (Prawirodirdjo dkk., 2000). Akibatnya adalah Pulau Sumatra menjadi wilayah yang memiliki tingkat aktivitas tektonik cukup tinggi yang menyebabkan serangkaian fenomena tektonik seperti gempa bumi (Chlieh dkk., 2008; Hanifa dkk., 2014), tsunami (Tanioka

dkk., 2006), letusan gunung berapi (Anggara dkk., 2023), dan lain-lain. Selain itu, Pulau Sumatra memiliki beberapa provinsi, salah satunya yaitu Provinsi Lampung yang memiliki 15 Kabupaten. Salah satu kabupaten diantaranya yaitu Kabupaten Pesisir Barat yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia, terletak di sepanjang pesisir barat Provinsi Lampung. Daerah Kabupaten Pesisir Barat terletak tidak jauh dari Selat Sunda yang merupakan daerah zona subduksi (Alif dkk., 2021). Keberadaan zona subduksi merupakan penyebab sumber gempa tektonik, khususnya di Pulau Sumatra (Prawirodirdjo dkk., 2000). Selain adanya zona subduksi di Kabupaten Pesisir Barat juga terdapat jalur Sesar Sumatra (Sieh dan Natawidjaja,

*) Korespondensi: ongky.anggara@gt.itera.ac.id

Diajukan : 11 Desember 2023

Diterima : 16 Januari 2024

Diterbitkan : 24 Oktober 2024

2000). Adanya keberadaan jalur sesar aktif yaitu Sesar Sumatra memiliki potensi bahaya bagi wilayah sekitarnya dikarenakan dapat menyebabkan bencana gempa bumi (Genrich dkk., 2000).

Sesar Sumatra terbentang sepanjang Pulau Sumatra yang memiliki panjang sekitar 1.900 kilometer (Sieh dan Natawidjaja, 2000). Sesar ini membentuk zona patahan yang melintasi pulau dari utara ke selatan dan terbagi menjadi 19 segmen yang memiliki panjang masing-masing segmen sekitar 60 hingga 200 km (Sieh dan Natawidjaja, 2000). Beberapa diantaranya Sesar Semangko sepanjang 65 km dan Sesar Kumering sepanjang 150 km merupakan bagian dari Sesar Sumatra yang terletak di bagian ujung Pulau Sumatra, Provinsi Lampung (PuSGeN, 2017). Sesar aktif tersebut terletak di Pesisir Barat yang berpotensi mempunyai tingkat aktivitas tektonik yang tinggi berdasarkan historis gempa signifikan di wilayah tersebut. Pada tahun 1994, terjadi gempa di daerah Liwa 6,8 Mw dan terletak sejauh 60 km sebelah timur Sesar Kumering menyebabkan kerusakan parah di wilayah sekitarnya (Widiwijayanti dkk., 1996; Natawidjaja dan Triyoso, 2007). Peristiwa gempa bumi ini mengakibatkan dampak atau kerusakan yang cukup parah, Akibat dari Gempa Liwa merenggut kurang lebih 200 jiwa tewas dan juga merusak infrastruktur dan kondisi morfologi menyebabkan retaknya tanah dan bangunan di atasnya (Duquesnoy dkk., 1996).

Penting untuk melakukan pemantauan aktivitas tektonik di sekitar sesar untuk mendapatkan informasi pergerakan deformasi terhadap sesar (Eyubagil dkk., 2021). Banyak upaya dalam melakukan pemantauan gempa beberapa diantaranya dapat dilakukan pengamatan langsung menggunakan *The Global Navigation Satellite System* (GNSS) (Alif dkk., 2022; Anggara dkk., 2024), dan juga dapat dilakukan menggunakan *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) yang telah dilakukan penelitian sebelumnya (Meilano dkk., 2021). Pemantauan deformasi sesar menggunakan metode InSAR memiliki kemampuan untuk memetakan cakupan wilayah yang luas (Bateson dkk., 2015). Selain itu, InSAR telah terbukti berhasil dalam pemantauan aktivitas sesar seperti di wilayah *Althyn Tagh Fault* di utara Tibet (Elliott dkk., 2008), *the Gyaring Co fault* (GCF) di bagian Tengah dari *Tibetan Plateau* (Zhang dkk., 2023), dan *Ganzi Yushu Xianshuihe Faults*

(Zhang dkk., 2022). Namun, metode InSAR memiliki beberapa keterbatasan yang dapat memengaruhi akurasi pengukuran deformasi permukaan bumi. Salah satu pendekatan yang telah dikembangkan untuk mendapatkan akurasi yang lebih baik perlu dilakukan integrasi antara data InSAR dengan data GNSS melalui koreksi kecepatan GNSS (Xu dkk., 2022). Di sisi lain pengukuran GNSS memiliki akurasi yang tinggi dalam mendeteksi perubahan deformasi di titik-titik tertentu. GNSS dapat mengukur perubahan posisi dengan presisi dan akurasi yang tinggi (Alif dkk., 2023).

