

Identifikasi Zona Potensi Risiko Tektonik untuk Mendukung Perencanaan Lingkungan Menggunakan SAR, NDVI, dan Unsupervised Machine Learning

Hilmiyati Ulinnuha^{1*}, Agung Hidayat², Frida Agung Rakhmadi³

¹Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

²Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

³Prodi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, Indonesia

Received: 20/05/2026 Accepted: 19/06/2026

Abstract

Surface deformation is a geodynamic phenomenon that reflects continuous and episodic tectonic activity and has significant implications for environmental conditions, including increased susceptibility to landslides, land degradation, and infrastructure instability. Although Synthetic Aperture Radar (SAR) technology enables high-resolution deformation monitoring, most studies still focus primarily on deformation analysis without comprehensively integrating environmental indicators for spatial planning. This study aims to perform active deformation zoning by integrating Sentinel-1 deformation data with vegetation conditions represented by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from Sentinel-2 imagery. Deformation data were processed using time-series analysis with LiCSBAS to obtain cumulative displacement and subsequently integrated with NDVI using unsupervised machine learning approaches based on anomaly detection, namely Isolation Forest and Local Outlier Factor. This method was applied to the western region of Java Island. The results demonstrate that the proposed method effectively classifies the study area into zones with varying levels of potential tectonic risk. Areas characterized by high anomaly scores and low NDVI values are interpreted as highly potential risk zones with potential environmental degradation, whereas areas with low anomaly scores and high NDVI values are relatively stable. Spatially, the highest risk zones are identified in western Java Island, particularly in North Jakarta, Sukabumi, and Cianjur, where active deformation is dominant.

Keywords: Deformation risk zonation; Isolation Forest; NDVI; SAR; Unsupervised machine learning.

Abstrak

Deformasi permukaan bumi merupakan fenomena geodinamika yang mencerminkan aktivitas tektonik kontinu maupun episodik serta berimplikasi terhadap kondisi lingkungan, seperti peningkatan kerentanan longsor, degradasi lahan, dan gangguan infrastruktur. Meskipun teknologi *Synthetic Aperture Radar* (SAR) memungkinkan pemantauan deformasi beresolusi tinggi, sebagian besar studi masih berfokus pada deformasi tanpa mengintegrasikannya dengan indikator lingkungan untuk perencanaan wilayah. Penelitian ini bertujuan melakukan zonasi deformasi aktif dengan mengintegrasikan data Sentinel-1 dan kondisi vegetasi yang direpresentasikan oleh *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dari Sentinel-2. Data deformasi diolah menggunakan analisis deret waktu berbasis LiCSBAS untuk memperoleh kumulatif displacement, kemudian diintegrasikan dengan NDVI menggunakan pendekatan *unsupervised machine learning* berbasis deteksi anomali, yaitu *Isolation Forest* dan *Local Outlier Factor*. Metode ini

* **Corresponding Author:** hilmiyatiulinnuha01@ugm.ac.id

diaplikasikan ke wilayah Pulau Jawa bagian barat. Hasilnya menunjukkan bahwa metode ini mampu mengklasifikasikan wilayah ke dalam zona potensi risiko tektonik dengan karakteristik berbeda. Zona dengan anomali tinggi dan NDVI rendah diinterpretasikan sebagai area potensi risiko tinggi dan berpotensi mengalami degradasi lingkungan, sedangkan zona dengan anomali rendah dan NDVI tinggi relatif stabil. Secara spasial, risiko tertinggi teridentifikasi di wilayah Pulau Jawa bagian barat, termasuk Jakarta Utara, Sukabumi, dan Cianjur sebagai zona dengan dominasi deformasi aktif.

Kata kunci: Isolation Forest; NDVI; SAR; Unsupervised machine learning; Zonasi risiko deformasi

PENDAHULUAN

Deformasi permukaan bumi merupakan fenomena geodinamika yang mencerminkan aktivitas tektonik yang berlangsung secara kontinu maupun episodik (Ide & Chen, 2024; Katili, 1991; Ma et al., 2019; Ulinuha et al., 2019; Wu et al., 2006). Di wilayah yang aktif secara tektonik, deformasi permukaan tidak hanya berkaitan dengan potensi kejadian gempa bumi, tetapi juga berimplikasi terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti peningkatan kerentanan longsor, degradasi lahan, serta gangguan terhadap kestabilan infrastruktur dan tata ruang. Oleh karena itu, pemantauan deformasi permukaan menjadi aspek penting dalam mendukung perencanaan lingkungan yang berkelanjutan.

