

## Karakterisasi Pergerakan Vertikal Permukaan Tanah di Tuban, Jawa Timur Dengan Data SAR Sentinel-1 Menggunakan Teknik Small Baseline Subset (SBAS) Interferometry SAR (InSAR)

Amelinda Nuron Fabiola<sup>1\*</sup>, Hidayat Panuntun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

<sup>2</sup>Lab. Geomatika, Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

### Research Article

#### DOI:

10.22146/jgst.v2i2.15055

#### correspondence:

amelindanuron@mail.ugm.ac.id

#### Article history:

#### Received:

25-07-2024

#### Accepted:

23-12-2024

#### Published:

31-12-2024

### ABSTRACT

Ground surface movement refers to changes in the position of specific points on the Earth's surface caused by internal dynamic processes. This phenomenon includes two main aspects: land uplift and subsidence. Previous research by Susilo et al. (2023) at CORS stations along the northern coast of Java identified an anomaly at the Tuban (CTBN) station, indicating uplift at  $0.4 \pm 0.042$  mm/year, differing from subsidence trends at other stations. This study investigates whether the anomaly is localized or widespread in Tuban. Sentinel-1A imagery from December 2014 to April 2023 was analyzed using the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) method with LiCSBAS software. Atmospheric correction was applied via the Generic Atmospheric Correction Online Service (GACOS). Vertical movements were calculated using 2.5-D extraction from Line of Sight (LOS) data in ascending and descending geometries. Results reveal significant uplift in southern and western Tuban at an average rate of 16 mm/year and subsidence along the northern coast at -8 mm/year. Validation with GNSS data at CTBN confirmed high accuracy, showing a correlation of 0.99. These findings highlight the effectiveness of InSAR for monitoring regional ground deformation.

**Key words:** Ground surface movement, InSAR, Small Baseline Subset (SBAS), LiCSBAS, Tuban

### INTISARI

Pergerakan permukaan tanah di sepanjang Pantai Utara Pulau Jawa di dominasi oleh penurunan muka tanah (*subsidence*). Akan tetapi, Susilo dkk. (2023) menemukan bahwa pergerakan vertikal yang di ekstrak dari Stasiun GNSS CORS CTBN mempunyai pola pengangkatan (*uplifting*). Dari hasil pengukuran diperoleh informasi bahwa Stasiun CORS CTBN mengalami kenaikan dengan kecepatan  $0,4 \pm 0,042$  mm/tahun. Kenaikan yang terjadi di stasiun ini berbeda dengan pergerakan vertikal di stasiun CORS lainnya yang umumnya menunjukkan penurunan. Data SAR Sentinel-1 periode pengamatan tahun 2014 s/d 2023 digunakan untuk menginvestigasi apakah fenomena yang terjadi di stasiun GNSS CTBN bersifat lokal atau global di wilayah Tuban. Proses koreksi atmosferik dilakukan menggunakan *Generic Atmospheric Correction Online Service* (GACOS). Pemrosesan citra dilakukan menggunakan metode *Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar* (SBAS-InSAR) dengan bantuan perangkat lunak LiCSBAS. Pergerakan vertikal permukaan tanah dihitung dengan ekstraksi 2,5-D dari *Line of Sight* (LOS) yang dihasilkan dari dua set data citra. Hasil pengukuran divalidasi dengan data *Global Navigation Satellite System* (GNSS) yang diamati secara kontinu di stasiun CORS Tuban (CTBN). Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *uplifting* lebih mendominasi di wilayah Tuban dengan kecepatan rerata hingga 16 mm/tahun. Meskipun demikian, proses *subsidence* masih bisa teridentifikasi secara lokal di wilayah pesisir utara dengan kecepatan rata-rata -8 mm/tahun. Validasi dengan data GNSS menunjukkan korelasi tinggi antara hasil pengukuran *displacement* dari InSAR dan data GNSS, dengan nilai korelasi sebesar 0,99.

**Kata kunci:** Pergerakan permukaan tanah, InSAR, Small Baseline Subset (SBAS), LiCSBAS, Tuban

## 1. Pendahuluan

Pergerakan permukaan tanah adalah perubahan posisi titik-titik tertentu di permukaan tanah, baik secara absolut maupun relatif (Korkouli dkk., 2017). Pergerakan ini terjadi karena adanya perubahan pada bentuk atau dimensi permukaan tanah, yang disebabkan adanya pengaruh gaya tertentu dalam suatu periode waktu (Yudinugroho, 2021). Fenomena ini mencakup dua aspek utama, yaitu pengangkatan permukaan tanah (*land uplift*) dan penurunan permukaan tanah (*land subsidence*).

Pengangkatan permukaan tanah dapat disebabkan oleh berbagai faktor, salah satunya adalah aktivitas tektonik lempeng dan aktivitas gunung api (aktivitas vulkanik) (Panuntun dan Taftazani 2022). Kenaikan permukaan tanah juga sering terjadi karena peningkatan muka air tanah, yang menyebabkan perubahan tekanan dan karakteristik sifat batuan di sekitarnya (Dudek dkk. 2020). Sebaliknya, penurunan permukaan tanah sering dikaitkan dengan aktivitas industri, pertanian intensif, aktivitas tambang, serta eksploitasi air tanah yang berlebihan (Andreas dkk. 2019).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk memetakan pola spasial dan laju temporal pergerakan permukaan tanah, baik secara regional maupun lokal (Galloway dkk., 1999). Pengukuran dapat dilakukan melalui survei *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dan *levelling*, maupun dengan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) (Weiss dkk., 2020). Pemantauan umumnya dilakukan secara periodik karena laju pergerakan permukaan tanah cenderung lambat dan nilainya sangat kecil, biasanya dalam rentang milimeter sampai dengan sentimeter.