Metode InSAR banyak digunakan karena dapat memperoleh informasi deformasi skala besar dengan resolusi spasial dan akurasi yang tinggi berdasarkan data satelit SAR (Elliott dkk., 2008). Salah satu yang dapat digunakan untuk memperoleh informasi deformasi dapat menggunakan metode *the small baseline subset method* (SBAS) InSAR (Karimzadeh dkk., 2013; Qiu dkk., 2019), Metode SBAS-InSAR digunakan dengan memanfaatkan gabungan dari beberapa citra radar SAR yang diambil dalam rentang waktu tertentu antara kedua citra SAR, metode ini berguna dalam memperoleh nilai *Line of Sight* (LOS) *velocity* (Karimzadeh dkk., 2013). LOS *velocity* merupakan hasil dari pengolahan metode SBAS InSAR yang merujuk pada kecepatan perubahan deformasi sesar berdasarkan sudut atau arah pandangan radar hingga mencapai milimeter (Cigna dkk., 2021). Hasil dari pengolahan bertujuan untuk memudahkan dalam analisis pemantauan deformasi dari waktu ke waktu.

Pada estimasi sebelumnya menggunakan data GPS sesar Semangko didapatkan nilai *slip rate* sebesar 15 ± 4 mm/tahun (Meilano dkk., 2021) dan sebesar 16.5 ± 2 mm/tahun (Alif dkk., 2020). Namun estimasi menggunakan InSAR masih kurang di wilayah tersebut. Penelitian ini bertujuan mengestimasi *slip rate* sesar Semangko dengan menggunakan ALOS PALSAR 1 dengan metode *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR). Penelitian ini memanfaatkan citra ALOS PALSAR 1 dari tahun 2007 hingga 2010 di wilayah sekitar Sesar Semangko.