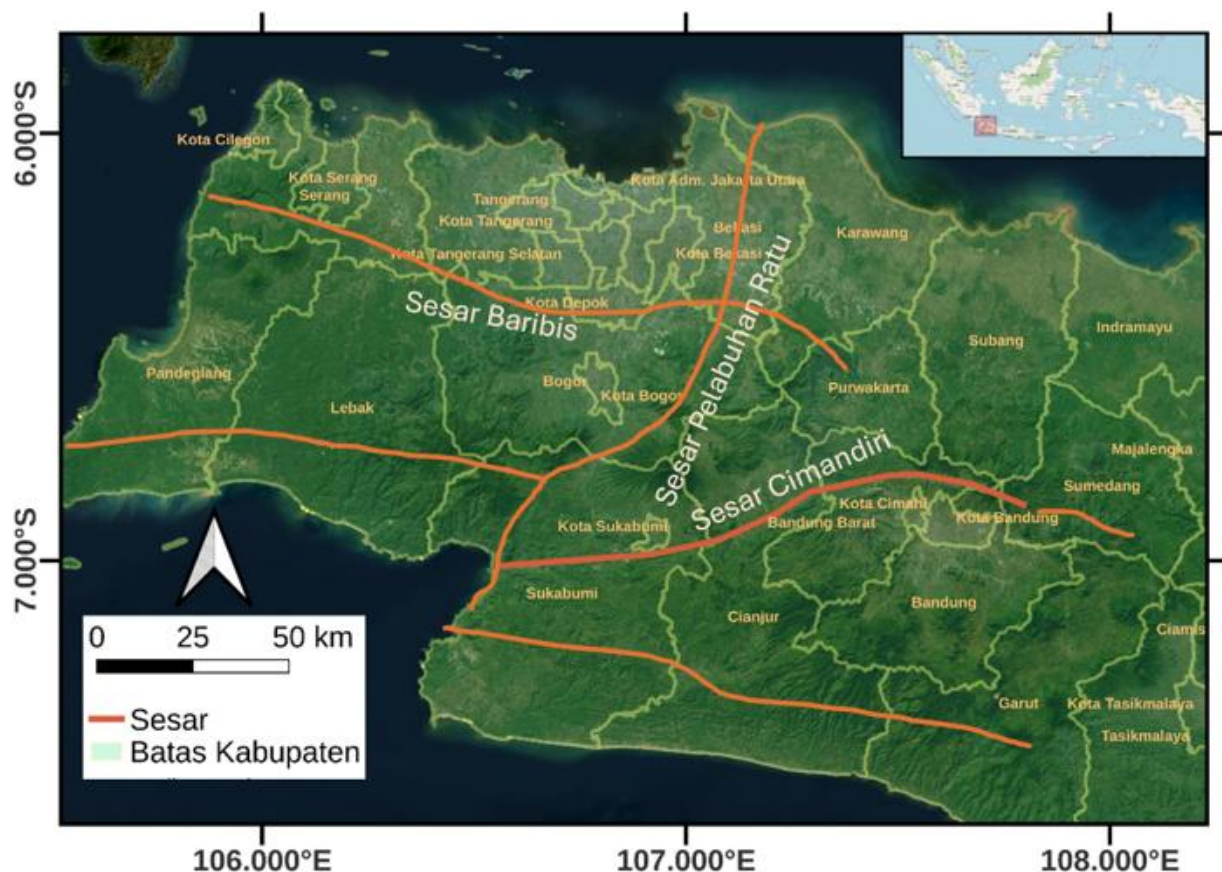
Perkembangan teknologi penginderaan jauh, khususnya *Synthetic Aperture Radar* (SAR) dari satelit Sentinel-1, telah memungkinkan pengamatan deformasi permukaan dengan resolusi spasial tinggi dan cakupan area yang luas (Daramola et al., 2025; Lu et al., 2025; Saraswat et al., 2024, 2025; Zhang et al., 2025). Metode ini mampu mendeteksi perubahan deformasi hingga skala milimeter, sehingga sangat efektif untuk mengidentifikasi dinamika deformasi secara spasial dan temporal. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada analisis deformasi, analisis untuk mengaitkannya secara langsung dengan kondisi lingkungan yang relevan untuk perencanaan wilayah masih terbatas. Di sisi lain, kondisi lingkungan, khususnya vegetasi, dapat direpresentasikan melalui indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) yang diperoleh dari citra optik Sentinel-2. NDVI banyak digunakan sebagai indikator kesehatan vegetasi dan kondisi tutupan lahan, yang berperan penting dalam menjaga stabilitas tanah dan mengurangi risiko degradasi lingkungan. Integrasi antara informasi deformasi dan kondisi vegetasi berpotensi memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kerentanan lingkungan suatu wilayah.

Salah satu wilayah yang memiliki potensi deformasi tektonik aktif di Pulau Jawa bagian barat adalah zona sesar darat yang berkembang secara kompleks, seperti Sesar Cimandiri, serta sesar-sesar lain yang berasosiasi, termasuk Sesar Pelabuhan Ratu dan bagian dari sistem Sesar Baribis. Sistem sesar ini membentang dari wilayah Pelabuhan Ratu hingga Cianjur dan sekitarnya, serta menunjukkan karakteristik pergerakan yang kompleks dengan kombinasi komponen geser dan kompresi. Selain itu, wilayah ini juga dipengaruhi oleh kedekatannya dengan zona subduksi Sunda, yang turut berperan dalam mengontrol dinamika deformasi regional. Kondisi tektonik tersebut berasosiasi dengan morfologi berupa perbukitan dan lereng curam, sehingga menjadikan wilayah ini rentan terhadap berbagai permasalahan lingkungan, seperti longsor dan degradasi lahan, terutama pada area dengan tutupan vegetasi yang rendah. Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan informasi deformasi permukaan dengan indikator lingkungan di wilayah ini masih relatif terbatas (Farrasha et al., 2024; Haryanto, n.d.; Haryanto et al., n.d.; Helmi, 2024; Kajian et al., 2025), khususnya dalam konteks pemetaan zonasi yang dapat mendukung perencanaan lingkungan. Dengan kondisi tersebut, diperlukan pemantauan berkelanjutan di Pulau Jawa bagian barat.

Seiring dengan meningkatnya kompleksitas data spasial, pendekatan berbasis data (*data-driven*) menjadi semakin penting dalam analisis geospasial. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *unsupervised machine learning* (Tiwari & Shirzaei, 2024), yang mampu mengelompokkan data berdasarkan pola alami tanpa memerlukan label awal. Metode ini memungkinkan segmentasi atau zonasi wilayah secara objektif berdasarkan karakteristik deformasi dan kondisi lingkungan yang terintegrasi.

Keterbatasan metode konvensional dalam mengintegrasikan data deformasi dan indikator lingkungan secara objektif mendorong penelitian ini untuk melakukan zonasi deformasi aktif menggunakan data SAR Sentinel-1 dan NDVI Sentinel-2 dengan pendekatan *unsupervised machine learning*. Metode ini diaplikasikan pada wilayah Pulau Jawa bagian barat untuk menghasilkan zonasi berbasis data yang mampu merepresentasikan tingkat potensi risiko tektonik untuk mendukung perencanaan lingkungan berbasis spasial. Hasil zonasi diharapkan dapat mengidentifikasi wilayah dengan tingkat potensi risiko yang berbeda serta memberikan informasi yang relevan dalam mendukung perencanaan lingkungan dan pengelolaan wilayah secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Lokasi penelitian

Data dan Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah Pulau Jawa bagian barat yang dilalui oleh beberapa sesar aktif, salah satunya yaitu Sesar Cimandiri (Gambar 1). Data yang digunakan terdiri atas citra Sentinel-1 untuk analisis deformasi permukaan dan citra optik Sentinel-2 untuk ekstraksi indeks vegetasi. Deformasi permukaan diekstraksi dari citra SAR Sentinel-1 karena metode SAR memanfaatkan informasi fase gelombang radar untuk mendeteksi perubahan posisi permukaan secara presisi. Sementara itu, analisis vegetasi dilakukan menggunakan citra optik Sentinel-2 karena perhitungan NDVI memerlukan kanal spektral merah (*Red*) dan inframerah dekat (NIR) yang tidak tersedia pada Sentinel-1.

