



Analisis Deformasi Longsor Menggunakan Metode *Interferometric Synthetic Aperture* Radar dan *Fault Fracture Density* pada Jalan Poros Samboja-Sepaku

Yoga Albi Ramadhani^{1*}, Panggea Ghiyats Sabrian¹, Puspa Indah Rindawati¹

¹ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.2872>

Article Info:

Received : 18 Juli 2026
Revised : 12 Agustus 2026
Accepted : 19 Agustus 2026
Published : 22 September 2026

Correspondence:

Yoga Albi Ramadhani

Phone:

Abstract: The Samboja-Sepaku main road, one of the access routes to the new capital city of Nusantara (IKN), experienced a landslide in December 2024 that cut off road access. This study aims to identify the geological conditions, landslide characteristics, and ground surface deformation in the study area, and to analyze the relationship between the landslide and geological conditions, deformation derived from Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) processing, and Fault Fracture Density (FFD). Surface deformation was analyzed using the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR method based on Sentinel-1 imagery from January 2024 to March 2026, while the density of geological structures was analyzed using the FFD method based on lineaments extracted from DEM data. The results show that the study area is composed of claystone, fine sandstone, and interbedded claystone-fine sandstone lithologies, forming a denudational landform of hills affected by moderate to severe erosion. The landslide is characterized as a translational slide involving a mixture of soil and rock material. SBAS-InSAR processing revealed subsidence-type deformation ranging from -20 to -60 mm/year at the landslide points, while FFD analysis showed lineament density dominated by high to moderate values. Zones of high deformation were associated with zones of high to moderate lineament density, indicating that fracture-related geological structures act as weak planes controlling the deformation process. The plastic, water-saturation-prone claystone lithology, combined with steep slope gradients, accelerated soil mass movement in zones with high structural density. Overall, the geological conditions and regional structures in the form of folds and faults are the main controlling factors of deformation and landslide occurrence in the study area.

Keywords: Deformation; Landslide; InSAR; SBAS; Fault Fracture Density; Samboja-Sepaku Main Road .

Citation: Ramadhani, Y. A., Sabrian, P. G., & Rindawati, P. I. (2026). Analisis Deformasi Longsor Menggunakan Metode Interferometric Synthetic Aperture Radar dan Fault Fracture Density pada Jalan Poros Samboja-Sepaku. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5676–5681. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.2872>

Pendahuluan

Kalimantan merupakan wilayah dengan kondisi tektonik yang kompleks akibat interaksi Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik yang membentuk konfigurasi geologi Kalimantan bagian timur (Hamilton, 1979). Jalan Poros Samboja-Sepaku, yang terletak di Kecamatan Samboja, Kabupaten Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur, merupakan salah satu jalur akses menuju Ibu Kota Nusantara (IKN) dan secara geologi berada dalam Cekungan Kutai yang tersusun

oleh endapan sedimen Tersier serta mengalami deformasi struktur akibat proses tektonik regional. Aktivitas sesar dangkal di kawasan ini tetap tercatat meskipun Kalimantan bukan merupakan batas lempeng aktif, dan dapat menimbulkan deformasi lokal (Segoro, 2025). Pada Desember 2024, ruas jalan tersebut mengalami longsor yang mengakibatkan terputusnya akses menuju IKN.

Deformasi permukaan tanah, baik berupa penurunan (*subsidence*), pengangkatan (*uplift*), maupun

pergeseran lateral, berpotensi menimbulkan kerusakan infrastruktur dan meningkatkan risiko bencana geologi (Galloway & Burbey, 2011). *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) merupakan teknik penginderaan jauh yang memanfaatkan data radar satelit, seperti Sentinel-1, untuk mengukur deformasi permukaan bumi hingga skala milimeter, sehingga sesuai untuk memantau penurunan tanah dan aktivitas sesar aktif (Nurtyawan, 2024).