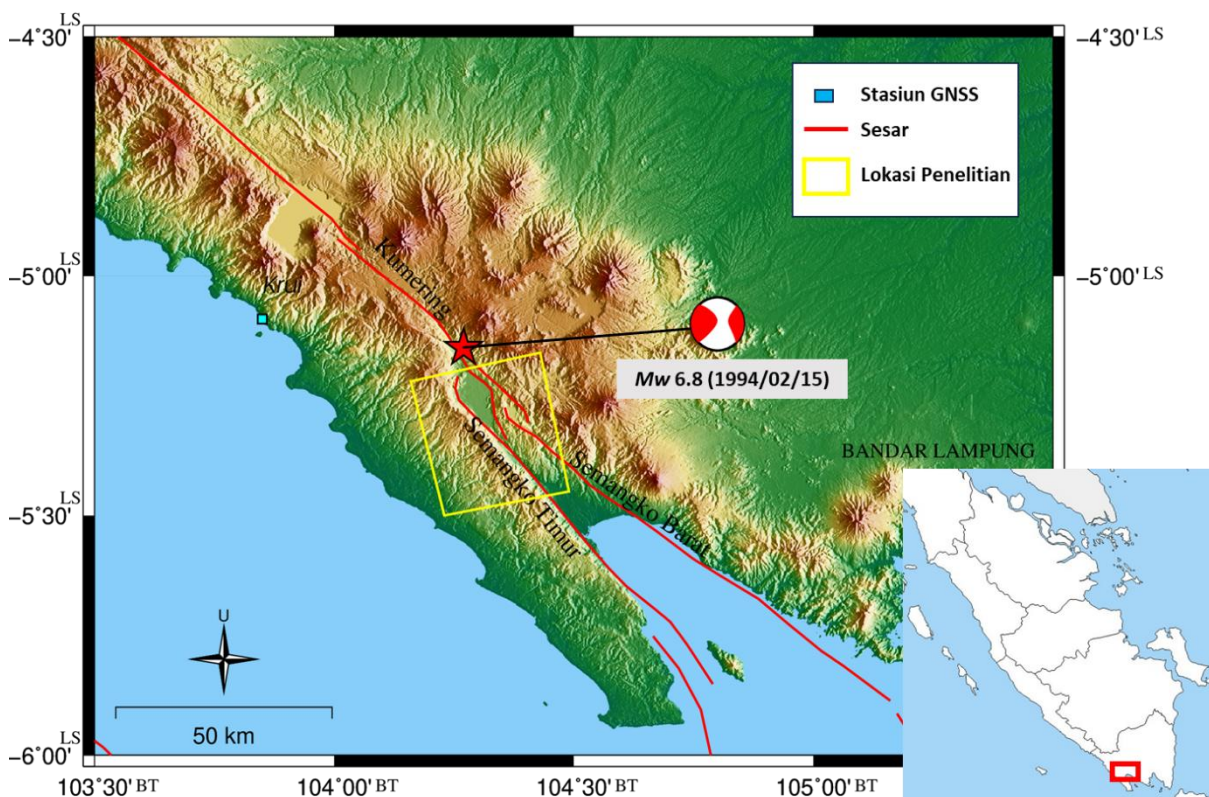
METODOLOGI

Lokasi penelitian berada di Kecamatan Pesisir Selatan, Kabupaten Pesisir Barat, yang terletak di Provinsi Lampung tepatnya di daerah Sesar

Semangko. Secara astronomis lokasi penelitian terletak di antara $5^{\circ} 09' 09'' - 5^{\circ} 24' 03''$ LS dan $103^{\circ} 57' 03'' - 104^{\circ} 14' 04''$ BT (Gambar 1). Pada penelitian ini menggunakan 10 *scene images ascending* (satelit bergerak ke selatan ke utara) dari ALOS PALSAR 1 (L-band dengan panjang gelombang 23,62 cm) yang diakuisisi mulai dari 11 Juni 2007 hingga 19 September 2010 diunduh melalui situs web ASF (<https://vertex.daac.asfalaska.edu/>). ALOS Palsar-1 diluncurkan oleh Jepang Aerospace Exploration Agency (JAXA) pada Januari 2006 hingga akhir misi Mei 2011. Data DEM disediakan oleh Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-second Global DEM dapat diakses melalui situs Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) dengan resolusi spasial 30 m. Tabel 1 menunjukkan detail waktu akuisisi data yang digunakan pada penelitian ini adalah tahun 2007-2010, yaitu sebanyak 10 citra pada cakupan wilayah.

Penelitian ini menganalisis deformasi sesar Semangko menggunakan data ALOS PALSAR 1 dengan metode *the Small Baseline Subset (SBAS) time series* dengan rentang pengamatan

tahun 2007-2010. Dalam pengolahan *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)* untuk mengolah *timeseries SBAS* menggunakan perangkat lunak GMTSAR (Sandwell dkk., 2010). *File orbital precise* digunakan untuk mengurangi kesalahan orbital. Pengolahan menggunakan metode SBAS dengan penentuan citra *master* dan *slave* didasarkan dari *perpendicular baseline* dan memiliki tingkat *coherence* yang tinggi. Pada tahap awal sebelum dilakukannya proses *interferogram formation* yaitu *corregistration* untuk menentukan tingkat kecocokan *images* (Alif dkk., 2023). Nilai koherensi antara *master* dan *slave* diestimasi sebagai indikator tingkat kualitas dari suatu informasi fase dengan nilai koherensi berkisar antara 0 hingga 1. Proses *topographic phase removal* untuk menghilangkan beda fase *interferometric* menghasilkan rentang nilai yang sama yakni -3,14 sampai 3,14 atau setara nilai sebesar $-\pi$ dan π . Proses *unwrapping* menggunakan algoritma SNAPHU (Chen dan Zebker, 2002). Pada fase *unwrapped* merepresentasikan pergerakan dari permukaan



Gambar 1. Lokasi penelitian di Sesar Semangko. Garis berwarna merah merupakan *Sumatran Fault Zone (SFZ)* (PuSGeN, 2017). Bintang berwarna merah merupakan episenter gempa Liwa tahun 1994 dihimpun dari GlobalCMT (Dziewonski dkk., 1981).