Data Sentinel-1 yang digunakan merupakan data *descending mode Interferometric Wide (IW)* dengan polarisasi VV dan mencakup periode Januari 2022 hingga Desember 2025 untuk memperoleh pola deformasi permukaan dalam rentang waktu yang panjang. Adapun data Sentinel-2 dipilih pada Oktober 2025, yaitu pada akhir periode pengamatan deformasi, untuk merepresentasikan kondisi vegetasi terkini di wilayah penelitian. Dalam penelitian ini, NDVI digunakan sebagai informasi pendukung untuk interpretasi spasial hasil deformasi permukaan dan tidak dimaksudkan untuk menganalisis dinamika vegetasi secara

temporal. Pemilihan citra pada akhir periode pengamatan juga dilakukan agar kondisi vegetasi yang ditampilkan sesuai dengan kondisi permukaan yang paling mendekati waktu akhir analisis deformasi dan merepresentasikan kondisi vegetasi terkini di wilayah penelitian.

Pengolahan data Sentinel-1 dengan LiCSBAS

Pengolahan data Sentinel-1 dilakukan menggunakan metode SAR berbasis deret waktu dengan bantuan perangkat lunak LiCSBAS. Data interferogram orbit *descending* yang diperoleh dari sistem LiCSAR diolah untuk menghasilkan informasi deformasi permukaan secara spasial dan temporal. Tahapan pengolahan meliputi pemilihan data time series interferogram, pengurangan noise dan kesalahan fase, proses *unwrapping* fase, serta analisis deret waktu untuk memperoleh deformasi kumulatif. Selanjutnya, dari hasil pengolahan tersebut diekstraksi beberapa parameter deformasi pada setiap piksel, yaitu kecepatan deformasi, perubahan deformasi kumulatif, standar deviasi deformasi, serta tren deformasi. Parameter-parameter ini digunakan untuk merepresentasikan karakteristik deformasi permukaan secara komprehensif dan menjadi dasar dalam analisis zonasi selanjutnya.

Akuisisi data NVDI dari Sentinel-2

Data NDVI diperoleh dari produk *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) berbasis citra Sentinel-2 yang diunduh melalui *platform Copernicus Data Space Ecosystem*. Data yang digunakan adalah data bulan Oktober 2025 dan digunakan sebagai representasi kondisi vegetasi pada area penelitian. Data ini telah melalui proses koreksi atmosfer dan penyaringan awan secara internal. Data NDVI kemudian dimanfaatkan sebagai indikator kondisi tutupan vegetasi dalam mendukung zonasi deformasi aktif untuk perencanaan wilayah.

Integrasi data deformasi dan NDVI

Data deformasi permukaan diperoleh dari hasil pengolahan SAR berbasis citra Sentinel-1 menggunakan perangkat lunak LiCSBAS. Output yang digunakan berupa data cumulative *Line-of-Sight* (LOS) *displacement* dalam format HDF5 (*cum_filt.h5*). Nilai deformasi yang digunakan dalam analisis merupakan nilai kumulatif yang merepresentasikan akumulasi deformasi selama periode pengamatan. Data deformasi yang tersimpan dalam format HDF5 dikonversi menjadi grid raster dengan memanfaatkan informasi koordinat lintang dan bujur. Selanjutnya, data NDVI dan deformasi diselaraskan secara spasial dengan memastikan kesesuaian sistem koordinat dan resolusi spasial. Selanjutnya, data *displacement* dan NDVI diintegrasikan untuk analisis lebih lanjut.

Zonasi menggunakan unsupervised machine learning

Zonasi deformasi dilakukan menggunakan pendekatan unsupervised machine learning berbasis deteksi anomali dengan memanfaatkan algoritma *Isolation Forest* (IF) dan *Local Outlier Factor* (LOF). Kedua algoritma ini digunakan untuk mengidentifikasi piksel yang memiliki karakteristik berbeda secara signifikan dibandingkan pola umum data. Dalam penelitian ini, nilai LOS *displacement* hasil pengolahan LiCSBAS dan nilai NDVI digunakan sebagai fitur utama yang dikombinasikan dalam bentuk vektor fitur pada setiap piksel. Sebelum proses pemodelan dilakukan, data dibersihkan dengan menghilangkan nilai yang tidak valid atau mengandung nilai kosong (NaN), serta dibatasi hanya pada area daratan berdasarkan *threshold* NDVI untuk menghindari bias dari area perairan.

Isolation Forest digunakan untuk mendeteksi anomali secara global melalui mekanisme isolasi berbasis pohon acak. Dalam implementasi ini, nilai yang dihasilkan berupa *decision function score*, dengan nilai yang lebih rendah menunjukkan tingkat anomali yang lebih tinggi. Dengan demikian, piksel dengan skor *Isolation Forest* yang rendah diinterpretasikan sebagai area yang memiliki karakteristik deformasi yang tidak umum dibandingkan keseluruhan distribusi data. Di sisi lain, *Local Outlier Factor* digunakan untuk mendeteksi anomali berdasarkan kepadatan lokal dengan membandingkan kerapatan suatu piksel terhadap piksel di sekitarnya. Nilai LOF yang digunakan telah ditransformasikan menjadi positif, sehingga nilai yang lebih tinggi menunjukkan tingkat anomali yang lebih kuat. Piksel dengan nilai LOF tinggi mengindikasikan adanya perbedaan signifikan terhadap lingkungan lokalnya. Hasil dari kedua metode ini kemudian dikembalikan ke dalam bentuk grid raster untuk menghasilkan distribusi spasial anomali deformasi baik secara global maupun lokal. Dalam penelitian ini, metode *Isolation Forest* diterapkan

dengan parameter $n_estimators$ sebesar 100 dan $contamination$ sebesar 0,05, sedangkan *Local Outlier Factor* menggunakan $n_neighbors$ sebesar 20 dan $contamination$ sebesar 0,05.

