

Analisis Deformasi di Lampung dan Selat Sunda Berdasarkan Data GNSS tahun 2018 hingga 2021

Ongky Anggara^{1*}, Muhammad Ario Eko Rahadianto¹, Satrio Muhammad Alif^{1,2}, Een Lujainatul Isnaini¹

¹Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

²Department of Geomatics, National Cheng Kung University, Taiwan

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 13 Juni 2024

Direvisi: 11 Juli 2024

Diterima: 16 Agustus 2024

Kata kunci:

Deformasi

GNSS

Kecepatan

Uji signifikansi

ABSTRAK

Provinsi Lampung dan Selat Sunda mempunyai zona *seismic gap* yang berpotensi terjadinya gempa besar di masa mendatang. Penelitian ini menganalisis deformasi yang terjadi dengan menggunakan data stasiun *Global Navigation Satellite System* (GNSS) kontinu *Indonesia Continuously Operating Reference Station* (InaCORS) dan *Sumatran GPS Array* (SuGAR) dari tahun 2018 hingga 2021. Data GNSS diolah menggunakan *software* ilmiah Bernese 5.2 menggunakan kuadrat terkecil untuk mendapatkan perubahan kecepatan dan uji statistik untuk menganalisis signifikansi. Pengolahan data dilakukan dalam dua skema: skema pertama mencakup tahun 2018-2020, sementara skema kedua mencakup tahun 2019-2021. Hasil analisis deformasi tahun 2018 hingga 2021 dengan menggunakan dua skema pengolahan data GNSS kontinu, perubahan kecepatan yang mengacu pada Lempeng Sundaland bervariasi antara ~2 mm/tahun hingga ~20 mm/tahun. Di wilayah timur sesar Sumatera, perubahan kecepatan lebih kecil, yaitu sekitar ~5 mm/tahun, disebabkan oleh minimnya pengaruh aktivitas tektonik. Namun, di wilayah Selat Sunda dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik. Deformasi yang terjadi di Provinsi Lampung dan Selat Sunda berdasarkan perubahan kecepatan GNSS memberikan kontribusi yang signifikan akibat aktivitas tektonik dan aktivitas vulkanik.

Keywords:

Deformation

GNSS

Velocity

Significance test

Penulis Korespondensi:

Ongky Anggara

Email: ongky.anggara@gt.itera.ac.id

The Lampung Province and Sunda Strait have a seismic gap zone with the potential for major earthquakes in the future. This study analyzes the deformation occurring in this region using continuous Global Navigation Satellite System (GNSS) station data from Indonesia Continuously Operating Reference Station (InaCORS) and Sumatran GPS Array (SuGAR) from 2018 to 2021.5. The GNSS data was processed using the Bernese 5.2 scientific software, applying least squares for velocity changes and statistical tests to analyze significance. The data processing was carried out in two schemes: the first scheme covering 2018-2020, and the second covering 2019-2021. The results of the deformation analysis from 2018 to 2021, using two continuous GNSS data processing schemes, showed velocity changes relative to the Sundaland Plate ranging from ~2 mm/year to ~20 mm/year. In the eastern region of the Sumatra fault, the velocity changes were smaller, around ~5 mm/year, due to the minimal influence of tectonic activity. However, in the Sunda Strait region, the deformation was influenced by volcanic activity. The deformation occurring in Lampung Province and the Sunda Strait, based on GNSS velocity changes, significantly contributes to tectonic and volcanic activities.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Provinsi Lampung dan Selat Sunda menjadi salah satu pulau di Indonesia dengan aktivitas tektonik yang tinggi dan berpotensi terjadinya bencana gempa bumi (Supendi dkk., 2020). Hal ini dikarenakan Provinsi Lampung dan Selat Sunda berada di zona subduksi yang merupakan sumber gempa bumi yang aktif. Gempa bumi yang terjadi di Lampung dan Selat Sunda akibat adanya interaksi antara Lempeng Australia dan Lempeng Sundaland (DeMets dkk., 2010). Dalam studi terbaru wilayah selatan Jawa terdapat zona *seismic gap* yang dapat menyebabkan gempa signifikan dengan estimasi magnitudo Mw 8,9 dengan ketinggian tsunami yang bisa mencapai ~20 meter dan ~12 meter di Pantai barat dan timur Jawa (Widiyantoro dkk., 2020). Hasil tersebut memberikan implikasi bahwa wilayah Selat Sunda berada pada zona yang sudah lama tidak terjadi gempa sehingga berpotensi gempa besar (Gunawan & Widiyantoro, 2019; Hanifa dkk., 2014).