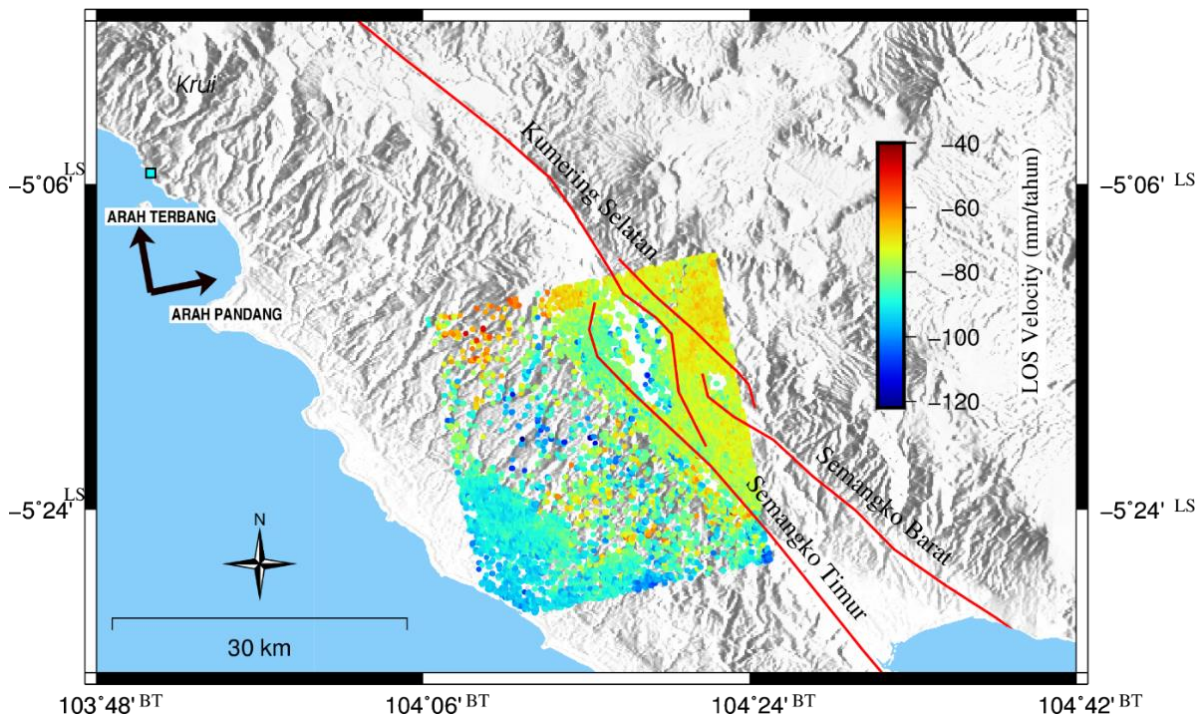
tanah dalam sudut pandang arah satelit (*ascending*) line of sight (LOS). Hasil *Line of Sight* (LOS) displacement dilakukan koreksi menggunakan data *velocity* GNSS. Data GNSS dikonversi dari *easting, northing, up* menjadi 1D LOS sebagai koreksi data LOS (Cigna dkk., 2021). Hasil LOS terkoreksi dilakukan *fault parallel velocities* di *Sumatran Fault* segmen Semangko. Estimasi *slip rate* menggunakan *screw dislocation model* (Alif dkk., 2022; Savage dan Burford, 1973). Penentuan nilai *slip rate* menggunakan *grid search method* (Alif dkk., 2022) berdasarkan minimum χ^2 dengan rentang interval 0 hingga 30 mm/tahun dan *locking depth* sebesar 30 km.

HASIL DAN PEMBAHASAN

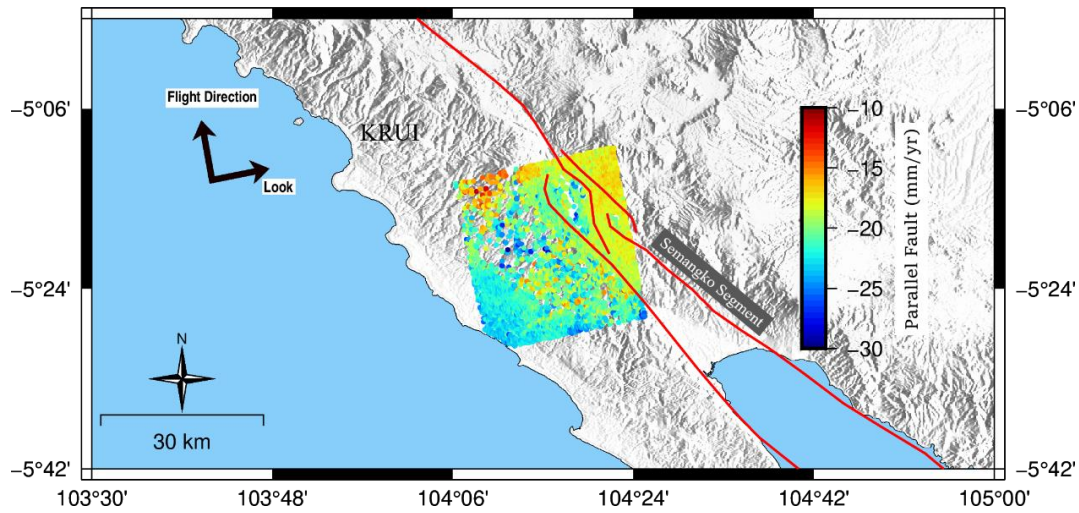
Hasil pengolahan metode InSAR dengan menggunakan 10 *image* citra ALOS PALSAR 1 dengan rentang tahun 2007 hingga 2010 mode *ascending* diperoleh 30 pasang citra interferogram. Berdasarkan hasil pengolahan pasangan data citra interferogram tahun 2007 hingga 2010, selanjutnya diperoleh nilai rata-rata kecepatan LOS *velocity* tahun 2007 hingga 2010. Pada Gambar 2 merupakan nilai LOS *velocity* rata-rata yang dihasilkan sebelum dilakukannya koreksi menggunakan data kecepatan GNSS sebesar -121,64 mm/tahun hingga ~-41,78