Di sisi lain, kepadatan struktur geologi seperti sesar dan rekahan berperan penting dalam mengontrol zona kerentanan longsor (Zahrattunnisa dkk., 2023), dan pola rekahan permukaan yang dianalisis melalui kelurusan (*lineament*) berkaitan dengan distribusi tegangan yang dikontrol oleh struktur bawah permukaan (Walter & Motagh, 2014). Penelitian terdahulu umumnya menerapkan InSAR dan analisis struktur geologi secara terpisah untuk kajian deformasi dan kerentanan longsor (Cando-Jácome & Martínez-Graña, 2019; Nardini dkk., 2024; Rosi dkk., 2017; Zahrattunnisa dkk., 2023; Nurtyawan & Sigirow, 2024; Jannah dkk., 2025), dengan hasil InSAR/FFD biasanya hanya dihubungkan ke data spasial tanpa verifikasi langsung ke kondisi litologi dan struktur lapangan, serta minim pembahasan tantangan dekorelasi fase akibat vegetasi tropis. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan mengintegrasikan tiga sumber data deformasi SBAS-InSAR, kepadatan struktur/rekahan (FFD), dan observasi geologi lapangan untuk menjelaskan mekanisme longsor pada lereng tropis berlitologi batulempung perselingan pasir halus di jalur infrastruktur vital akses IKN, Kalimantan Timur, sebuah pendekatan terintegrasi yang belum banyak diterapkan pada konteks serupa sebelumnya.

Berdasarkan hal tersebut, deformasi yang terdeteksi InSAR tidak berdiri sendiri, melainkan dipengaruhi kontrol struktural regional, sehingga penelitian ini menggunakan metode *Fault Fracture Density* (FFD) untuk mengevaluasi kepadatan sesar dan rekahan yang kemudian dikorelasikan dengan pola deformasi hasil pengolahan InSAR.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi geologi, karakteristik longsor, serta deformasi permukaan tanah pada daerah penelitian, dan menganalisis hubungan antara longsor dengan kondisi geologi, deformasi hasil pengolahan InSAR, dan FFD pada Jalan Poros Samboja-Sepaku.

Metode

Penelitian ini menggunakan data lapangan dan data satelit. Data primer meliputi deskripsi litologi hasil survei lapangan pada singkapan batuan di titik longsor, klasifikasi jenis longsor berdasarkan observasi visual, data struktur geologi (kekar, lipatan, dan sesar), serta data citra Sentinel-1 sebagai masukan utama pengolahan

InSAR. Data sekunder meliputi peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dari Badan Informasi Geospasial, Peta Geologi Regional Lembar Samarinda (Supriatna dkk., 1995), dan data Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) dengan resolusi spasial sekitar 8 meter.

Pengolahan SBAS-InSAR dilakukan melalui sembilan tahapan, yaitu koreksi orbit satelit, coregistration citra SAR (penyelarasan citra master dan slave), pembentukan interferogram, pengurangan fase topografi menggunakan DEMNAS (resolusi ± 8 m), filtering interferogram dengan metode Goldstein filtering, unwrapping fase menggunakan algoritma SNAPHU, konversi fase ke nilai deformasi permukaan tanah berdasarkan panjang gelombang radar Sentinel-1, perhitungan kecepatan dan deret waktu deformasi (SBAS inversion) dengan metode Least Squares, hingga pembuatan peta deformasi akhir dalam sistem koordinat Lintang/Bujur. Tahapan ini menghasilkan grafik baseline, baseline correlation (0,086–0,102), stack correlation (rerata 0,092; threshold 0,070), peta cumulative LOS displacement, serta peta deformasi akhir.