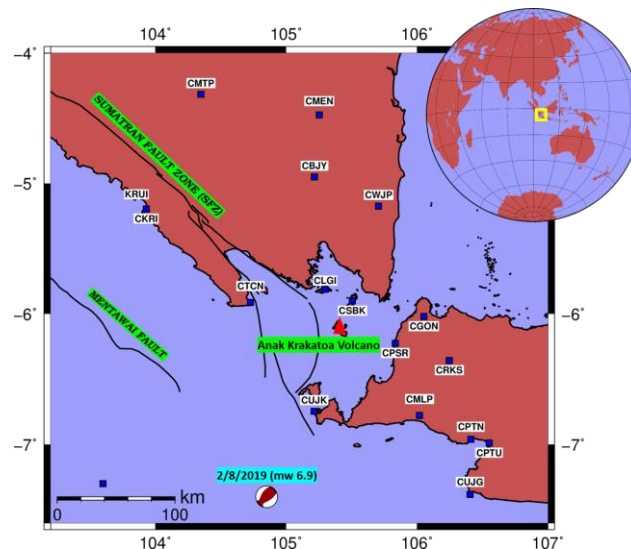
Gempa bumi menjadi salah satu fenomena geologi yang sangat berpotensi menimbulkan dampak kerugian materil dan immateril. Dalam 30 tahun terakhir aktivitas tektonik yang berdampak besar beberapa kali terjadi di wilayah Selat Sunda dan Provinsi Lampung yaitu gempa Bengkulu Mw 8,6 Tahun 2007 yang mengakibatkan dampak kerusakan, korban jiwa dan ekonomi, Gempa Mentawai Mw 7,7 tahun 2010 mengakibatkan tsunami dengan 11 desa di Mentawai mengalami kerusakan yang cukup parah. Dalam 5 tahun terakhir juga terjadi erupsi Gunung Anak Krakatau pada tahun 2018 yang menyebabkan material sedimen di sekitar Gunung Krakatau di bawah laut longsor (Natadikara dkk., 2023) sehingga memicu terjadinya tsunami yang menyebabkan kerusakan dan korban jiwa dan Gempa Banten Mw 6,9 tahun 2019 berpotensi terjadinya tsunami yang berdampak pada kerusakan rumah di wilayah Banten (Alif dkk., 2021; Gunawan dkk., 2022). Gempa ini menimbulkan dampak signifikan terhadap wilayah Lampung dan Selat Sunda, yang merupakan area berisiko tinggi karena berada di zona subduksi aktif antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Sundaland. Pada proses deformasi fase interseismik terjadi akumulasi tegangan akibat pergerakan lempeng tektonik yang lambat namun terus-menerus. Pengamatan deformasi pada fase ini memberikan informasi tentang proses akumulasi tegangan dan zona-zona yang berpotensi menjadi sumber gempa di masa depan. Pemantauan deformasi menggunakan teknologi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) memungkinkan pengukuran yang sangat akurat terhadap pergerakan permukaan bumi, baik secara horizontal maupun vertikal (Hanifa dkk., 2014).