Salah satu perkembangan teknologi GNSS adalah penggunaan GNSS *Continuously Operating Reference Stations* (CORS), yang menyediakan data pemantauan yang kontinu dan akurat (Liu dkk., 2024). Penelitian oleh Susilo dkk. (2023) memanfaatkan 20 stasiun CORS untuk memantau pergerakan permukaan tanah di sepanjang pantai utara Pulau Jawa. Hasil pengamatan menunjukkan pola penurunan signifikan di beberapa kota sepanjang pesisir. Namun, hasil penelitian mencatat adanya anomali pada tiga stasiun CORS, yaitu Cilegon (CGON), Tuban (CTBN), dan Situbondo (CSIT). Anomali ini menunjukkan adanya indikasi kenaikan permukaan tanah (*land uplift*) di stasiun CORS tersebut.

Pada penelitian Susilo dkk., (2023), informasi koordinat atau posisi titik dihasilkan melalui pengukuran GNSS yang bersifat *point-based*. Dalam hal ini, koordinat yang diperoleh hanya memberikan informasi posisi di titik pengukuran saja. Salah satu stasiun CORS yang memiliki anomali yang paling signifikan adalah Tuban (CTBN) dengan laju pergerakan vertikal  $4 \pm 0,042$  mm/tahun. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui apakah pergeseran bersifat lokal di sekitar stasiun CORS CTBN atau terjadi di seluruh wilayah Tuban.

Salah satu metode penginderaan jauh yang mampu memberikan hasil *areal-based* untuk pemantauan pergerakan permukaan tanah adalah *Synthetic Aperture Radar* (SAR) (Pasaribu dkk., 2014). Data pergerakan permukaan tanah adalah diperoleh dengan mengolah citra SAR menggunakan teknik *Interferometry Synthetic Aperture Radar* (InSAR). Pengamatan perubahan temporal dilakukan dengan teknik *Small Baseline Subset* (SBAS), yang diperkenalkan oleh Berardino dkk. (2002) untuk menghasilkan *displacement time-series* dan *mean LOS velocity* dengan ketelitian hingga milimeter.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pergerakan permukaan tanah di Tuban dari tahun 2014 hingga 2023 menggunakan citra Sentinel-1 dengan metode SBAS. Gambaran karakteristik pergerakan vertikal didapat melalui ekstraksi 2.5-D LOS dari data set *ascending* dan *descending*. Hasil ekstraksi digunakan juga untuk mengidentifikasi lokasi yang mengalami pergerakan permukaan tanah secara signifikan di wilayah Tuban.

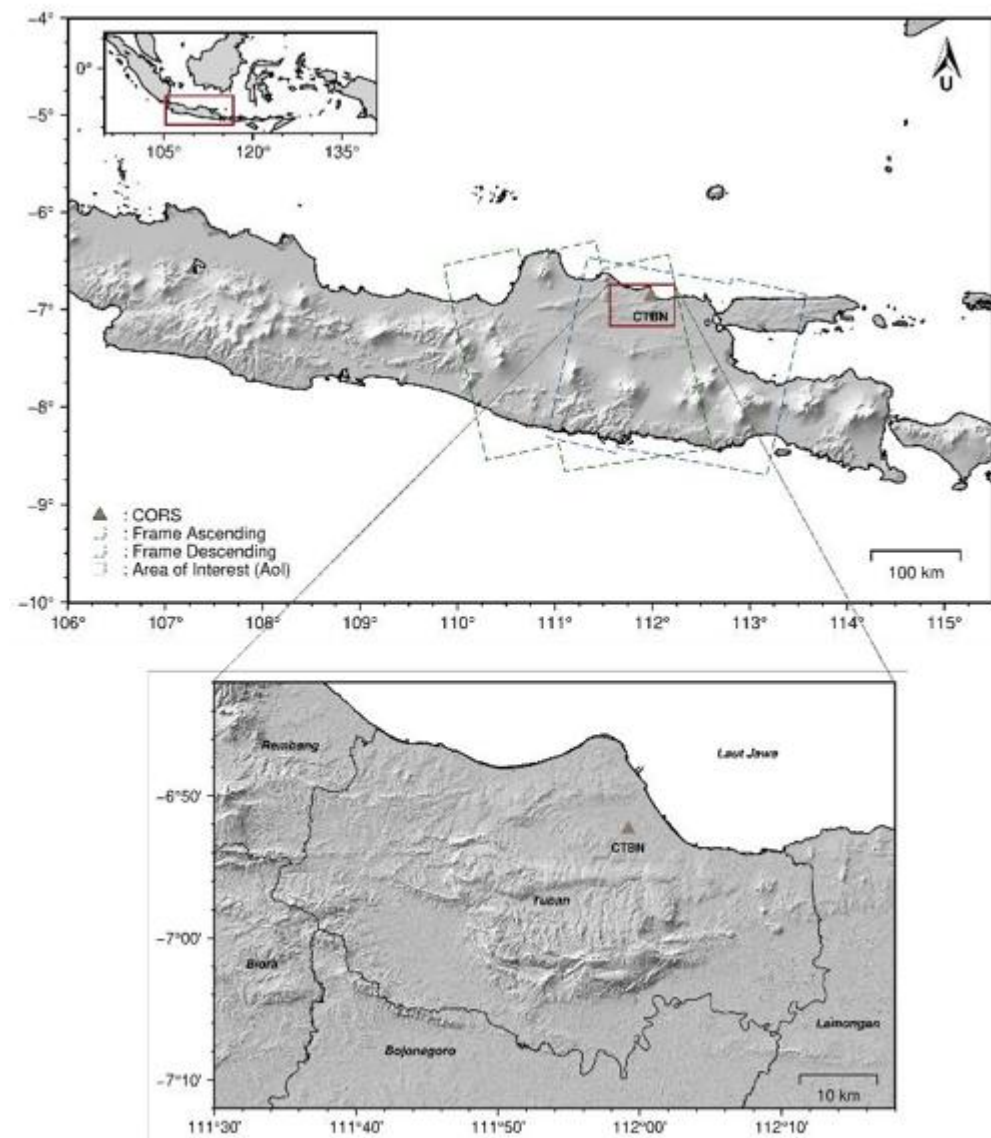
## 2. Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data SAR citra Sentinel-1 produk *interferogram* pengamatan tahun 2014 sampai dengan 2023. Data InSAR digunakan sebagai data utama untuk menganalisis pergerakan vertikal permukaan tanah di wilayah Kabupaten Tuban. Pada penelitian ini, *frame* 127A\_09749\_121312 digunakan sebagai data perekaman *ascending*. Data ini terdiri dari 1375 *interferogram* yang dihasilkan dari 338 *epoch* pengamatan. Sementara itu, *frame* 003D\_09757\_111111 adalah data perekaman *descending* yang terdiri dari 920 *interferogram* yang dihasilkan dari 175 *epoch* pengamatan. *Frame ID* diperoleh dari web portal COMET- LiCS <https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/> yang menampilkan ketersediaan data *interferogram* dalam bentuk *frame*.