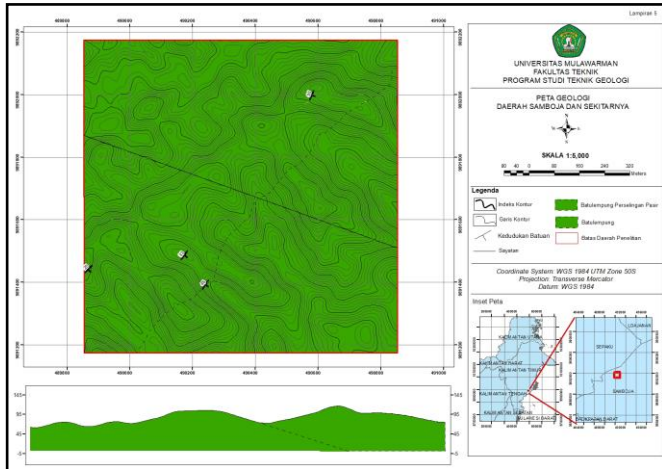
Kepadatan struktur geologi dianalisis menggunakan metode *Fault Fracture Density* (FFD) berbasis data DEM melalui lima tahapan, yaitu persiapan data DEM (penyamaan sistem koordinat dan pemotongan sesuai area penelitian), pembuatan peta turunan DEM berupa hillshade (arah pencahayaan 45°, 225°, dan multidirectional), slope, dan aspek untuk mengidentifikasi kelurusan (*lineament*), ekstraksi *lineament* berdasarkan pola morfologi (punggungan, lembah, kelurusan sungai, dan perubahan topografi), penyusunan peta *lineament* dan diagram roset untuk menentukan arah dominan kelurusan, serta perhitungan nilai FFD menggunakan perangkat GIS untuk menghasilkan peta densitas struktur.

Hasil SBAS-InSAR dan FFD diintegrasikan dengan data lapangan melalui tiga pendekatan analisis, yaitu overlay peta geologi lapangan dengan peta deformasi InSAR untuk mengaitkan litologi dengan zona deformasi yang terbentuk, korelasi jenis longsor hasil observasi visual lapangan dengan pola time-series InSAR pada titik-titik longsor, serta overlay peta FFD dengan peta deformasi dan data struktur lapangan untuk mengevaluasi kontrol struktural terhadap pola deformasi yang teridentifikasi.

Hasil dan Diskusi

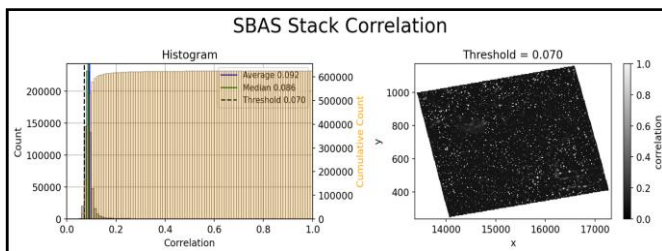
Daerah penelitian tersusun oleh bentuk lahan denudasional berupa perbukitan dengan morfostruktur pasif batupasir dan batulempung yang mengalami erosi menengah hingga parah, serta banyak dialiri lembah-lembah sungai kecil. Identifikasi litologi menunjukkan dua satuan batuan utama, yaitu satuan batulempung berselingan batupasir halus (satuan tertua) dan satuan

batulempung (satuan termuda), dengan batulempung berwarna segar abu-abu dan warna lapuk krem keabu-abuan, bertekstur butir lempung dengan pemilahan sangat baik, serta struktur laminasi. Batupasir halus yang menyisip di antaranya memiliki kemas terbuka dan pemilahan baik. Identifikasi struktur geologi tidak menemukan bidang sesar secara langsung di lapangan, namun ditemukan indikasi zona hancuran pada lereng di titik longsor dan pada beberapa sungai kecil.