Dalam dua dekade terakhir distribusi stasiun referensi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) di Indonesia mengalami peningkatan sehingga dapat dimanfaatkan dalam penelitian dalam bidang geodetik dan geodinamika (Alif dkk., 2024; Anggara dkk., 2023). Dengan meningkatnya jumlah stasiun referensi GNSS, kemampuan untuk melakukan pemantauan presisi tinggi terhadap pergerakan lempeng tektonik, penurunan tanah, dan fenomena geodinamika lainnya menjadi lebih efektif dan akurat (Alif dkk., 2023; Purwaningsih dkk., 2022; Sikder dkk., 2019). Pada penelitian ini bertujuan mengestimasi nilai deformasi dari tahun 2018 hingga 2021 dengan menggunakan data GNSS kontinu. Provinsi Lampung dan Selat Sunda menjadi wilayah yang aktif secara deformasi akibat interaksi gunung api dan lempeng tektonik sehingga dalam menyusun potensi perlu penelitian lebih detail seismisitas gempa yang dihasilkan berdasarkan data historis dan data terkini. Analisis deformasi di wilayah Lampung dan Selat Sunda berdasarkan data GNSS memberikan wawasan penting tentang dinamika tektonik di area tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan model potensi gempa yang lebih akurat dan strategi mitigasi yang lebih efektif di masa depan.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan data stasiun kontinu dengan rentang tahun 2018 hingga 2021,5 yaitu stasiun *Indonesia Continuously Operating Reference Station* (InaCORS) yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) dan data stasiun *Sumatran GPS Array* (SuGAR) yang dikelola oleh *Earth Observatory of Singapore* (EOS) (McLoughlin dkk., 2011). Distribusi stasiun GNSS yang digunakan tersebar di wilayah Provinsi Lampung dan Selat Sunda dengan detail data SuGAR sebanyak 1 stasiun dan data InaCORS sebanyak 16 stasiun yang ditunjukkan Gambar 1. Perhitungan deformasi terdapat dua skema yaitu pertama data GNSS dianalisis dengan rentang tahun 2018 hingga 2020 dan kedua data GNSS dianalisis dengan rentang tahun 2019-2021 untuk mengetahui pengaruh deformasi yang terjadi akibat erupsi Gunung Anak Krakatau tahun 2018 dan Gempa Bumi tahun 2019. Data GNSS diolah menggunakan *software* Bernese 5.2 dengan interval data 30 detik (Dach dkk., 2015). Solusi koordinat

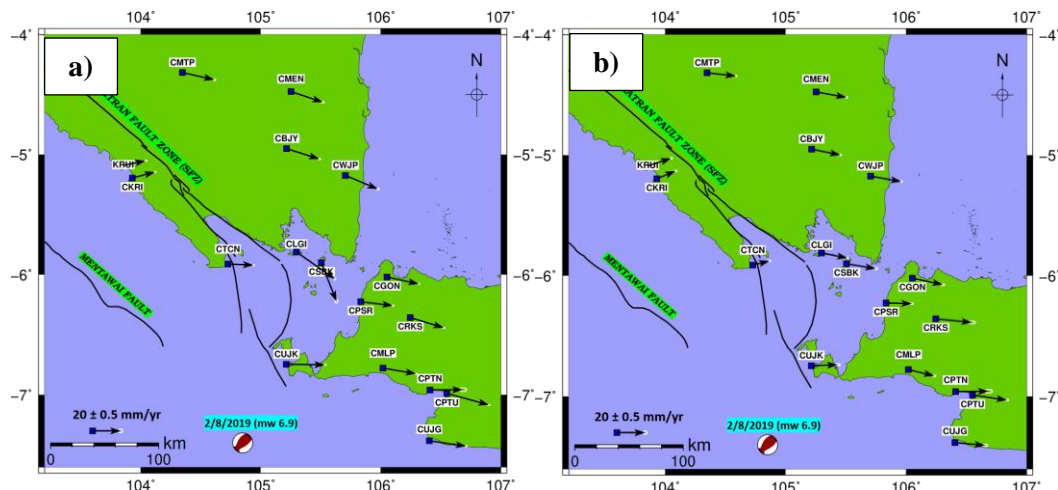
harian dengan *double-difference positioning* dengan menggunakan data *International GNSS Service* (IGS) yaitu ALIC, DARW, DGAR, IISC, KARR, PIMO, YARR, XMIS dalam kerangka the *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) 2014 (Altamimi dkk., 2016). Perhitungan *velocity* menggunakan regresi linier dengan pendekatan kuadrat terkecil, data outlier pada deret waktu koordinat, dihilangkan dengan menggunakan tingkat kepercayaan 95% atau 2 sigma deret waktu koordinat. Kemudian, transformasi kerangka ITRF 2014 ke dalam kerangka acuan lempeng Sundaland dihitung menggunakan rumus *euler pole* (Stein dan Wysession, 2009), menggunakan parameter Lempeng Sundaland yaitu lintang sebesar $45,63 \pm 0,45^\circ$, bujur sebesar $-88,71 \pm 0,38^\circ$, dan *angular velocity* sebesar $0,337 \pm 0,002^\circ/\text{Myr}$ (Alif dkk., 2024). Analisis perbandingan dengan melakukan uji signifikansi skema pertama dan skema kedua dengan menggunakan uji statistik student-t (Alif dkk., 2024; Anggara dkk., 2024).