mm/tahun dengan nilai LOS rata-rata sebesar -79,93 mm/tahun (Gambar 2). Hasil LOS menunjukkan bahwa nilai LOS *velocity* negatif yaitu arah pergerakan tanah cenderung menuju arah yang berlawanan dengan arah pandang sensor atau arahnya menjauhi sistem radar (sensor) satelit. Sebaliknya nilai LOS *velocity* positif menunjukkan arah pergerakan tanah menuju arah timur yaitu mendekati arah pandang satelit pada sistem radar (Panuntun dan Prasidya, 2020). Hasil sebaran LOS *velocity* yang bernilai negatif yaitu menjauhi sistem radar yang berarti arah kecepatan LOS bergerak menuju arah barat (Orhan, 2021). Ditinjau dari pola warna, warna yang mendekati merah tua menggambarkan pergerakan muka tanah mendekati arah pandang satelit, dan warna yang mendekati biru tua menggambarkan menjauhi arah pandang satelit.

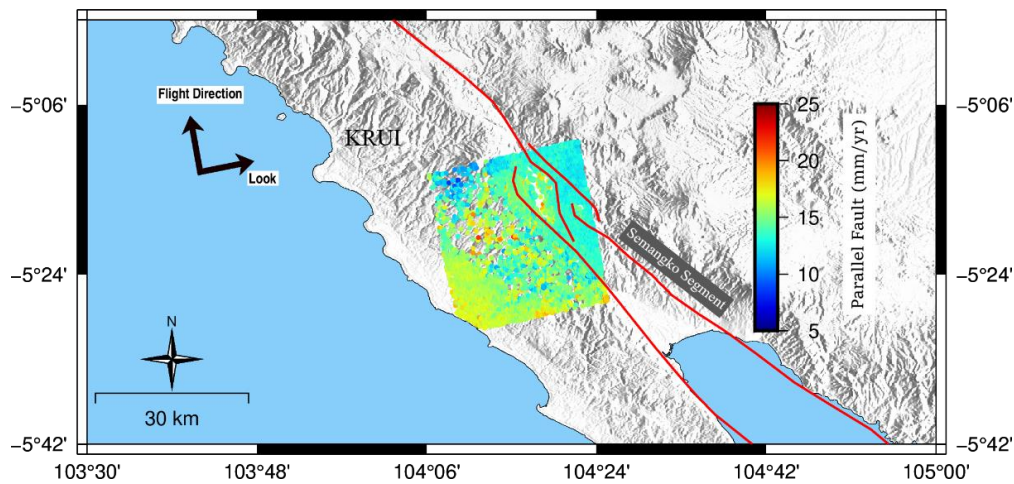
Hasil LOS *velocity* dilakukan estimasi untuk menghitung *slip rate* dengan *fault parallel velocities*. Gambar 3 menunjukkan hasil *fault parallel velocities* sebelum dikoreksi menggunakan GNSS *velocities*. Nilai *fault parallel velocities* komponen *easting* sebesar ~-10,41 mm/tahun sedangkan komponen *northing* sebesar ~-7,82 mm/tahun. Perlu dilakukan koreksi LOS dengan GNSS *velocities* untuk meningkatkan kualitas data.