Gambar 1. Peta Geologi

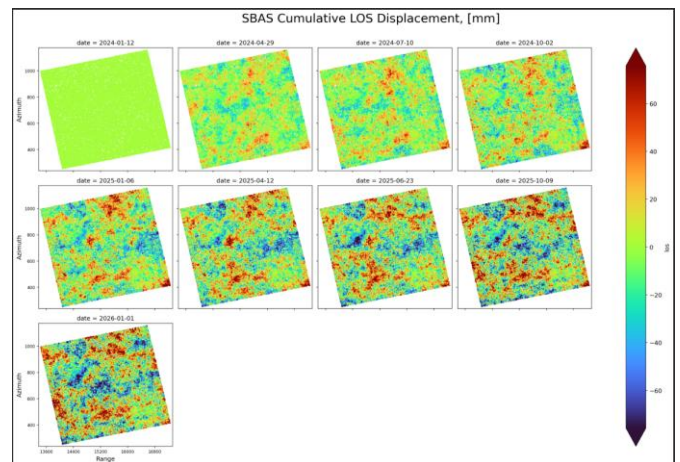
Pengolahan data Sentinel-1 menggunakan metode SBAS-InSAR periode Januari 2024–Maret 2026 menghasilkan nilai korelasi antar pasangan citra berkisar 0,086–0,102 dengan rerata koherensi 0,092 dan *threshold* 0,070, nilai yang disesuaikan dengan karakteristik wilayah tropis bervegetasi yang rentan mengalami dekorelasi temporal (Izumi, 2022).



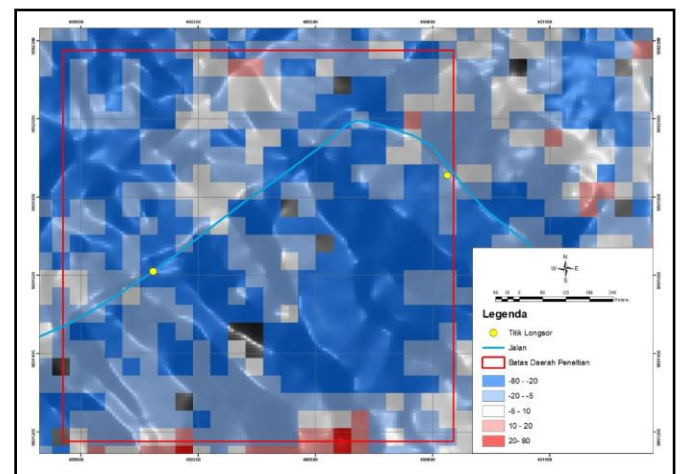
Gambar 2. SBAS stack correlation dan histogram koherensi.

Analisis deret waktu menunjukkan kondisi relatif stabil pada awal 2024, mulai berkembangnya deformasi *subsidence* dan *uplift* pada pertengahan tahun, hingga pola deformasi yang semakin jelas dan meluas pada 2025 dengan nilai mencapai sekitar ± 60 mm.

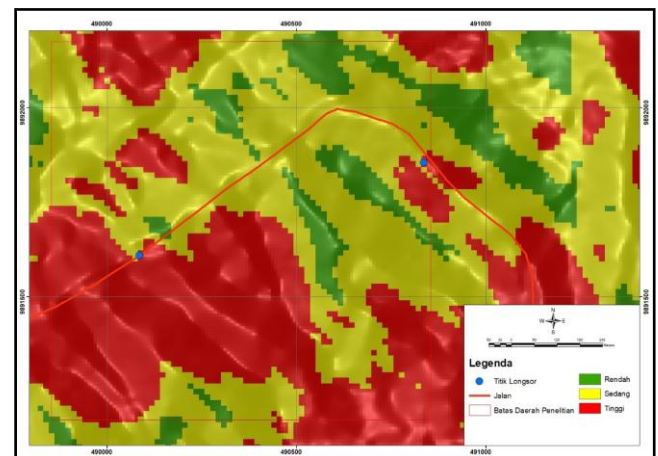
Peta deformasi akhir menunjukkan pola yang didominasi oleh *subsidence*, dengan nilai tertinggi berkisar antara -20 hingga -60 mm/tahun yang terkonsentrasi pada bagian tengah, barat, hingga tenggara daerah penelitian.