Gambar 1 Lokasi pengamatan titik GNSS kontinu (InaCORS dan SuGAR), *beachball* berwarna merah menunjukkan episenter dan mekanisme gempa Banten M6,9 2019, dan Kotak berwarna kuning menunjukkan lokasi penelitian

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil analisis deformasi GNSS menunjukkan bahwa dalam skema 1 dari tahun 2018 hingga 2020 dan skema 2 dari tahun 2019 hingga 2021 dalam kerangka referensi ITRF 2014 ditunjukkan pada Gambar 2. Data percepatan menunjukkan bahwa kecepatan di kedua wilayah tersebut berada dalam rentang sekitar ~ 20 mm/tahun. Namun pada bagian stasiun CSBK dekat dengan lokasi Gunung Anak Krakatau mempunyai karakteristik yang berbeda pada skema 1 dan skema 2, tahun 2018 Gunung Anak Krakatau mengalami erupsi sebesar 20 mm atau ~ 4 mm perbulan (Walter dkk., 2019).



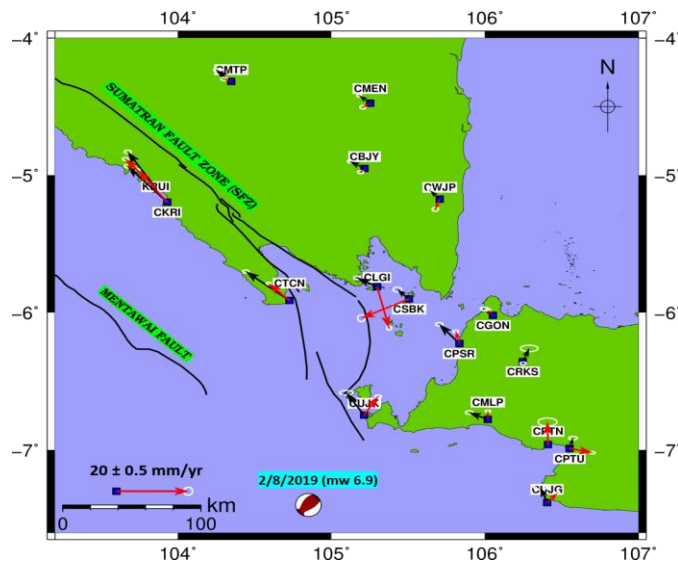
Gambar 2 Kecepatan stasiun GNSS. (a) Skema 1 tahun 2018-2020 menggunakan ITRF 2014 (b) Skema 1 tahun 2019-2021.5 menggunakan ITRF 2014

Tabel 1 menunjukkan uji t tabel dengan selang kepercayaan 95% yaitu $t = 1,96$. Hasil skema 1 dan skema 2 menunjukkan nilai yang signifikan mengalami perubahan kecepatan deformasi dalam kerangka referensi ITRF 2014. Nilai signifikansi berdasarkan perbandingan variabel perubahan kecepatan dengan resultan standar deviasinya lebih besar dibanding t-hitung. Pada keseluruhan stasiun mengarah ke arah tenggara sesuai dengan penelitian terdahulu dengan nilai sebesar ~ 20 mm/tahun, di wilayah Lampung dan bagian Selat Sunda dan Banten (Hanifa dkk., 2014).