Gambar 2. LOS *velocity* sebelum dikoreksi GNSS



Gambar 3. Fault parallel velocities sebelum dikoreksi GNSS

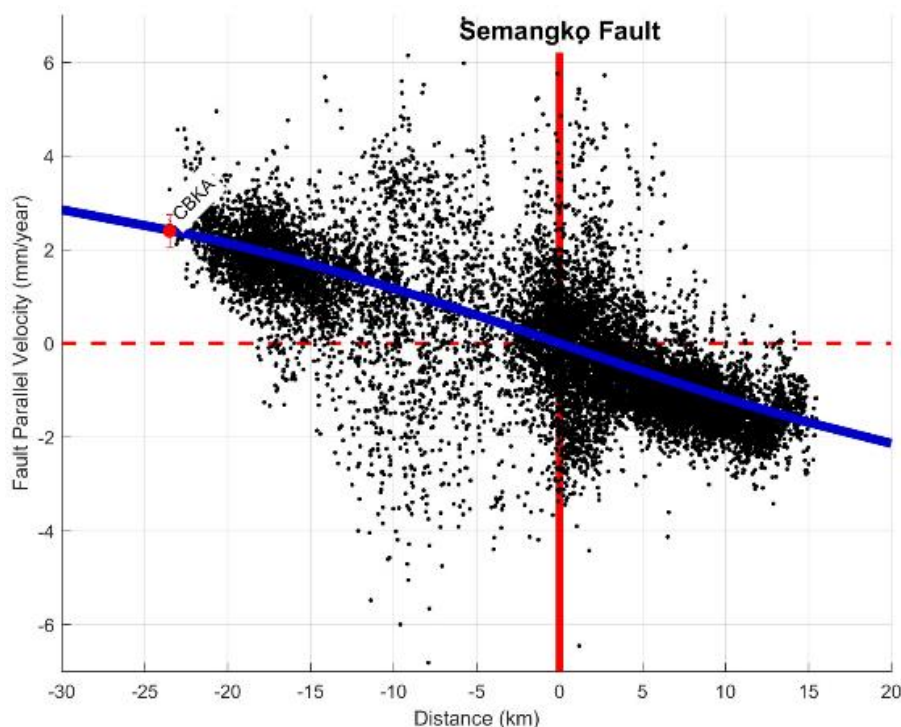


Gambar 4. Fault parallel velocities sesudah dikoreksi GNSS

Data *velocities* GNSS merupakan stasiun kontinu stasiun *Sumatran GPS Array* (SuGAR) yaitu titik stasiun KRUI. Stasiun KRUI yang diperoleh merupakan perhitungan *timeseries* data dengan kecepatan *velocities easting* sebesar -10,41 mm/tahun dan *velocities northing* sebesar 7,82 mm/tahun. Nilai *velocities* GNSS dikonversi menjadi LOS sebagai koreksi LOS InSAR. Pada Gambar 4 menunjukkan hasil koreksi LOS InSAR dengan LOS GNSS dalam arah *fault parallel velocities*. InSAR sangat dipengaruhi oleh kondisi vegetasi dan geografis lingkungan sehingga berdampak pada nilai akurasi LOS. Nilai Koreksi nilai LOS *velocity* menggunakan data kecepatan GNSS dilakukan agar memperoleh nilai kecepatan LOS yang lebih akurat dan hasil resolusi spasial dan temporal yang lebih baik serta berkontribusi dalam validasi estimasi kecepatan LOS secara akurat (Alatza dkk., 2020). *Fault parallel velocities* InSAR

menunjukkan bahwa terdapat pola *stike-slip* sehingga serupa dengan tipe *Sumatran Fault Zone* (SFZ) merupakan *major dextral strike-slip fault zone* (Natawidjaja, 2018).

Hasil estimasi nilai *slip rate* Sesar Semangko menggunakan ALOS PALSAR 1 dengan nilai *locking depth* 30 km sebesar 11,40 mm/tahun dengan minimum χ^2 sebesar 1,02 (Gambar 5). Hasil tersebut lebih kecil dari pada estimasi sebelumnya dari *geodetic slip rate* sebesar 15 ± 4 mm/tahun (Meilano dkk., 2021) dan sebesar $16,5 \pm 2$ mm/tahun (Alif dkk., 2020). Pengaruh nilai estimasi *slip rate* menggunakan InSA akan sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi. Pada estimasi geologi nilai *slip rate Sumatran Fault Zone* (SFZ) merupakan *rigid block* dengan nilai $\sim 15-16$ mm/tahun (Natawidjaja, 2018). Berdasarkan historis SFZ beberapa kali terjadi gempa besar seperti gempa Liwa 15 Februari 1994 magnitudo Mw 6,8 lokasinya berdekatan



Gambar 5. Slip rate Sesar Semangko

dengan Sesar Semangko yang menyebabkan dampak kerusakan signifikan (Duquesnoy dkk., 1996), sehingga penelitian ini penting untuk estimasi *slip rate* dalam mengetahui potensi gempa di wilayah Sesar Semangko.