Gambar 3. SBAS cumulative LOS displacement periode Januari 2024–Maret 2026.



Gambar 4. Peta Deformasi

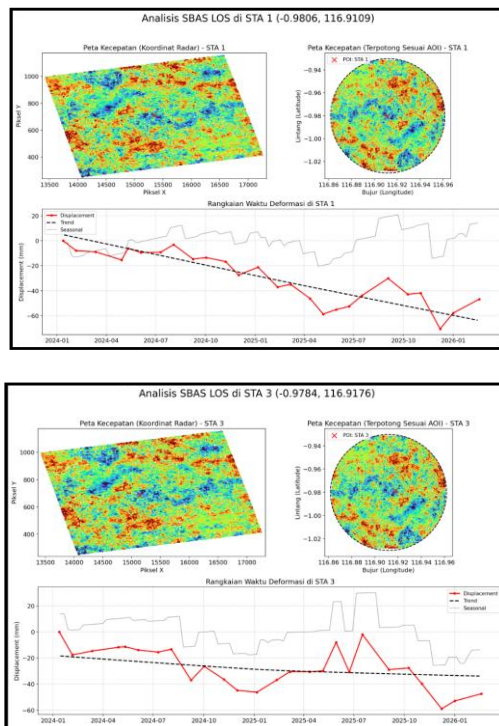


Gambar 5 Peta Densitas lineament

Analisis kelurusan (*lineament*) menggunakan data DEM dengan tiga arah pencahayaan (45° , 225° , dan *multidirectional*) menunjukkan orientasi kelurusan dominan berarah barat laut–tenggara berdasarkan diagram roset. Peta densitas lineament menunjukkan frekuensi tinggi pada bagian tengah, barat daya, dan

tenggara, serta frekuensi sedang yang lebih merata pada bagian utara dan timur daerah penelitian, dengan pola yang berdekatan dengan titik-titik kejadian longsor.

Pada dua titik longsor yang diamati (STA 1 dan STA 3), grafik kecepatan dan deret waktu deformasi menunjukkan perubahan permukaan tanah sepanjang garis pandang satelit (LOS) yang bertahap dan fluktuatif, dengan garis *displacement* yang cenderung menurun dan melampaui garis tren sejak awal 2024, mengindikasikan *subsidence*.



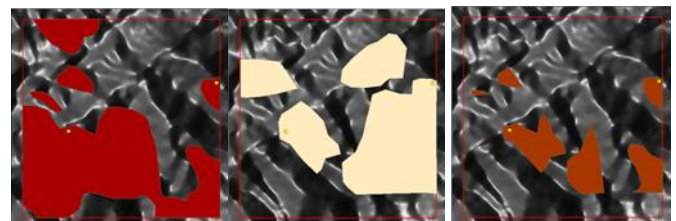
Gambar 6. Grafik Kecepatan dan Waktu Deformasi Pada Titik Longsor

Temuan lapangan pada kedua titik menunjukkan longsoran bertipe translasi (Varnes, 1996) dengan material campuran tanah dan batuan pada litologi batulempung serta batulempung berselingan batupasir halus.

Hubungan antara kondisi geologi dan deformasi longsor terlihat dari hasil *overlay* peta geologi dan peta deformasi, di mana zona *subsidence* tinggi berkembang dominan pada satuan batulempung dan batulempung berselingan batupasir. Butir halus, permeabilitas rendah, serta penurunan kuat geser saat jenuh air menjadikan batulempung rentan terhadap deformasi, sementara kontras sifat fisik pada satuan berselingan batupasir dapat membentuk bidang lemah yang berfungsi sebagai bidang gelincir saat mengalami pelunakan akibat air (Zheng dkk., 2018). Faktor kemiringan lereng turut berperan sebagai pengontrol distribusi deformasi, sejalan dengan Cando-Jácome dan Martínez-Graña (2019) yang menyatakan bahwa deformasi hasil InSAR

umumnya berkorelasi dengan bentuklahan yang mengalami perubahan relief akibat proses tektonik dan geomorfik.