*Looking Into Continents from Space with Synthetic Aperture Radar* (LiCSAR) adalah sistem komputasi *interferometri* otomatis yang menggunakan *cloud* untuk mengurangi beban komputasi dalam pembuatan *interferogram* dari citra *Single Look Complex* (SLC). Data *interferogram* yang digunakan mencakup file dengan ekstensi *.unw* (*interferogram* yang telah di-*unwrapped*) dan *.cc* (nilai koherensi). Data yang diunduh berformat raster *GeoTIFF* dengan ukuran *frame* 250 km × 250 km.

Format penamaan data dalam sistem LiCSAR berbeda dengan data Sentinel-1 SLC. Setiap *frame* memiliki pola OOO-AAAAA-BBBBBB, di mana OOO adalah nomor orbit relatif, P adalah arah orbit (A untuk *ascending* dan D untuk *descending*), AAAAA adalah pengidentifikasi *colatitude*, danBBBBB adalah jumlah *burst* yang terkandung (Lazecky dkk., 2020).

Lokasi penelitian berada di Kabupaten Tuban, Jawa Timur, dengan koordinat 111°30' BT hingga 112°35' BT dan 6°40' LS hingga 7°18' LS.



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

### 3. Metodologi

#### 3.1. LiCSBAS

LiCSBAS dikembangkan adalah bagian dari kerangka proyek "Looking inside the Continents from Space" (LiCS) yang dikembangkan oleh (Morishita dkk., 2020) untuk program pengolahan InSAR time-series. Program ini menggunakan teknik *Small Baseline Subset* (SBAS) untuk memproses data *interferogram* dari Sentinel-1 SAR. Program ini terintegrasi dengan LiCSAR, yang memungkinkan pengguna untuk mengunduh dan memproses data secara langsung.

##### 3.1.1. Konversi Format Data

Pertama, dilakukan konversi format data untuk keperluan *downsampling* (*multilook*). *Downsampling* bertujuan mengurangi resolusi spasial data sehingga mempercepat proses analisis dan mengurangi kebutuhan penyimpanan. Pada tahap ini, dua jenis data *GeoTIFF* diubah, dari data *interferogram* yang telah *di-unwrapped* (.unw) diubah menjadi format *float32*, dan data nilai koherensi (cc) diubah menjadi format *uint8*.

##### 3.1.2. Koreksi GACOS

Selanjutnya, dilakukan koreksi GACOS yang bertujuan untuk melakukan koreksi atmosferik pada data *interferogram* yang telah *di-unwrapped* menggunakan data dari *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR* (GACOS). Data GACOS dapat diunduh secara otomatis dari portal web COMET-LiCS, atau diminta melalui situs web GACOS <http://www.gacos.net/> dengan mencantumkan area,

waktu perekaman, dan tanggal. Koreksi ini penting untuk mengatasi pengaruh elektron bebas seperti uap air, suhu, dan tekanan troposfer, yang dapat mengganggu sinyal satelit dan mempengaruhi nilai deformasi. Meskipun tahap koreksi GACOS bersifat opsional, koreksi ini sangat direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi data (Panuntun dkk., 2022).

### 3.1.3. Mask Unwrapping

Setelah koreksi GACOS, dilakukan *masking* pada data *interferogram* yang telah di-*unwrapped*. Tahap *masking* ini bertujuan untuk menghilangkan data pada area tertentu atau area dengan koherensi rendah. Penentuan ambang koherensi (*coherence threshold*) sangat penting dalam proses ini, dan dalam penelitian ini, ambang koherensi ditetapkan pada nilai 0.1. Data dengan koherensi di bawah ambang batas ini akan diabaikan atau di-*mask*, sehingga hanya data dengan koherensi tinggi yang digunakan untuk analisis lebih lanjut.

### 3.1.4. Clip Unwrapping

Tahap berikutnya adalah *clipping*, yang digunakan untuk memotong area persegi panjang tertentu dari data *interferogram* yang telah di-*unwrapped* dan data koherensi. Proses *clipping* ini memungkinkan pemotongan area citra yang ingin diteliti dalam bentuk *rectangular*, membantu mengurangi ukuran data dan mempercepat pemrosesan. Dalam penelitian ini, parameter *clipping* data ditentukan dengan batasan koordinat 111.6/112.6/-6.7/-7.3, mencakup wilayah Kabupaten Tuban. Pengolahan *time series* merupakan tahap lanjutan yang bertujuan untuk mengukur perubahan permukaan tanah dari waktu ke waktu. Tahap ini melibatkan berbagai langkah pemrosesan.

### 3.1.5. Uji Kualitas Data (Quality Check)

Pada tahap uji kualitas data, dilakukan pemeriksaan kualitas data *interferogram* yang telah di-*unwrapped* (.unw) untuk mengidentifikasi *interferogram* yang tidak memenuhi standar. Proses ini dimulai dengan perhitungan rerata koherensi dari masing-masing citra untuk mengukur hubungan antar citra dan mengeliminasi citra dengan kualitas koherensi yang buruk. Citra yang tidak memenuhi standar ditandai dan dipisahkan ke dalam folder hasil pengolahan yang berbeda. Nilai *unwrapped threshold* ditetapkan pada 0.5 dan *coherence threshold* pada 0.05 untuk penelitian ini (Morishita dkk., 2023).