Interpretasi Zonasi untuk Perencanaan Lingkungan

Zonasi deformasi diperoleh melalui integrasi hasil deteksi anomali dari metode *Isolation Forest* dan *Local Outlier Factor* dengan mempertimbangkan kondisi vegetasi berdasarkan nilai NDVI. Kedua algoritma dikombinasikan karena memiliki prinsip deteksi yang berbeda. *Isolation Forest* mengidentifikasi anomali berdasarkan kemudahan suatu observasi terisolasi dari keseluruhan data, sedangkan *Local Outlier Factor* mendeteksi anomali berdasarkan perbedaan kepadatan lokal terhadap lingkungan sekitarnya. Kombinasi keduanya diharapkan mampu meningkatkan keandalan deteksi anomali dibandingkan penggunaan satu metode saja. Penggabungan hasil tidak dilakukan melalui pembobotan numerik, melainkan menggunakan pendekatan berbasis aturan (*rule-based*). Piksel dikategorikan sebagai zona risiko tinggi apabila secara bersamaan memiliki skor *Isolation Forest* yang berada di bawah persentil ke-10, skor *Local Outlier Factor* yang berada di atas persentil ke-90, serta nilai NDVI kurang dari 0,3. Dengan demikian, zona risiko tinggi hanya diberikan pada area yang secara konsisten teridentifikasi sebagai anomali oleh kedua algoritma dan didukung oleh kondisi vegetasi yang relatif rendah.

Nilai risiko direpresentasikan dalam bentuk kontinu, dengan nilai yang lebih tinggi menunjukkan kombinasi karakteristik anomali yang lebih kuat, yaitu skor *Isolation Forest* yang rendah dan nilai *Local Outlier Factor* yang tinggi, serta kondisi NDVI yang rendah. Dengan demikian, area dengan nilai risiko yang lebih besar diinterpretasikan sebagai wilayah yang menunjukkan indikasi deformasi tidak normal dan berpotensi memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi terhadap aktivitas tektonik, sedangkan area dengan nilai risiko yang lebih rendah menunjukkan kondisi yang relatif lebih stabil. Selain analisis berbasis piksel, hasil zonasi diintegrasikan dengan data batas administrasi kabupaten melalui proses *overlaying*. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi wilayah kabupaten yang memiliki kecenderungan potensi nilai risiko lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya, sehingga memberikan gambaran spasial yang lebih relevan dalam konteks perencanaan berbasis wilayah.

Melalui integrasi tersebut, kabupaten dengan nilai risiko yang lebih tinggi dapat diinterpretasikan sebagai wilayah yang secara dominan memiliki karakteristik deformasi anomali, sehingga memerlukan perhatian lebih dalam perencanaan pembangunan, pengelolaan lingkungan, dan mitigasi risiko. Sebaliknya, kabupaten dengan nilai risiko yang lebih rendah cenderung menunjukkan kondisi deformasi yang relatif lebih stabil. Informasi ini memberikan dasar awal dalam mendukung pengambilan keputusan dan perencanaan pengembangan lingkungan berbasis spasial. Namun, hasil interpretasi masih memiliki keterbatasan karena analisis deformasi hanya didasarkan pada komponen *LOS displacement* dari citra Sentinel-1. Nilai *LOS displacement* hanya merepresentasikan pergerakan permukaan yang searah dengan garis pandang satelit, sehingga belum mampu menggambarkan secara utuh komponen deformasi horizontal maupun vertikal yang terjadi di lapangan. Akibatnya, pola deformasi yang kompleks, terutama pada wilayah yang dipengaruhi aktivitas sesar aktif, berpotensi tidak teridentifikasi secara menyeluruh. Selain itu, hasil analisis juga dipengaruhi oleh resolusi spasial dan kualitas data input yang digunakan dalam proses pengolahan dan deteksi anomali. Oleh karena itu, interpretasi yang dihasilkan perlu dikombinasikan dengan sumber data lain untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif. Integrasi data Sentinel-1 orbit *ascending* dan *descending*, atau mengombinasikan hasil SAR dengan data GNSS dapat dilakukan untuk penelitian lebih lanjut, sehingga komponen deformasi tiga dimensi dapat diestimasi dengan lebih baik dan menghasilkan interpretasi yang lebih representatif terhadap kondisi deformasi permukaan yang sebenarnya.

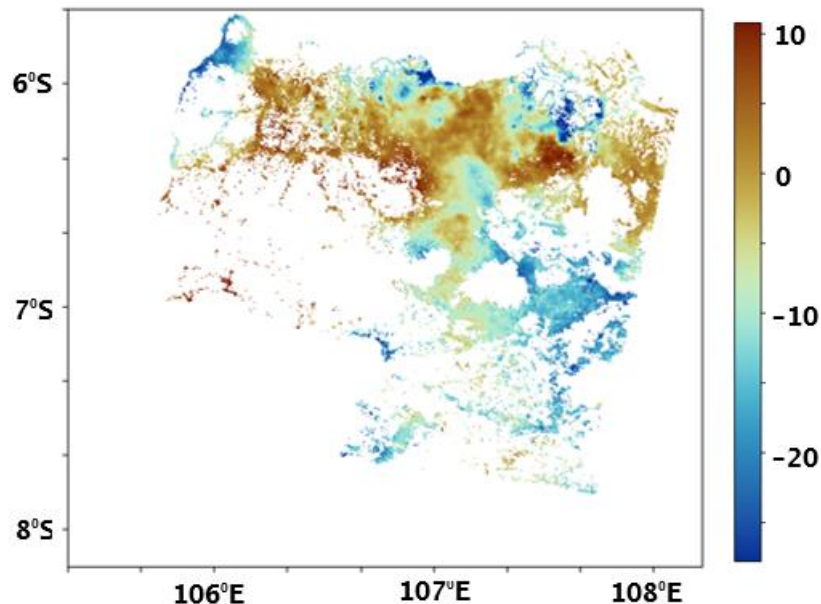
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *LOS displacement*