KESIMPULAN

Hasil LOS *velocity* tahun 2007 hingga 2010 menggunakan ALOS PALSAR 1 sebesar ~-121,64 mm/tahun hingga ~-41,78 mm/tahun. Sedangkan nilai *fault parallel velocities* komponen *easting* sebesar ~-10,41 mm/tahun dan komponen *northing* sebesar ~7,82 mm/tahun. Pada estimasi *slip rate* Sesar Semangko menggunakan ALOS PALSAR 1 sebesar 11,40 mm/tahun dengan minimum χ^2 sebesar 1,02. Nilai tersebut lebih kecil dari estimasi geologi dan geodetik, namun untuk meningkatkan hasilnya perlu menggunakan data GNSS dan InSAR terbaru.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) yang telah menyediakan data ALOS PALSAR 1. Gambar dibuat menggunakan perangkat lunak *Generic Mapping Tools* (GMT) (Wessel dkk., 2013).

DAFTAR PUSTAKA

- Alatza, S., Papoutsis, I., Paradissis, D., Kontoes, C., Papadopoulos, G.A., 2020. Multi-temporal inSAR analysis for monitoring ground deformation in Amorgos Island, Greece. *Sensors (Switzerland)*, 20(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/s20020338>
- Alif, S.M., Anggara, O., Ristiana, V., Engineering, G., 2023. *Jurnal Geografi Gea Coherence Analysis of Sentinel-1A Images in Various Land*. 23(2), 135–143.
- Alif, S.M., Cahyani, P.F., Anggara, O., Rizqiansyah, A., 2022. Slip Rate of Kumering Fault in Lampung Province Calculated from GPS Data from 2007 to 2021. *Jurnal Geosains dan Teknologi; Vol 5, No 2 (2022): Juli 2022* DOI - 10.14710/jgt.5.2.2022.83-90 . DOI: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jgt/article/view/13297>
- Alif, S. M., Fattah, E. I., & Kholil, M. (2020). Geodetic slip rate and locking depth of east Semangko Fault derived from GPS measurement. *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.04.002>
- Alif, S.M., Fattah, E.I., Kholil, M., Anggara, O., 2021. Source of the 2019 Mw6.9 Banten Intraslab earthquake modelled with GPS data

- inversion. *Geodesy and Geodynamics*, 12(4), 308–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.06.001>
- Alif, S.M., Siagian, J.M., Anggara, O., 2023. Present-day Crustal Deformation in West Sumatra After Series of Sumatran Great Earthquake from 2004-2010. *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, 3(2), 59–68. <https://doi.org/10.31284/j.jemt.2023.v3i2.3733>
- Anggara, O., Alif, S.M., Pratama, A.W., Melvin, W., 2024. Uji Signifikansi Stasiun GPS Kontinu dan Periodik dalam Identifikasi Pergerakan Koseismik. *13*(1), 89–95. DOI: <https://doi.org/10.25077/jfu.13.1.89-95.2024>
- Anggara, O., Welly, T.K., Fauzi, A.I., Alif, S.M., Perdana, R.S., Oktarina, S.W., Nuha, M.U., Rosadi, U., 2023. Monitoring ground deformation of Sinabung volcano eruption 2018-2019 using DInSAR technique and GPS data. *AIP Conference Proceedings*, 2654(February). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0114428>
- Bateson, L., Cigna, F., Boon, D., Sowter, A., 2015. The application of the intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the South Wales Coalfield, UK. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.018>
- Bird, P., 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3). DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Chen, C.W. dan Zebker, H.A., 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709–1719. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>
- Chlieh, M., Avouac, J.P., Sieh, K., Natawidjaja, D.H., & Galetzka, J., 2008. Heterogeneous coupling of the Sumatran megathrust constrained by geodetic and paleogeodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(5), 1–31. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JB004981>
- Cigna, F., Ramirez, R.E., Tapete, D., 2021. Accuracy of sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*, 13(23). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13234800>
- Duquesnoy, T., Bellier, O., Kasser, M., Sébrier, M., Vigny, C., Bahar, I., 1996. Deformation related to the 1994 Liwa earthquake derived from geodetic measurements. *Geophysical Research Letters*, 23(21), 3055–3058. DOI: <https://doi.org/10.1029/96GL02818>
- Dziewonski, A.M., Chou, T.A., Woodhouse, J.H., 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 2825–2852. DOI: <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Elliott, J.R., Biggs, J., Parsons, B., Wright, T.J., 2008. InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophysical Research Letters*, 35(12). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL033659>
- Eyubagil, E.E., Solak, H.İ., Kavak, U.S., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Aktuğ, B., Özkaymak, Ç., 2021. Present day strike-slip deformation within the southern part of the İzmir-balıkesir transfer zone based on gns data and implications for seismic hazard assessment in western anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(2), 143–160. DOI: <https://doi.org/10.3906/yer-2005-26>
- Genrich, J.F., Bock, Y., McCaffrey, R., Prawirodirdjo, L., Stevens, C.W., Puntodewo, S.S.O., Subarya, C., Wdowinski, S., 2000. Distribution of slip at the northern Sumatran fault system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28327–28341. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000jb900158>
- Hanifa, N., Sagiya, T., Kimata, F., Efendi, J., Abidin, H.Z., Meilano, I., 2014. Interplate coupling model off the southwestern coast of Java , Indonesia , based on continuous GPS data in 2008 – 2010. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 159–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.010>
- Karimzadeh, S., Cakir, Z., Osmanoglu, B., Schmalzle, G., Miyajima, M., Amiraslanzadeh, R., Djamour, Y., 2013. Interseismic strain accumulation across the North Tabriz Fault (NW Iran) deduced from InSAR time series. *Journal of Geodynamics*, 66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.02.003>