Hubungan antara deformasi dan FFD ditunjukkan oleh kesesuaian spasial antara zona *subsidence* tinggi dengan zona densitas *lineament* menengah hingga tinggi. Keberadaan rekahan dan kekar berupa zona hancuran, meskipun tanpa bidang sesar yang teramati langsung, memungkinkan terjadinya pelemahan massa batuan sekaligus menjadi jalur infiltrasi air yang meningkatkan tekanan pori dan menurunkan kohesi material. Pola ini konsisten dengan Zahratunnisa dkk. (2023) yang menunjukkan kuatnya hubungan antara kepadatan kelurusan dan distribusi longsor.



Gambar 6. Densitas Deformasi, Densitas *lineament*, *overlay*

Orientasi kelurusan secara regional dominan timur laut-barat daya pada bagian timur daerah penelitian juga sejalan dengan indikasi struktur regional berupa lipatan antiklin dan sesar, sehingga kelurusan yang teridentifikasi merupakan refleksi dari sistem struktur geologi regional yang lebih luas, bukan struktur yang berdiri sendiri.

Kesimpulan

Kesimpulan pada analisis deformasi longsor menggunakan InSAR dan FFD, dapat disimpulkan bahwa:

Kondisi geologi daerah penelitian tersusun oleh litologi berupa batulempung, batupasir halus, serta batulempung perselingan batupasir halus. Secara geomorfologi, daerah penelitian merupakan bentuk asal denudasional berupa perbukitan dengan erosi menengah hingga parah. Hasil identifikasi struktur geologi menunjukkan adanya zona rekahan yang berperan sebagai bidang lemah. Karakteristik longsor pada daerah penelitian berupa longsoran translasi (translational slide) dengan material longsoran berupa campuran tanah dan batuan dengan litologi batulempung perselingan batupasir halus dan juga batulempung. Berdasarkan hasil pengolahan InSAR metode SBAS menggunakan data Sentinel-1 periode Januari 2024–Maret 2026, daerah penelitian menunjukkan deformasi permukaan berupa *subsidence* dengan nilai deformasi berkisar sekitar -20 hingga -60

mm/tahun pada titik longsor. Lalu pada hasil identifikasi lineament dengan FFD didapatkan hasil pada daerah penelitian didominasi dengan kepadatan lineament tinggi hingga sedang.

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa deformasi longsor memiliki hubungan yang kuat dengan kondisi geologi daerah penelitian. Litologi batulempung yang mudah mengalami pelapukan dan jenuh air ditambah adanya perselingan batupasir halus yang membuat batulempung berpotensi menjadi bidang gelincir, hasil dari analisis kemiringan lereng yang relatif curam dan hasil identifikasi geomorfologi berupa perbukitan dengan erosi tinggi hingga menengah mempercepat pergerakan massa permukaan tanah sehingga deformasi subsidence dengan intensitas tinggi terjadi di beberapa area pada daerah penelitian, hasil identifikasi struktur dari data DEM menunjukkan adanya struktur geologi regional berupa lipatan antiklin dan juga patahan, lineament pada hasil analisis FFD dapat diartikan sebagai refleksi atau dampak dari struktur regional tersebut serta zona dengan densitas lineament tinggi memiliki keterkaitan dengan zona deformasi tinggi hasil pengolahan dari InSAR dan lokasi kejadian longsor diperkuat dengan adanya temuan zona hancuran atau rekahan pada daerah penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa struktur geologi berupa rekahan atau lipatan berperan sebagai faktor pengontrol utama terhadap terjadinya deformasi dan longsor pada daerah penelitian.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing serta Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Mulawarman yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