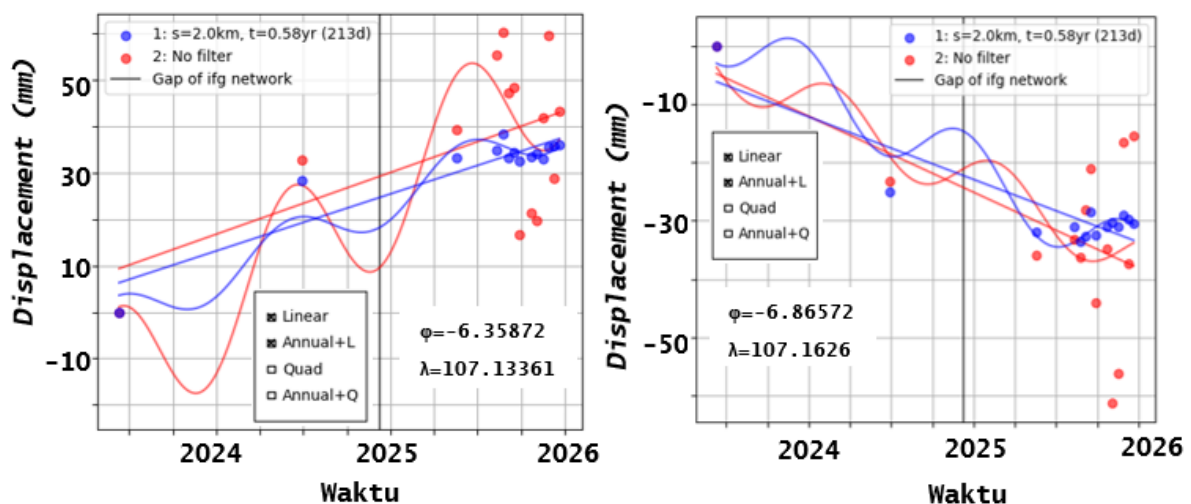
Hasil *LOS displacement* menunjukkan bahwa area utara pada lokasi penelitian cenderung memiliki *LOS displacement* bernilai positif (Gambar 2.), yang menunjukkan adanya pergerakan mendekati sensor satelit. Sedangkan area selatan cenderung memiliki nilai *LOS displacement* negatif atau pergerakan

menjauhi sensor satelit. Pola kontras LOS *displacement* antara bagian selatan area penelitian mengindikasikan adanya deformasi diferensial yang berasosiasi dengan aktivitas tektonik di sepanjang zona sesar. Pola ini kemungkinan mencerminkan akumulasi strain atau pergerakan relatif antar blok. Namun, untuk area utara masih diperlukan pengkajian lebih lanjut karena selain aktifitas sesar dimungkinkan masih adanya pengaruh penurunan tanah yang terjadi di area tersebut.

Selain itu, interpretasi pada area LOS *displacement* positif maupun negatif juga dilakukan (Gambar 3.). Pada area dengan LOS *displacement* positif, hasil plotting *timeseries* menunjukkan adanya kenaikan nilai *displacement* dari waktu ke waktu. Sebaliknya, area dengan LOS *displacement* negatif menunjukkan adanya penurunan nilai *displacement* dari waktu ke waktu. Pola temporal yang konsisten ini mencerminkan deformasi yang bersifat sistematis. Pada bagian Selatan penelitian kondisi ini berpotensi terkait dengan akumulasi strain di sepanjang zona Sesar.



Gambar 2. LOS *displacement* kumulatif dari 2023 sampai dengan 2025



Gambar 3. *Displacement timeseries* pada area dengan LOS *displacement* positif dan negative

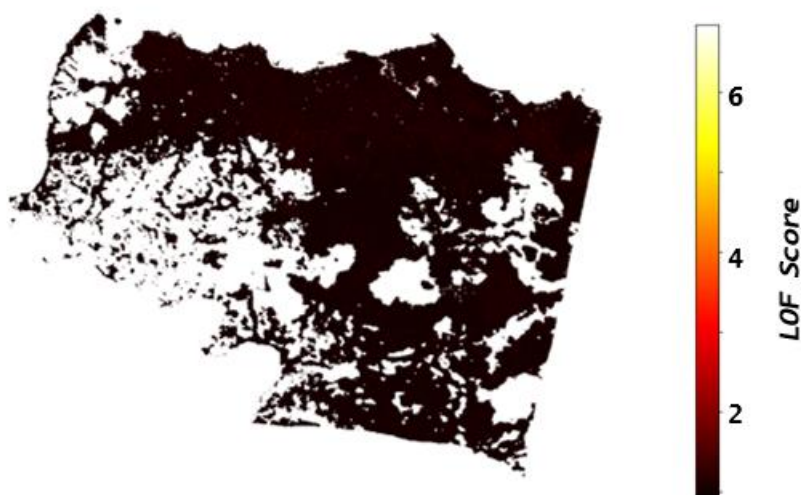
Hasil deteksi anomaly untuk zonasi deformasi

Hasil persebaran anomaly deformasi dihasilkan dari 2 algoritma yaitu IF dan LOF. Anomali pada algoritma IF ditunjukkan dengan score IF yang rendah. Anomali deformasi terjadi pada pesisir utara dan pesisir Selatan (Gambar 4.). Area pesisir utara berada disekitar kabupaten Jakarta Utara dan Karawang, sedangkan di area pesisir barat berada disekitar kabupaten Sukabumi dan Cianjur. Dibandingkan dengan

hasil algoritma LOF, anomali ditunjukkan pada score yang tinggi (Gambar 5.). Pada wilayah Pulau Jawa bagian barat, anomali tinggi terdapat disekitar area utara dan selatan dari wilayah Pulau Jawa bagian barat. Area anomaly dibagian utara ini dimungkinkan menunjukkan aktifitas pergerakan tanah yang dapat dipengaruhi oleh adanya penurunan tanah, sedangkan di area selatan dapat menunjukkan pergerakan tanah karena sesar salah satunya sesar Cimandiri, yaitu sekitar kabupataen Sukabumi dan Cianjur.