### 3.1.6. Uji Root Mean Square Loop Closure

Tahap *loop closure* digunakan untuk mengidentifikasi data *interferogram* yang telah di-*unwrapped* (.unw) kualitas buruk dengan mengevaluasi *loop closure*. Proses ini menentukan titik referensi awal yang memiliki semua data .unw yang valid serta nilai *Root Mean Square (RMS) fase loop* terkecil. Uji RMS digunakan untuk mengukur kesalahan dan redundansi dalam jaringan *interferogram*. *Loop closure* bertujuan untuk menutup *fase loop* dengan memperbaiki kesalahan *fase* melalui beberapa citra yang saling berkaitan. Nilai *loop threshold* yang digunakan pada penelitian ini adalah 1.

### 3.1.7. Small Baseline Inversion

*Small Baseline Inversion* digunakan untuk menginversi jaringan *Small Baseline (SB)* dari data *interferogram* yang telah di-*unwrapped* untuk mendapatkan *time series* dan kecepatan (*velocity*) menggunakan pendekatan *Non-Linear Small Baseline Subset (NSBAS)*. Setiap *interferogram* mengukur perubahan *fase* antar dua citra yang diambil pada waktu yang berbeda. Perubahan *fase* ini mencerminkan perpindahan permukaan bumi selama rentang waktu tersebut. Proses SBAS mengumpulkan informasi perpindahan dari banyak *interferogram* yang berbeda untuk satu lokasi pada permukaan bumi. Perpindahan kumulatif dihitung dengan menjumlahkan kontribusi perpindahan dari semua *interferogram* yang relevan. Setelah mendapatkan perpindahan kumulatif, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai kecepatan perubahan permukaan bumi menggunakan metode kuadrat terkecil (*Least Square*). Setelah inversi, titik referensi yang stabil ditentukan dengan menghitung RMS *time series* terhadap median di antara semua titik. Titik dengan RMS minimum dan *n\_gap* minimum dipilih sebagai titik referensi yang baru stabil.

### 3.1.8. Perhitungan Standar Deviasi Velocity Metode Bootstrap

Tahap pengolahan berikutnya adalah menghitung standar deviasi (STD) dari kecepatan (*velocity*) perubahan permukaan tanah yang telah dihasilkan pada tahap sebelumnya. Metode *bootstrap* digunakan untuk mengevaluasi keandalan atau ketidakpastian dari hasil kecepatan yang diperoleh dengan mempertimbangkan konsistensi *spasial-temporal*. Proses *bootstrap* melibatkan pembuatan sejumlah sampel acak (*bootstrap samples*) dari data kecepatan yang telah dihasilkan melalui inversi. Setiap sampel acak dihasilkan dengan pengambilan sebagian data dengan penggantian (*sampling with replacement*). Pada setiap sampel acak, *small baseline inversion* diterapkan kembali, menghasilkan set baru kecepatan deformasi. Setelah menghasilkan distribusi *bootstrap*, perhitungan standar deviasi dilakukan pada nilai kecepatan yang diperoleh dari setiap sampel acak. Standar deviasi memberikan perkiraan sebaran variabilitas atau ketidakpastian dari kecepatan perubahan permukaan tanah. Semakin tinggi nilai standar deviasi, semakin besar ketidakpastian terkait dengan kecepatan tersebut.

### 3.1.9. Mask Time Series

Tahap *Mask Time Series* digunakan untuk *masking* data *time series* dengan menggunakan beberapa indeks *noise*. *Piksel-piksel* yang memiliki nilai indeks *noise* lebih buruk (lebih besar atau lebih kecil) daripada ambang batas dapat difilter dan di-*mask* dengan menggunakan batas yang telah ditentukan.

### 3.1.10. Filter Time Series

*Filter Time Series* diterapkan untuk tujuan *filter spasial* dan temporal pada *time series displacement*. Proses dilakukan dengan menggunakan *filter kernel gaussian*, baik berupa *filter spasial* (LP) atau temporal (HP), yang mirip dengan metode *StaMPS*. *Filter spasial* membantu mengurangi *noise* dan menghaluskan data *displacement* di seluruh area pemantauan. Deramping (1D, *bilinear*, atau 2D *polynomial*) juga dapat diterapkan jika opsi *-r* digunakan. Selain itu, komponen yang berkorelasi dengan topografi (*linear* dengan elevasi) dapat dikurangkan (opsi *-hgt\_linear*) secara bersamaan dengan deramp sebelum dilakukan *filter spasial* dan temporal. Dampak dari *filtrasi* (termasuk *deramp* dan koreksi elevasi linear) dapat diperiksa secara visual melalui file *16filt\*/\*.png*. Setelah proses *filtrasi*, titik referensi yang stabil juga ditentukan.

Semua tahap pengolahan dijalankan dengan perintah atau menggunakan *command bash* dengan parameter yang ditentukan. LiCSBAS menggunakan Bahasa pemrograman *Python* dan *Bourne Again Shell* (BASH). Output dari LiCSBAS berupa *time-series displacement* dan rerata kecepatan pergerakan permukaan tanah (*mean LOS velocity*) terhadap tanggal citra pertama pemrosesan.

## 3.2. Displacement 2.5-D

*Displacement 2.5-D* didapat dari fusi pengamatan *Line of Sight* (LOS) untuk masing-masing geometri pengamatan (*ascending* dan *descending*) dengan mengabaikan komponen utara-selatan (*north-south*, NS) (Fujiwara dkk., 2000). Pendekatan ini menghasilkan *displacement* vertikal (*up-down*, UD) dan horizontal (*east-west*, EW). Komponen NS dari pergerakan permukaan sulit dideteksi karena arah pergerakan satelit SAR sejajar ke arah utara dan selatan, dengan orientasi ke arah kutub (Panuntun, 2021). Oleh karena itu, kontribusi dari komponen arah NS kurang signifikan dalam menentukan pergeseran LOS dibandingkan dengan EW dan UD.