Referensi

- Allen, G. P., & Chambers, J. L. C. (1998). Sedimentation in the modern and Miocene Mahakam delta. *IPA Special Publication*, 159-171.
- Cando-Jácome, M., & Martínez-Graña, A. (2019). Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador). *Environmental Earth Sciences*, 78, 499.
- European Space Agency. (2013). *Sentinel-1 user handbook* (Issue 1 Rev 0). ESA.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1).
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8).
- Guo, J. (2024). The latest development of synthetic aperture radar: An overview. *Applied and Computational Engineering*, 112, 186-193.
- Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (U.S. Geological Survey Professional Paper 1078). U.S. Geological Survey.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). *The Varnes classification of landslide types, an update*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Jannah, D. M., Wibowo, N. B., Rosyida, H., Elsha, F. C., Khoirunnisa, S., Mery, I., & Khaerunnisa, I. (2025). Analisis Fault Fracture Density (FFD) pada zona rawan bencana tanah longsor Kabupaten Ngawi. *Kurvatek*, 10(2), 155-162.
- Mabee, S. B., Hardcastle, K. C., & Wise, D. U. (1994). A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Ground Water*, 32(6), 884-894.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *Microwaves and Radar Institute, German Aerospace Center (DLR)*.
- Moss, S. J., & Chambers, J. L. C. (1999). Tectonic evolution of the Kutai Basin, Kalimantan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17, 245-257.
- Nardini, O., Confuorto, P., Intrieri, E., Montalti, R., Montanaro, T., Garcia Robles, J., Poggi, F., & Raspini, F. (2024). Integration of satellite SAR and optical acquisitions for the characterization of the Lake Sarez landslides in Tajikistan. *Earth Sciences Department, University of Firenze*.
- Nugroho, A. (2019). *Kamus geologi*. Penerbit Ombak.
- Nurtyawan, R., & Sigirow, R. B. (2024). Lembang fault deformation study using Sentinel-1A image with PS-InSAR method. 5(6).
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L., Tacconi Stefanelli, C., Agostini, A., Catani, F., & Casaglini, N. (2017). The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: Geomorphological features and landslide distribution. *Department of Earth Sciences, University of Firenze*.
- Sahu, S. R., & Rawat, K. S. (2023). Analysis of land subsidence in coastal and urban areas by using various techniques: Literature review. *Indonesian Journal of Geography*, 55(3), 488-495.
- Supriatna dkk. (1995). *Peta geologi lembar Samarinda, Kalimantan Timur*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sunan, H. L., Gibran, A. K., Aditama, M. R., Iswahyudi, S., Widiatmoko, F. R., Widagdo, A., & Laksono, F. A. T. (2021). Interpretasi struktur geologi berdasarkan Fault Fracture Density (FFD) dan implikasinya terhadap potensi likuefaksi di daerah Kalibening, Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah. 42(1), 47-54.
- Varnes, D. J. (1996). *Landslide and mitigation, Chapter 3: Landslide types and process*. United States Geological Survey.
- Verstappen, H. Th. (1983). *Applied geomorphology: Geomorphological survey for environmental management*. Elsevier.
- Walter, T. R., & Motagh, M. (2014). Deflation and inflation of a large magma body beneath Uturuncu volcano, Bolivia:

- Insights from InSAR data, surface lineaments and stress modelling. *Geophysical Journal International*.
- Zahrattunnisa, Saepuloh, A., Kriswati, E., & Basuki, A. (2023). Application of modified Segment Tracing Algorithm (mSTA) method to identify landslide susceptibility zones around Mt. Sinabung, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1245, 012012.
- Zheng, Y., Chen, C., Liu, T., Zhang, W., & Song, Y. (2018). Slope failure mechanisms in dipping interbedded sandstone and mudstone revealed by model testing and distinct-element analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 49–68.
- Zuidam, R. A. van. (1985). *Guide to geomorphologic aerial photograph interpretation and mapping*. ITC Enschede.