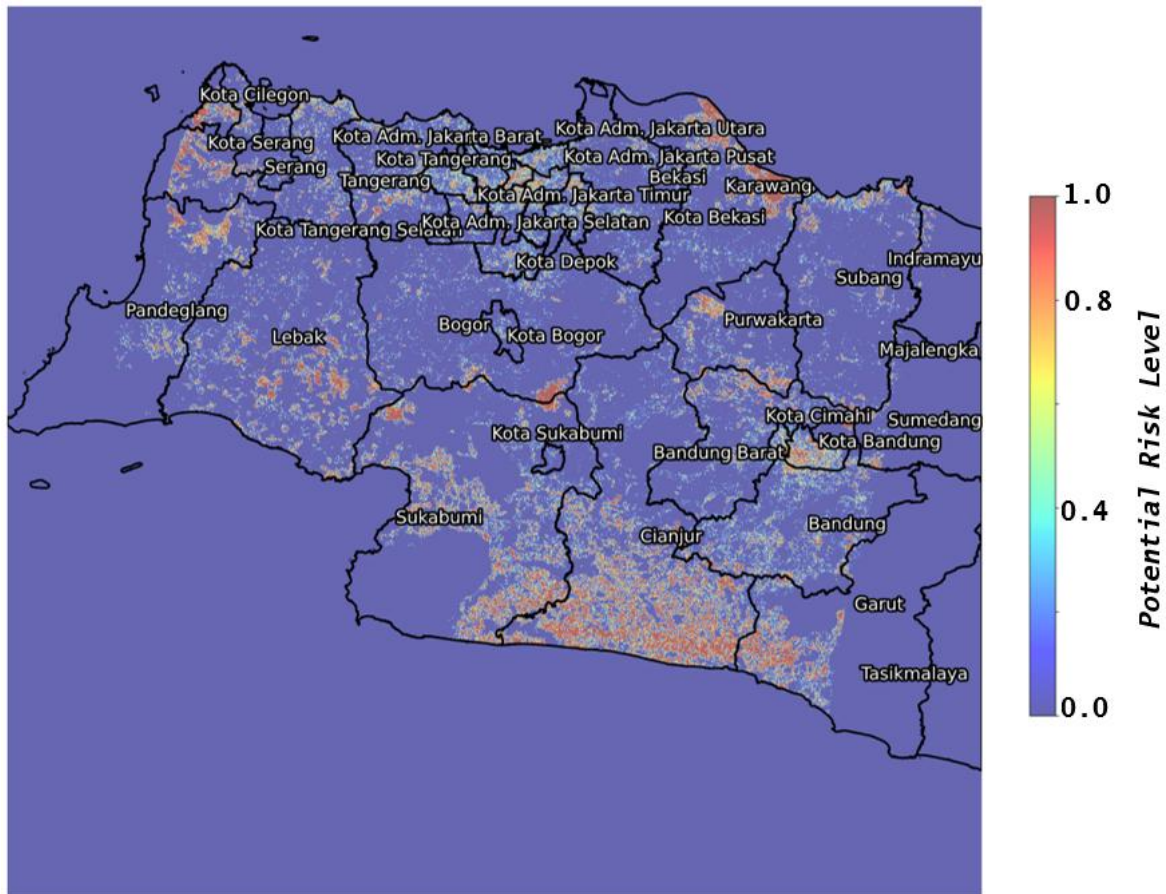
Gambar 4. Peta anomali pada hasil algoritma *Isolation Forest*



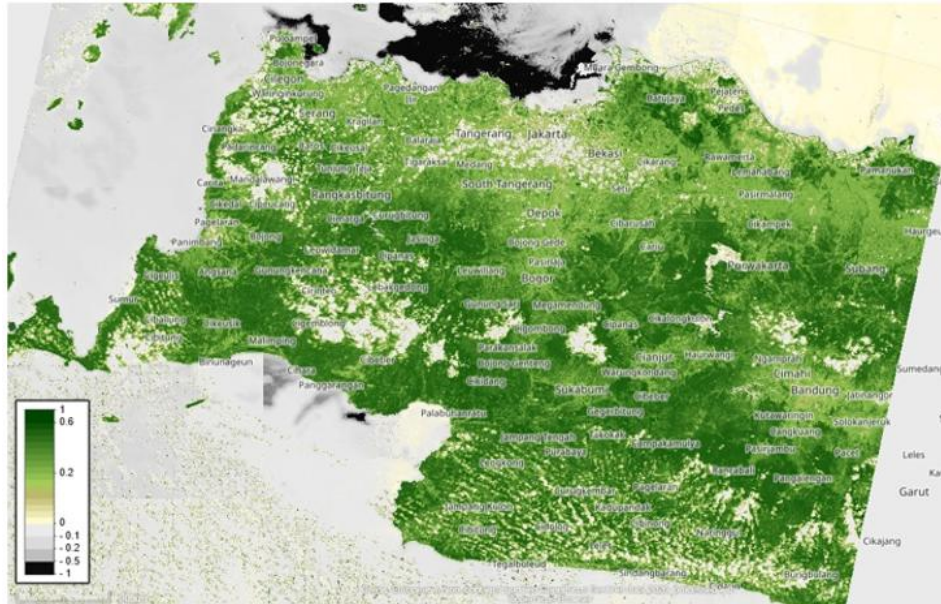
Gambar 5. Peta anomali pada hasil algoritma *Local Outlier Factor*

Hasil zonasi potensi risiko tektonik

Zona potensi tektonik dalam penelitian ini adalah wilayah yang berpotensi mengalami bencana akibat aktivitas pergerakan kerak bumi, seperti gempa bumi, tsunami, likuefaksi, longsor yang dipicu gempa, serta deformasi atau pergeseran permukaan tanah. Hasil zonasi potensi risiko tektonik di Pulau Jawa bagian barat menunjukkan bahwa potensi risiko tertinggi berada pada Jakarta Utara, Karawang, Kota Cilegon, Pandeglang, Sukabumi, Cianjur, Bandung, Bogor, Lebak, dan Purwarkarta (Gambar 6.). Namun, ditinjau secara lebih spesifik terhadap deformasi aktif, zona dengan Tingkat potensi risiko tertinggi terutama didominasi oleh wilayah Jakarta Utara, Sukabumi, dan Cianjur. Kondisi ini menunjukkan bahwa tidak semua wilayah dengan potensi risiko tektonik tinggi mengalami deformasi aktif dengan intensitas yang sama. Temuan ini konsisten dengan pola persebaran anomali yang dihasilkan oleh metode *Isolation Forest* dan *Local Outlier Factor*, dengan konsentrasi anomali spasial yang signifikan teridentifikasi pada wilayah-wilayah dengan dominasi deformasi aktif tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan berbasis *data-driven* mampu menangkap karakteristik deformasi yang relevan secara fisik dan memperkuat interpretasi terhadap zona potensi risiko tinggi.