Penggabungan pengamatan LOS dari dua geometri pengamatan dapat dituliskan sebagai berikut (Fuhrmann dan Garthwaite, 2019):

$$\begin{bmatrix} LOS_{asc} \\ LOS_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{asc})\cos(\alpha_{asc}) & \cos(\theta_{asc}) \\ -\sin(\theta_{des})\cos(\alpha_{des}) & \cos(\theta_{des}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_U \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dalam bentuk persamaan linier:

$$LOS_{asc} = -\sin(\theta_{asc})\cos(\alpha_{asc})v_E + \cos(\theta_{asc})v_U \quad (2)$$

$$LOS_{des} = -\sin(\theta_{des})\cos(\alpha_{des})v_E + \cos(\theta_{des})v_U \quad (3)$$

Eliminasi  $v_E$  untuk mendapatkan  $v_U$ :

$$v_U = \frac{LOS_{asc}\cos(\theta_{des}) - LOS_{des}\cos(\theta_{asc})}{\cos(\theta_{des})\cos(\theta_{asc}) - \sin(\theta_{asc})\cos(\alpha_{asc}) - \sin(\theta_{des})\cos(\alpha_{des})} \quad (4)$$

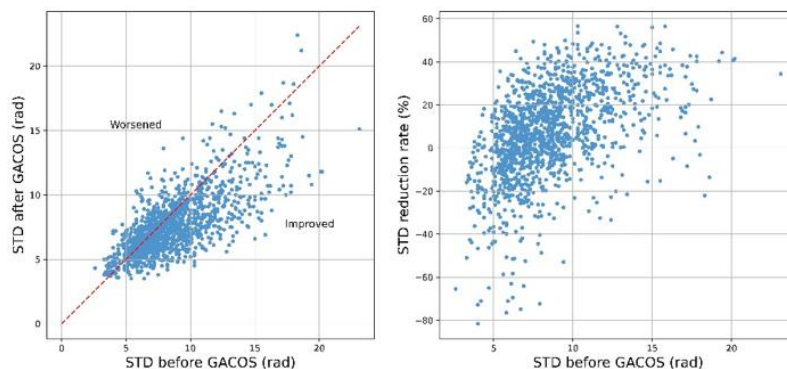
Dalam penelitian ini, *displacement* vertikal (UD) diperoleh dan dianalisis dalam rentang waktu bulanan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai dinamika pergerakan tanah.

## 4. Hasil

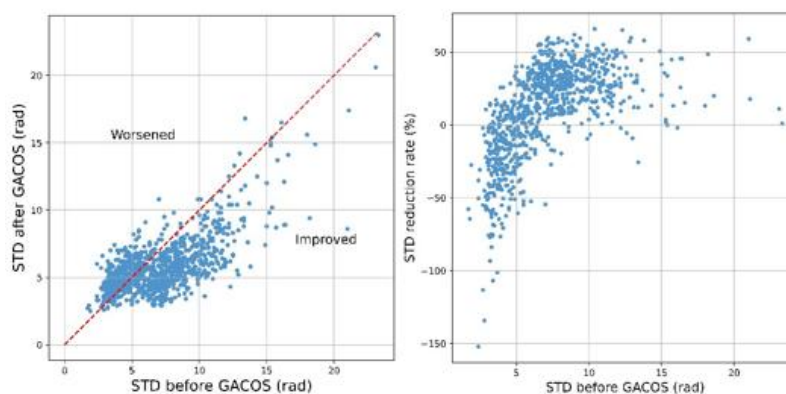
### 4.1. Penerapan GACOS untuk Koreksi Atmosferik pada Data InSAR

Sebelum koreksi, standar deviasi (STD) dari data menunjukkan adanya fluktuasi signifikan akibat pengaruh atmosfer. Setelah koreksi, terjadi penurunan STD yang menunjukkan peningkatan akurasi data. Pada Gambar 2 dan Gambar 3 bagian (a), titik-titik data sebagian besar berada di bawah garis  $y=x$ , yang menunjukkan bahwa koreksi atmosferik GACOS secara umum berhasil meningkatkan kualitas data dengan mengurangi nilai STD. Ini juga ditunjukkan oleh Gambar 2 dan Gambar 3 bagian (b), di mana sebagian besar nilai pengurangan STD berada pada kisaran positif, menunjukkan efektivitas koreksi atmosferik.

Persentase maksimum peningkatan STD untuk data *ascending* adalah 56,33% dengan rata-rata pengurangan STD sebesar 7,20%. Sedangkan untuk data *descending*, persentase maksimum peningkatan STD mencapai 65,38% dengan rata-rata pengurangan STD sebesar 10,35%. Hal ini mengindikasikan bahwa koreksi GACOS efektif dalam meningkatkan akurasi data dengan mengurangi pengaruh atmosfer pada *interferogram*.



Gambar 2. Distribusi pencar (*scatter plot*) standar deviasi (STD) setelah koreksi GACOS (*ascending*). (a) Hubungan antara STD sebelum dan sesudah koreksi (b) Tingkat pengurangan STD dalam persentase (%).



Gambar 3. Distribusi pencar (*scatter plot*) standar deviasi (STD) setelah koreksi GACOS (*descending*). (a) Hubungan antara STD sebelum dan sesudah koreksi (b) Tingkat pengurangan STD dalam persentase (%).

## 4.2. Hasil Pengolahan Data InSAR

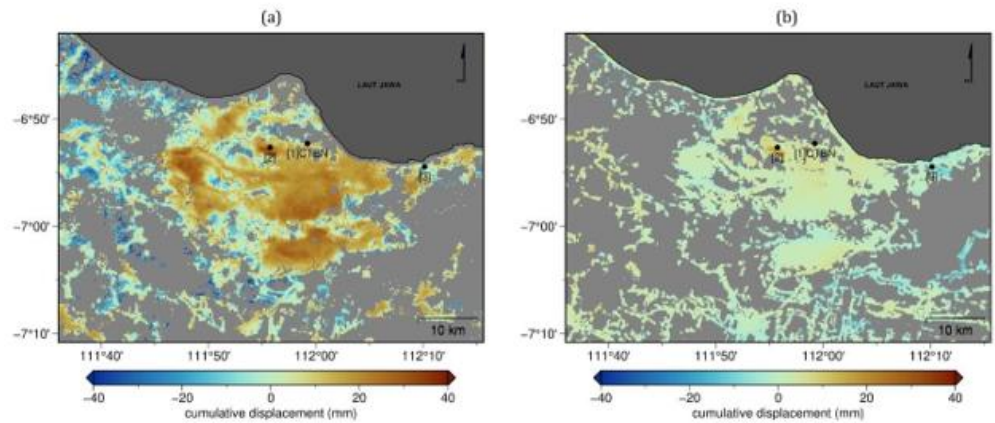
### 4.2.1. Line of Sight (LOS) Displacement

Dalam penelitian ini, estimasi laju *displacement* didapat dari data *Line of Sight* (LOS) yang diperoleh dari dua geometri pengamatan berbeda, yaitu *ascending* dan *descending*. *LOS displacement* ditampilkan dalam bentuk peta yang memberikan gambaran pergerakan tanah pada titik waktu tertentu dan sepanjang arah pandang satelit. Setiap arah perekaman memberikan *displacement* yang berbeda.