Tabel 1 Perubahan Kecepatan Stasiun GNSS mengacu ke ITRF 2014

Stasiun	Skema 1 2018-2020 (mm/tahun)				Skema 2 2019-2021 (mm/tahun)				Uji Signifikansi (95 %)
	Timur-Barat	Utara-Selatan	Std Timur Barat	Std Utara-Selatan	Timur-Barat	Utara-Selatan	Std Timur Barat	Std Utara-Selatan	
CPSR	22,85	-2,73	0,33	0,17	18,24	-0,52	0,43	0,23	Ya
CMLP	23,61	-4,00	0,31	0,15	18,40	-4,41	0,43	0,22	Ya
CRKS	23,90	-7,25	0,35	0,18	25,63	-2,57	0,98	0,41	Ya
CPTN	23,35	0,27	1,08	0,52	23,35	0,27	1,08	0,52	Ya
CPTU	29,91	-8,12	0,30	0,15	24,46	-3,56	0,48	0,21	Ya
CUJG	26,14	-3,82	0,31	0,15	21,36	-2,01	0,75	0,30	Ya
CGON	22,65	-4,92	0,28	0,12	21,62	-4,60	0,47	0,23	Ya
CKRI	16,12	4,29	0,25	0,14	13,29	5,50	0,37	0,22	Ya
CLGI	27,40	-19,14	0,28	0,27	18,45	-3,56	0,36	0,22	Ya
CSBK	10,74	-27,33	0,41	0,45	20,78	-3,43	0,50	0,31	Ya
CTCN	18,18	-0,74	0,27	0,14	11,85	2,97	0,37	0,21	Ya
CUJK	27,52	-0,36	0,37	0,16	18,65	0,72	0,79	0,30	Ya
KRUI	15,94	3,24	0,33	0,19	16,62	5,45	0,40	0,22	Ya
CWJP	23,11	-9,65	0,36	0,25	21,74	-3,85	0,29	0,20	Ya
CBJY	23,37	-7,41	0,34	0,20	20,39	-4,09	0,29	0,18	Ya
CMEN	22,61	-7,56	0,34	0,23	21,63	-3,91	0,27	0,20	Ya
CMTTP	22,76	-5,12	0,38	0,21	20,51	-2,32	0,28	0,18	Ya

Perubahan kecepatan stasiun GNSS mengacu ke Lempeng Sundaland menunjukkan aktivitas deformasi dengan lokasi stasiun dekat dengan sesar mempunyai nilai sebesar ~ 12 mm/tahun, sedangkan stasiun yang berada di bagian timur Sesar Sumatera sebesar ~ 5 mm/tahun (Gambar 3). Aktivitas tektonik berpengaruh terhadap nilai perubahan kecepatan stasiun, nilai yang dekat dengan sesar mempunyai aktivitas tektonik seperti di selatan Sumatera mempunyai laju sesar 8-12 mm/tahun (Bradley dkk., 2017). Stasiun GNSS di sekitar Selat Sunda menunjukkan pergerakan ke arah barat daya, sedangkan pada stasiun CUJK, CLGI, dan CSBK mempunyai arah pergerakan yang berbeda yang diduga diakibatkan deformasi lokal yang terjadi di Gunung Anak Krakatau. Pada estimasi regangan menunjukkan bahwa wilayah Selat Sunda dominan mengalami ekstensi dengan nilai ~ 5 mikrostrain/tahun yang diakibatkan oleh aktivitas vulkanik (Gunawan & Widiyantoro, 2019). Sementara itu, wilayah Selat Sunda mempunyai potensi gempa di masa mendatang yang diestimasi berdasarkan data GNSS sebesar Mw 8,9 yang dapat menyebabkan tsunami (Widiyantoro dkk., 2020). Gempa bumi Samudera Hindia 2016 menjadi salah satu penyebab perubahan nilai kecepatan di stasiun yang berada di sekitar palung Sunda (Alif dkk., 2021). Berdasarkan uji statistik perubahan kecepatan stasiun GNSS yaitu signifikan dengan nilai ~ 2 mm/tahun hingga ~ 20 mm/tahun. Pada hasil uji statistik perubahan kecepatan stasiun GNSS yang mengacu ke lempeng Sundaland dengan selang kepercayaan 95% menunjukkan signifikansi pergeseran yang terjadi seperti pada Tabel 2.