Gambar 6. Peta zonasi potensi risiko tektonik di Pulau Jawa bagian barat



Gambar 7. Data NDVI dari Sentinel-2

Selain itu, wilayah dengan anomali deformasi tinggi dengan nilai NDVI rendah, mengindikasikan kondisi tutupan vegetasi yang kurang baik dan potensi risiko terhadap degradasi lingkungan. Kondisi ini terutama terlihat di wilayah selatan (Gambar 7.) seperti Sukabumi dan Cianjur yang memiliki morfologi lereng curam dengan NDVI relative rendah, sehingga kombinasi deformasi aktif dan vegetasi rendah berpotensi meningkatkan risiko longsor. Sebaliknya, beberapa wilayah dengan potensi risiko tektonik rendah dan memiliki nilai NDVI relatif tinggi menunjukkan tingkat kestabilan lingkungan yang lebih baik, seperti kabupaten Bogor. Kabupaten tersebut memiliki kondisi tingkat potensi risiko yang bervariasi, ada beberapa area yang memiliki zona potensi risiko tinggi namun ada yang stabil. Hal ini menegaskan bahwa

integrasi deformasi dan indikator vegetasi mampu memberikan perspektif yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi kerawanan wilayah, tidak hanya dari aspek geodinamika tetapi juga kondisi lingkungan permukaan.

Hasil zonasi ini divalidasi dengan dokumen kajian risiko bencana Provinsi Jawa Barat dan Banten (BNPB, 2021a, 2021b) dan kejadian bencana di tahun 2022 sd 2025. Berdasarkan kajian risiko bencana di Provinsi Jawa Barat, semua kabupaten di provinsi Jawa Barat yang termasuk di zonasi potensi risiko tektonik tertinggi pada hasil penelitian ini yaitu Sukabumi, Cilegon, Cianjur, Bandung, Bogor, Pandeglang, Lebak, dan Purwakarta, juga memiliki risiko tinggi bencana tanah longsor. Selain itu, kabupaten Cianjur, Sukabumi, Karawang dan Bandung juga memiliki risiko tinggi bencana gempa bumi tektonik, sedangkan kabupaten Bogor memiliki risiko tinggi untuk bencana gunung api. Bencana-bencana yang disebutkan dalam kajian risiko bencana provinsi sangat erat kaitannya dengan proses deformasi. Sehingga hasil zonasi potensi risiko tektonik penelitian ini sejalan dengan hasil kajian risiko bencana di Provinsi Jawa Barat oleh BNPB. Penurunan tanah di Jakarta Utara telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya, salah satunya oleh Ramadhanis et al. (2017). Penelitian Ramadhanis mengungkapkan bahwa penurunan tanah terjadi di Jakarta Utara sebesar -0,18 cm/tahun sd -2,45 cm/tahun dengan 61% penurunan muka tanah terjadi pada kawasan terbangun, 25% terjadi di kawasan tidak terbangun dan 14% terjadi kawasan sekitar perairan. Hal ini mendukung hasil zonasi potensi risiko tektonik penelitian ini yang menunjukkan bahwa Jakarta Utara termasuk zona potensi risiko tinggi. Oleh karena itu, hasil zonasi potensi risiko tektonik dari penelitian ini sejalan dengan dokumen kajian risiko bencana dari BNPB dan penelitian sebelumnya.

Kontribusi terhadap perencanaan wilayah

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam mendukung perencanaan wilayah berbasis risiko bencana di kawasan Pulau Jawa bagian Barat dan sekitarnya. Informasi spasial mengenai pola deformasi permukaan, baik yang bersifat gradual maupun anomali, dapat digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi zona prioritas untuk mitigasi risiko tektonik. Identifikasi deformasi diferensial yang berasosiasi dengan aktivitas sesar aktif menunjukkan bahwa wilayah di sekitar Sukabumi dan Cianjur memiliki potensi akumulasi strain yang signifikan. Wilayah-wilayah dengan deformasi aktif tinggi yang juga memiliki nilai NDVI rendah menunjukkan tingkat potensi risiko tektonik tinggi. Hal ini membawa area tersebut memiliki potensi bencana lingkungan yang lebih besar, terutama terhadap longsor dan degradasi lahan. Temuan ini relevan untuk perencanaan tata ruang, khususnya dalam pengendalian pemanfaatan lahan di zona rawan deformasi dan tektonik aktif, seperti pembatasan pembangunan infrastruktur kritis dan permukiman padat pada jalur sesar aktif maupun zona pengaruhnya, serta perlunya upaya rehabilitasi vegetasi untuk meningkatkan kestabilan lereng. Selain itu, keberadaan anomali deformasi di wilayah pesisir utara, seperti Jakarta Utara dan Karawang, selain dipengaruhi oleh aktivitas tektonik, juga berkaitan dengan fenomena penurunan tanah yang bersifat antropogenik. Oleh karena itu, strategi perencanaan wilayah perlu mengintegrasikan pengelolaan air tanah, pengendalian beban bangunan, serta kebijakan adaptasi terhadap penurunan muka tanah.

Pendekatan berbasis *data-driven* menggunakan *Isolation Forest* dan *Local Outlier Factor* dalam penelitian ini juga memberikan nilai tambah dalam sistem pendukung keputusan. Metode ini memungkinkan deteksi dini zona resiko deformasi dan tektonik secara objektif dan berbasis data besar, sehingga dapat diintegrasikan ke dalam sistem pemantauan deformasi berkelanjutan berbasis *Synthetic Aperture Radar* dan *unsupervised machine learning*. Lebih lanjut, hasil zonasi potensi risiko tektonik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan oleh pemerintah daerah dalam penyusunan RTRW dan RDTR, serta perencanaan infrastruktur yang adaptif terhadap risiko bencana. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan metodologi ilmiah, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam meningkatkan ketahanan wilayah terhadap bahaya tektonik dan degradasi lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi pola deformasi permukaan dan anomali spasial yang berasosiasi dengan aktivitas tektonik di wilayah Pulau Jawa bagian Barat menggunakan pendekatan SAR, NVDI, dan *unsupervised machine learning*. Hasil *LOS displacement* menunjukkan kontras yang jelas antara bagian

utara dan selatan, area utara didominasi pergerakan mendekati sensor, sedangkan area selatan menjauhi sensor, mengindikasikan deformasi diferensial. Analisis time series menunjukkan tren yang konsisten pada kedua pola tersebut, menandakan deformasi yang sistematis. Di bagian selatan, khususnya Sukabumi dan Cianjur, deformasi ini berpotensi berkaitan dengan aktivitas tektonik sepanjang zona sesar.