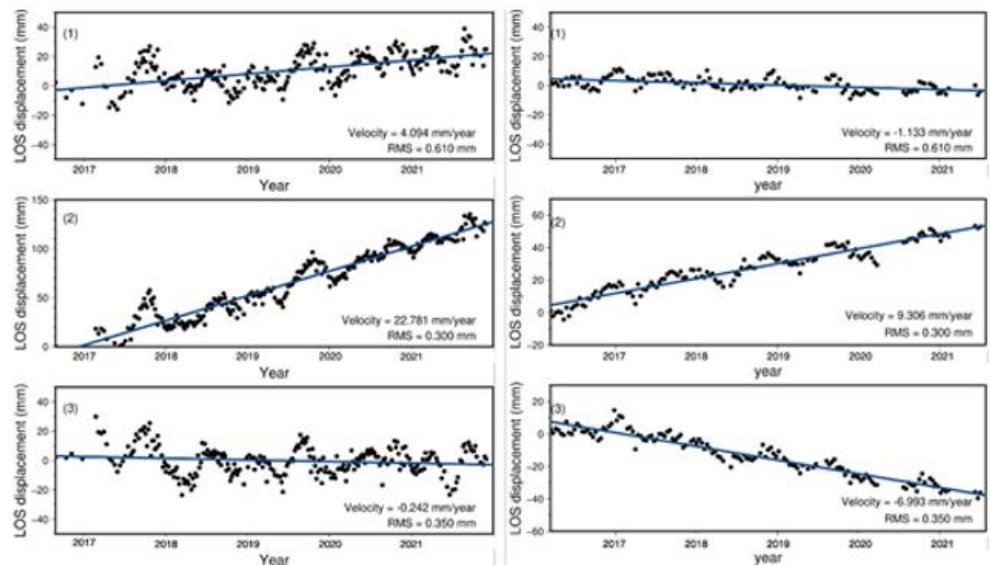
Pada Gambar 4.(a), hasil *cumulative LOS displacement* dari perekaman *ascending* menunjukkan distribusi pergerakan tanah di Kabupaten Tuban. Warna pada peta menggambarkan variasi *cumulative* pergerakan tanah dalam satuan milimeter (mm). Warna biru mengindikasikan penurunan permukaan tanah (*subsidence*), sedangkan warna coklat mengindikasikan kenaikan permukaan tanah (*uplift*). Hasil menunjukkan adanya area di Tuban yang mengalami *uplift* signifikan, sementara beberapa wilayah lainnya menunjukkan *subsidence*.

Pada Gambar 4.(b), hasil *cumulative LOS displacement* dari data *descending*, yang menunjukkan pola pergerakan tanah berbeda dibandingkan dengan data *ascending*, meskipun beberapa wilayah menunjukkan pola pergerakan yang konsisten. Pada Gambar 5 bagian (c) dan (d) grafik *time series LOS displacement* dari tiga titik pengamatan yang mengalami *uplift* dan *subsidence* ditampilkan. Setiap grafik menunjukkan *displacement* dalam satuan milimeter (mm) terhadap waktu dalam tahun. Garis biru pada grafik menunjukkan *linear fitting* dari pergerakan tanah dengan kecepatan (*velocity*) yang tertera di sudut kanan bawah grafik, serta nilai RMS (*Root Mean Square*) yang menunjukkan tingkat ketelitian data.

Perbedaan hasil *LOS displacement* antara pengamatan *ascending* dan *descending* dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti geometri pengambilan data yang berbeda, serta efek *shadowing* dan *layover*. *Shadowing* terjadi ketika bagian dari permukaan tanah tidak terjangkau oleh sinyal radar karena terhalang oleh objek yang lebih tinggi. Hal ini menciptakan area yang tidak memiliki data atau terlihat gelap dalam citra radar (*Alaska Satellite Facility* (ASF), 2023). *Layover*, di sisi lain, terjadi ketika sinyal radar dari puncak suatu objek tiba di satelit lebih cepat daripada sinyal dari dasar objek tersebut. Hal ini menyebabkan distorsi geometris yang signifikan, di mana posisi objek dalam citra radar terbalik (*Alaska Satellite Facility* (ASF), 2023).

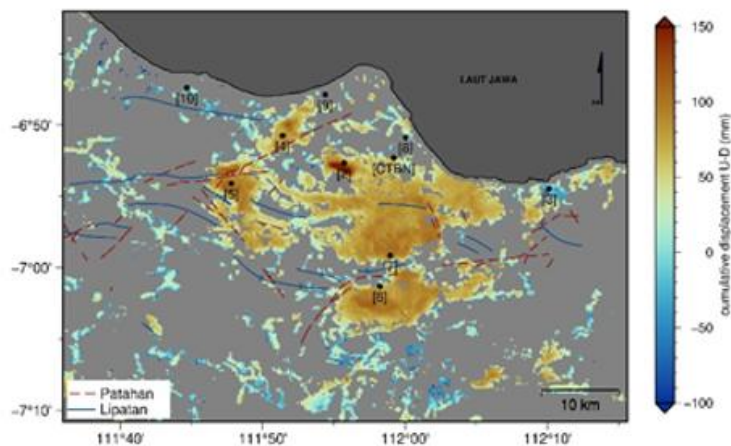


Gambar 4. Hasil LOS Displacement. (a) Ascending dan (b) Descending di wilayah Tuban.