- McCaffrey, R., 2009. The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. In *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (Vol. 37, hal. 345–366). DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100212>
- Meilano, I., Susilo, S., Gunawan, E., Parjanto, B., 2021. Geodetic Slip Rate Estimates for The Kumering and Semangko Segments of The Sumatera Fault. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 22, 39. DOI: <https://doi.org/10.31172/jmg.v22i1.802>
- Natawidjaja, D.H., 2018. Updating active fault maps and slip rates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012001>
- Orhan, O., 2021. Monitoring of land subsidence due to excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 10661. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08962-x>
- Panuntun, H., Prasidya, A.S., 2020. Identifikasi Deformasi Permukaan Gempa Bumi Turki 24 Januari 2020 Dengan Teknik Interferometric Synthetic Aperture Radar (Insar). *Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar*, 1–11.
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Genrich, J.F., Puntodewo, S.S.O., Rais, J., Subarya, C., Sutisna, S., 2000. One century of tectonic deformation along the Sumatran fault from triangulation and Global Positioning System surveys. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28343–28361. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000jb900150>
- PuSGeN, 2017. *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Qiu, J., Liu, L., Wang, C., Wang, Y., 2019. Present-day tectonic activity along the central section of the Altyn Tagh fault derived from time series InSAR. *Geodesy and Geodynamics*, 10(4), 307–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.03.008>
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Xu, X., Wei, M., Wessel, P., 2010. GMTSAR Software for Rapid Assessment of Earthquakes. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Savage, J.C. dan Burford, R.O., 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5), 832–845.
- Sieh, K. dan Natawidjaja, D., 2000. Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28295–28326. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000jb900120>
- Tanioka, Y., Yudhicara, Kususose, T., Kathirolu, S., Nishimura, Y., Iwasaki, S.I., Satake, K., 2006. Rupture process of the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake estimated from tsunami waveforms. *Earth, Planets and Space*, 58(2), 203–209. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03353379>
- Wessel, P., Smith, W., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F., 2013. Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 94. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Widiwijayanti, C., Déverchère, J., Louat, R., Sébrier, M., Harjono, H., Diament, M., Hidayat, D., 1996. Aftershock sequence of the 1994, Mw 6.8, Liwa earthquake (Indonesia): Seismic rupture process in a volcanic arc. *Geophysical Research Letters*, 23(21), 3051–3054. DOI: <https://doi.org/10.1029/96GL02048>
- Xu, Y., Li, T., Tang, X., Zhang, X., Fan, H., Wang, Y., 2022. Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield. *Remote Sensing*, 14(14). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Zhang, Q., Li, Y., Zhang, J., Tian, Y., Tian, T., Li, B., 2023. Slip deformation along the Gyaring Co fault from InSAR and GPS. *Acta Geophysica*, 71(1), 53–63. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00920-6>
- Zhang, W., Ji, L., Zhu, L., Liu, C., Jiang, F., Xu, X., 2022. Current Slip and Strain Rate Distribution Along the Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault System Based on InSAR and GPS Observations. *Frontiers in Earth Science*, 10(February), 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.821761>