Gambar 3 Perubahan kecepatan mengacu ke Lempeng Sundaland. Vektor panah berwarna merah merupakan skema 1 2018-2020 dan vektor panah berwarna hitam merupakan skema 2 2019-2021

Tabel 2 Perubahan Kecepatan Stasiun GNSS mengacu ke Lempeng Sundaland

Stasiun	Skema 1 2018-2020 (mm/tahun)				Skema 2 2019-2021 (mm/tahun)				Uji Signifikansi (95 %)
	Timur-Barat	Utara-Selatan	Std Timur-Barat	Std Utara-Selatan	Timur-Barat	Utara-Selatan	Std Timur-Barat	Std Utara-Selatan	
CPSR	-1,01	3,77	0,33	0,17	-5,61	5,98	0,43	0,23	Ya
CMLP	0,02	2,56	0,31	0,15	-5,19	2,15	0,43	0,22	Ya
CRKS	0,10	-0,57	0,35	0,18	1,83	4,11	0,98	0,41	Ya
CPTN	-0,15	7,00	1,08	0,52	-0,15	7,00	1,08	0,52	Ya
CPTU	6,41	-1,33	0,30	0,15	0,96	3,23	0,48	0,21	Ya
CUJG	2,83	2,90	0,31	0,15	-1,94	4,71	0,75	0,30	Ya
CGON	-1,31	1,68	0,28	0,12	-2,34	2,00	0,47	0,23	Ya
CKRI	-8,21	9,97	0,25	0,14	-11,03	11,18	0,37	0,22	Ya
CLGI	3,35	-12,86	0,28	0,27	-5,60	2,71	0,36	0,22	Ya
CSBK	-13,27	-5,97	0,41	0,45	-3,22	2,93	0,50	0,31	Ya
CTCN	-5,82	5,28	0,27	0,14	-12,14	8,99	0,37	0,21	Ya
CUJK	3,93	5,85	0,37	0,16	-4,95	6,93	0,79	0,30	Ya
KRUI	-8,44	8,89	0,33	0,19	-7,76	11,10	0,40	0,22	Ya
CWJP	-1,24	-3,19	0,36	0,25	-2,62	2,61	0,29	0,20	Ya
CBJY	-1,10	-1,16	0,34	0,20	-4,07	2,16	0,29	0,18	Ya
CMEN	-2,08	-1,28	0,34	0,23	-3,06	2,37	0,27	0,20	Ya
CMT	-1,99	0,76	0,38	0,21	-4,24	3,56	0,28	0,18	Ya

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian deformasi tahun 2018 hingga 2021 dengan menggunakan dua skema dengan data pengamatan GNSS kontinu, perubahan kecepatan mengacu ke Lempeng Sundaland sebesar ~2 mm/tahun hingga ~20 mm/tahun. Pada wilayah timur sesar Sumatera nilainya lebih kecil dikarenakan minimnya pengaruh aktivitas tektonik sebesar ~5 mm/tahun, namun pada wilayah Selat Sunda arah pergerakan stasiun GNSS terpengaruh deformasi yang diakibatkan aktivitas vulkanik Gunung Anak Krakatau. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi akibat aktivitas tektonik dan aktivitas vulkanik di wilayah Lampung dan Selat Sunda memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perubahan kecepatan stasiun GNSS. Penelitian ini memberikan dasar penting untuk memahami risiko

seismik dan tsunami di masa mendatang serta pentingnya pemantauan terus-menerus untuk mitigasi bencana.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera yang telah memberikan dana hibah penelitian (No. 1539co/IT9.2.1/PT.01.03/2024) melalui “Hibah Penelitian ITERA 2024”. Gambar dibuat menggunakan Generic Mapping Tools.