Gambar 5. Time Series LOS Displacement di Titik Pengamatan (1) , (2) dan (3).

Tuban dengan topografi yang bervariasi, sangat memungkinkan terjadinya efek *shadowing* dan *layover* saat perekaman data. Perbedaan hasil *LOS displacement* yang terdeteksi dari perekaman *ascending* dan *descending* di Kabupaten Tuban dapat diatribusikan pada efek *shadowing* dan *layover* ini. Dengan menggabungkan data dari kedua arah perekaman, dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif dan akurat tentang pergerakan tanah.

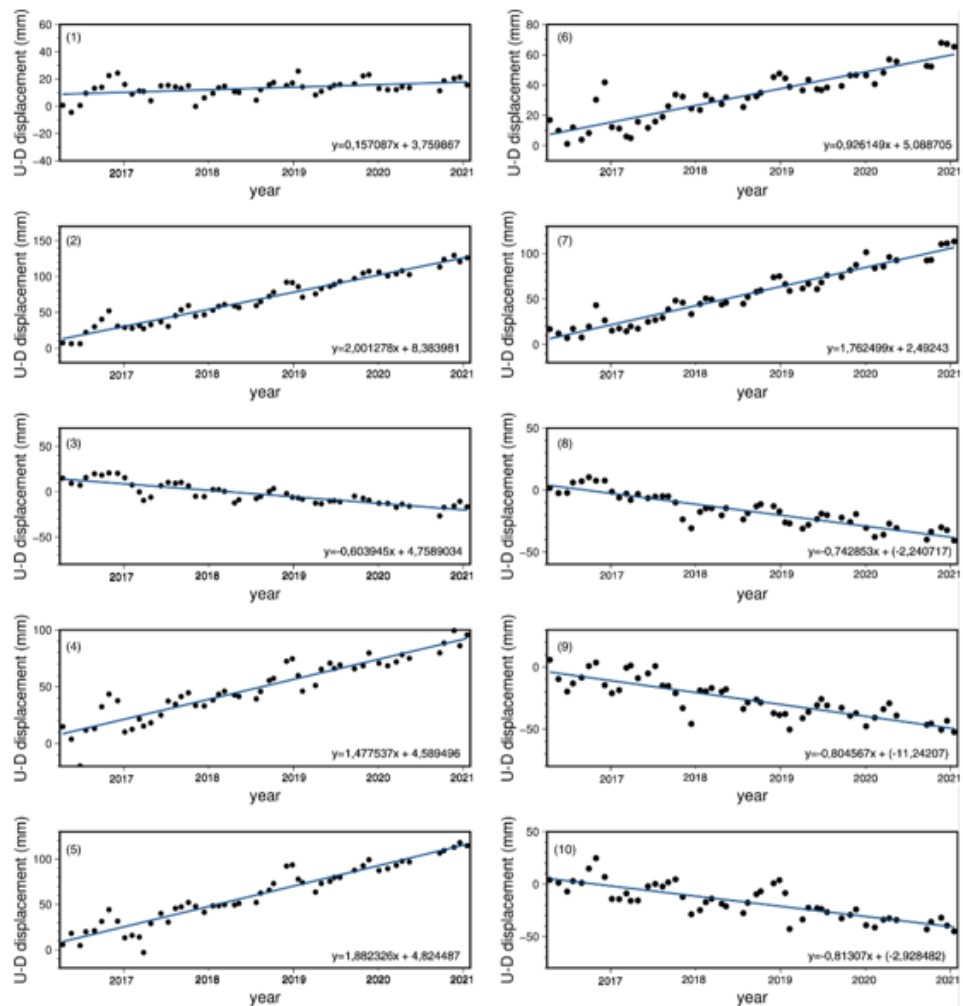


Gambar 6. Hasil Cumulative Displacement Vertikal (U-D).

#### 4.2.2. Displacement Vertikal (U-D)

*Displacement* vertikal (*up-down*, *UD*) merupakan komponen penting dalam analisis pergerakan tanah yang menunjukkan perubahan elevasi tanah apakah mengalami kenaikan (*uplift*) atau penurunan (*subsidence*) secara tektonik. Dalam penelitian ini, *displacement* vertikal dianalisis secara bulanan untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai dinamika pergerakan tanah di Kabupaten Tuban.

Untuk mendapatkan tren *time-series* dari hasil pengamatan, dipilih sepuluh titik sampel yang tersebar di beberapa kecamatan di Kabupaten Tuban. Pemilihan titik-titik sampel ini didasarkan pada kedekatannya dengan sesar (lihat Gambar 6) yang teridentifikasi di wilayah tersebut, serta pada hasil observasi awal yang menunjukkan *uplift* dan *subsidence* signifikan.



**Gambar 7.** Pola *Time Series Displacement* Komponen Vertikal (U-D) di 10 titik pengamatan. Titik-titik hitam menunjukkan data *displacement* vertikal dan garis biru menunjukkan tren *displacement* vertikal berdasarkan *fitting* model

Tabel 1 menyajikan koordinat, laju pergerakan (*velocity*), dan *displacement* kumulatif (UD) di 10 titik pengamatan. Data dalam tabel menunjukkan variasi laju pergerakan dan *displacement* kumulatif yang signifikan di beberapa titik pengamatan. Dari pola tren *time series* dan data *displacement* kumulatif, terlihat adanya variasi pergerakan vertikal permukaan tanah di Kabupaten Tuban. Pada beberapa titik pengamatan, terlihat adanya *subsidence* (penurunan tanah) yang signifikan, yaitu di Titik 3, Titik 8, Titik 9, dan Titik 10, dengan laju rata-rata -8 mm/tahun. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh faktor *antropogenik*, seperti pengambilan atau ekstraksi air tanah yang berlebihan. Ekstraksi air tanah yang berlebihan ini dapat menyebabkan kompaksi sedimen yang akhirnya mengakibatkan penurunan permukaan tanah.