Deteksi anomali menggunakan *Isolation Forest* dan *Local Outlier Factor* menunjukkan konsistensi dalam mengidentifikasi zona anomali utama di wilayah utara dan selatan. Anomali di selatan cenderung terkait aktivitas tektonik, sementara di utara, seperti Jakarta Utara dan Karawang, kemungkinan masih bisa dipengaruhi oleh penurunan tanah. Integrasi deformasi, anomali, dan NDVI menghasilkan zonasi potensi risiko tektonik, dengan dominasi potensi resiko paling tinggi teridentifikasi di Jakarta Utara, Sukabumi, dan Cianjur. Secara keseluruhan, pendekatan integratif ini tidak hanya efektif dalam memahami dinamika deformasi, tetapi juga memberikan kerangka komprehensif berbasis data untuk mendukung pemantauan serta mitigasi risiko bencana dan degradasi lingkungan secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

BNPB. (2021a). *Kajian Risiko Bencana Banten*.

BNPB. (2021b). *Kajian Risiko Bencana Provinsi Jawa Barat*.

Daramola, O. E., Epuh, E. E., Okolie, C. J., Arungwa, I. D., Apeh, O. I., Fatoyinbo, A., Akinnusi, S., Orji, M. J., & Tenzer, R. (2025). Detection of Crustal Deformation Using a Gravimetric and Multitemporal Interferometric SAR (MT-InSAR) Approach. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-025-03715-0>

Farrasha, M., Yeri, N. A., Dani, I., & Rasimeng, S. (2024). APLIKASI METODE TURUNAN KEDUA VERTIKAL DATA GRAVITASI UNTUK INTERPPRETASI SESAR CUGENANG, JAWA BARAT. *JURNAL TEKNIK GEOLOGI: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.30872/jtgeo.v6i2.13534>

Haryanto, I. (n.d.). *Struktur sesar di Pulau Jawa Bagian Barat berdasarkan hasil interpretasi geologi (Iyan Haryanto) STRUKTUR SESAR DI PULAU JAWA BAGIAN BARAT BERDASARKAN HASIL INTERPRETASI GEOLOGI*.

Haryanto, I., Hutabarat, J., Sudradjat, A., Ilmi, N. N., & Sunardi, D. E. (n.d.). TEKTONIK SESAR CIMANDIRI, PROVINSI JAWA BARAT. In *Bulletin of Scientific Contribution* (Vol. 15).

Helmi, F. (2024). *REKOSNTRUKSI SESAR BERDASARKAN KEKAR DAN LIPATAN MINOR PADA FORMASI HALANG SEGMENT SUNGAI CIJUREY DESA BABAKANSARI KECAMATAN BANTARUJEG KABUPATEN MAJALENGKA PROVINSI JAWA BARAT* (Vol. 8, Issue 3).

Ide, S., & Chen, K. H. (2024). Spatiotemporal Characteristics of Tectonic Tremors in the Collisional Orogen of Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 51(4). <https://doi.org/10.1029/2023GL106759>

Kajian, J., Dan, I., Geografi, P., Rangkuti, N. S., Zahara, A., & Azmi, N. (2025). *IDENTIFIKASI KELURUSAN STRUKTUR GEOLOGI DI SEKITAR SESAR GARSELA, JAWA BARAT*. 08(02).

Katili, J. A. (1991). Tectonic evolution of eastern Indonesia and its bearing on the occurrence of hydrocarbons. *Marine and Petroleum Geology*, 8(1), 70–83. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(91\)90046-4](https://doi.org/10.1016/0264-8172(91)90046-4)

Lu, C.-H., Chuang, R. C., Chiang, P.-C., Yen, J.-Y., Ching, K.-E., & Chen, Y.-G. (2025). Detecting infrastructure hazard potential change by SAR techniques on postseismic surface deformation: A case study of 2016 Meinong earthquake in southwestern Taiwan. *Engineering Geology*, 344, 107827. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107827>

Ma, H., Wu, Y., Feng, J., Li, X., Xu, H., & Wang, Q. (2019). Crustal Movement Characteristics in the North-eastern Region of the Qinghai-Tibet Plateau Based on GPS reference station. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 384(1), 012209. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012209>

- Ramadhanis, Z., Prasetyo, Y., & Yuwono, D. (2017). ANALISIS KORELASI SPASIAL DAMPAK PENURUNAN MUKA TANAH TERHADAP BANJIR DI JAKARTA UTARA. In *Jurnal Geodesi Undip Juli* (Vol. 6, Issue 3).
- Saraswat, A., Tsai, Y.-L. S., Chen, F.-C., & Han, J.-Y. (2025). 3D deformation analysis in a metropolitan area during ongoing subway construction using time series InSAR. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 155, 106190. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106190>
- Saraswat, A., Tsai, Y.-L. S., & Han, J.-Y. (2024). Evaluation of groundwater-caused deformation patterns in a metropolitan area using time series InSAR and retrieval of vertical and east-west displacement: a case study in Taipei City. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2375620>
- Tiwari, A., & Shirzaei, M. (2024). A novel machine learning and deep learning semi-supervised approach for automatic detection of InSAR-based deformation hotspots. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 126, 103611. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103611>
- Ulinuha, H., Lestari, D., Heliani, L. S., Widjajanti, N., Pratama, C., Parseno, P., & Nugroho, K. F. (2019). GPS Technology Implementation for Sangihe Islands' Movement Monitoring in 2017-2019. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 2(2), 206–211. <https://doi.org/10.22146/jgise.51033>
- Wu, J. C., Tang, H. W., Chen, Y. Q., & Li, Y. X. (2006). The current strain distribution in the North China Basin of eastern China by least-squares collocation. *Journal of Geodynamics*, 41(5), 462–470. <https://doi.org/10.1016/J.JOG.2006.01.003>
- Zhang, S., Ju, Z., Niu, Y., Lu, Z., Fan, Q., Zhao, J., Zhou, Z., Si, J., Li, X., & Li, Y. (2025). Multi-Source SAR-Based Surface Deformation Analysis of Edgecumbe Volcano, Alaska, and Its Relationship with Earthquakes. *Remote Sensing*, 17(7), 1307. <https://doi.org/10.3390/rs17071307>