DAFTAR PUSTAKA

- Alif, S. M., Ching, K. E., Sagiya, T., & Wahyuni, W. N. (2024). Determination of Euler pole parameters for Sundaland plate based on updated GNSS observations in Sumatra, Indonesia. *Geoscience Letters*, *11*(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00330-0>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.06.001>
- Alif, S. M., Sauri, M. S., & Perdana, R. S. (2021). Perubahan Kecepatan Subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Sundaland akibat Gempa Bumi Samudera Hindia tahun 2016. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, *4*(3), 159–167. <https://doi.org/10.14710/jgt.4.3.2021.159-167>
- 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>
- Alif, S. M., Siregar, R. N., Siburian, Y. T., & Anggara, O. (2024). Perbandingan Kualitas InaCORS dan SuGAR untuk Studi Pemantauan Deformasi Kerak di Sumatera. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, *6*(3), 145–154. <https://doi.org/10.14710/jgt.6.3.2023.145-154>
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *121*(8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Anggara, O., Alif, S. M., Pratama, A. W., Melvin, W., Studi, P., Geomatika, T., Teknologi, J., Sumatera, T., Ryacudu, J. T., Huwi, W., Agung, K. J., & Lampung, K. (2024). Uji Signifikansi Stasiun GPS Kontinu dan Periodik dalam Identifikasi Pergerakan Koseismik. *13*(1), 89–95.
- 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).
- Bradley, K. E., Feng, L., Hill, E. M., Natawidjaja, D. H., & Sieh, K. (2017). Implications of the diffuse deformation of the Indian Ocean lithosphere for slip partitioning of oblique plate convergence in Sumatra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *122*(1), 572–591. <https://doi.org/10.1002/2016JB013549>
- Dach, R., Andritsch, F., Arnold, D., Bertone, S., Fridez, P., Jäggi, A., Jean, Y., Maier, A., Mervart, L., Meyer, U., Orliac, E., Geist, E., Prange, L., Scaramuzza, S., Schaer, S., Sidorov, D., Susnik, A., Villiger, A., Walser, P., & Thaller, D. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- DeMets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, *181*(1), 1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
- Gunawan, E., Kongko, W., Kholil, M., Widyantoro, B. T., Widiyantoro, S., Supendi, P., Hanifa, N. R., Anjasmara, I. M., Pratama, C., & Gusman, A. R. (2022). The 2019 Mw 7.0 Banten, Indonesia, intraslab earthquake: investigation of the coseismic slip, tsunami modelling and Coulomb stress change. *Geoenvironmental Disasters*, *9*(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00215-4>
- Gunawan, E., & Widiyantoro, S. (2019). Active tectonic deformation in Java, Indonesia inferred from a GPS-derived strain rate. *Journal of Geodynamics*, *123*, 49–54.
- 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.

- McLoughlin, I. V., Wong, K. J., & Tan, S. L. (2011). Data collection, communications and processing in the Sumatran GPS array (SuGAR). *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, WCE 2011*, 2, 1732–1736.
- Natadikara, R., Fauzi, A. I., Anggara, O., Perdana, R. S., Alif, S. M., Julzarika, A., Nurtyawan, R., & Rohman, A. (2023). Monitoring Deformation of Anak Krakatoa Volcano Using Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) Method. *AIP Conference Proceedings*, 2941(1). <https://doi.org/10.1063/5.0181540>
- Purwaningsih, R. E. Y., Sekarsari, A., Sari, T. W., Pratama, C., & Wibowo, S. T. (2022). Active tectonics of the eastern java based on a decade of recent continuous geodetic observation. *Geodesy and Geodynamics*, 13(4), 376–385.
- Sikder, M. A. A., Wu, F., & Zhao, Y. (2019). Displacement Monitoring of CORS Reference Stations Using GNSS Precise Point Positioning in Bangladesh. *International Conference on Signal Processing Proceedings, ICSP, 2018-Augus*(June 2019), 1060–1064.
- Stein, S. and Wysession, M. (2009). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. *Physics Today*, 56(10), 66–67. <https://doi.org/10.1063/1.1629009>
- Supendi, P., Muhari, A., & Rawlinson, N. (2020). Potential megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java , Indonesia. *Research Square*, 1–9.
- Walter, T. R., Haghshenas Haghighi, M., Schneider, F. M., Coppola, D., Motagh, M., Saul, J., Babeyko, A., Dahm, T., Troll, V. R., Tilmann, F., Heimann, S., Valade, S., Triyono, R., Khomarudin, R., Kartadinata, N., Laiolo, M., Massimetti, F., & Gaebler, P. (2019). Complex hazard cascade culminating in the Anak Krakatau sector collapse. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12284-5>
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>