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk membuktikan hal tersebut. Sebaliknya, *uplift* (kenaikan tanah) yang signifikan teramati di beberapa titik pengamatan, yaitu Titik 2, Titik 4, Titik 5, Titik 6 dan Titik 7, dengan laju rata-rata 16 mm/tahun. *Uplift* di titik-titik ini kemungkinan besar disebabkan oleh aktivitas tektonik dan proses geologi setempat. Aktivitas geologis ini dapat mengangkat lapisan tanah, sehingga menghasilkan pola kenaikan yang terdeteksi di titik pengamatan.



Tabel 1. Koordinat, Laju Pergerakan (Velocity), dan Displacement kumulatif (UD) di Titik Pengamatan

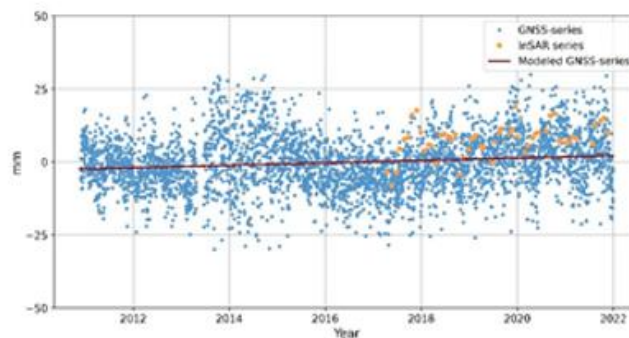
Titik	Koordinat		Velocity (mm/th)	Simpangan Baku ( $\sigma$ ) (mm)	Cummulative Disp. U- D (mm)
	Bujur (BT)	Lintang (S)			
1 (CTBN)	111 <sup>o</sup> 59'	-6 <sup>o</sup> 52'	1.885	0.537	13.327
2	111 <sup>o</sup> 55'	-6 <sup>o</sup> 52'	24.015	0.736	106.353
3	111 <sup>o</sup> 10'	-6 <sup>o</sup> 54'	-7.247	0.575	-28.195
4	111 <sup>o</sup> 51'	-6 <sup>o</sup> 50'	17.730	0.911	72.450
5	111 <sup>o</sup> 47'	-6 <sup>o</sup> 54'	22.588	0.920	97.840
6	111 <sup>o</sup> 58'	-7 <sup>o</sup> 1'	11.114	0.705	43.441
7	111 <sup>o</sup> 59'	-6 <sup>o</sup> 59'	21.150	0.737	86.669

## 5. Pembahasan

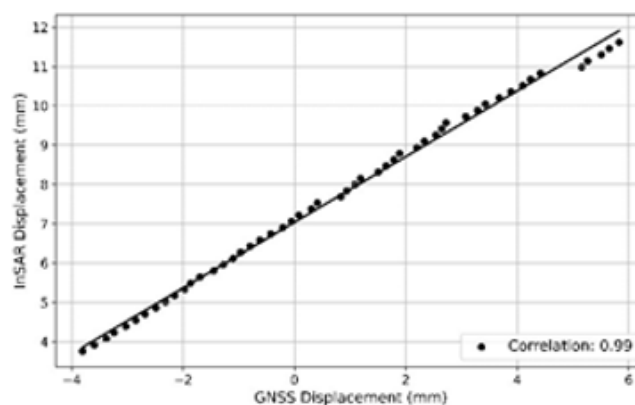
Hasil yang diperoleh dalam penelitian, dengan fokus utama pada perhitungan *displacement* untuk karakterisasi pergerakan vertikal permukaan tanah di Wilayah Tuban. Perhitungan yang dihasilkan juga dilakukan validasi menggunakan data eksternal berupa data pengamatan GNSS.

### 5.1. Perbandingan dengan Data GNSS

Validasi hasil pengamatan InSAR dilakukan dengan membandingkan data *displacement* dari pengamatan satelit dengan data dari stasiun CORS GNSS CTBN yang terletak di Kabupaten Tuban. Titik pengamatan InSAR dipilih di lokasi yang sama atau berdekatan dengan stasiun CORS CTBN, dengan jarak tidak lebih dari 30 meter. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa data yang dibandingkan berasal dari lokasi yang sama atau sangat berdekatan, sehingga validasi dapat dilakukan dengan lebih akurat.



Gambar 8. Time Series Displacement Vertikal GNSS dan InSAR di Stasiun CORS CTBN.



Gambar 9. Korelasi Displacement Vertikal GNSS dan InSAR (2017 s/d 2022).

Gambar 8 menunjukkan plot *time series* dari data GNSS dari tahun 2011 hingga 2022 dan InSAR dari tahun 2017 hingga 2022. *Time series* ini menunjukkan bahwa kedua seri data memiliki tren *displacement* yang serupa selama periode pengamatan, dengan GNSS menunjukkan pengamatan yang lebih padat dan berkesinambungan dalam jangka waktu yang lebih panjang dibandingkan dengan data InSAR.

Gambar 9 menunjukkan plot korelasi antara *displacement* yang diukur menggunakan GNSS dan InSAR untuk rentang waktu 2017 hingga 2022. Plot ini menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang tinggi antara kedua metode pengukuran, dengan nilai korelasi sebesar 0.99. Nilai korelasi tinggi ditandai dengan adanya titik-titik yang mendekati garis diagonal, yang mengindikasikan bahwa hasil pengukuran dari kedua metode tersebut konsisten satu sama lain.

Tabel 2 menyajikan perbandingan hasil pengukuran *displacement* vertikal antara GNSS dan InSAR. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa hasil pengukuran *velocity* dan *cumulative displacement* relatif linier dan konsisten antara kedua metode. Perbedaan *velocity* dan *cumulative displacement* yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa kedua metode pengukuran memberikan hasil yang sebanding. Dengan demikian, meskipun GNSS dan InSAR memiliki pendekatan yang berbeda dalam pengukuran *displacement*, keduanya dapat memberikan hasil yang sebanding dan dapat digunakan secara efektif untuk memantau *displacement* vertikal permukaan tanah di wilayah Tuban.

Tabel 2. Hasil Perbandingan Pengukuran Displacement Vertikal antara GNSS dan InSAR (2017 s/d 2022)

Titik CTBN	U-D <i>displacement</i>		
	Velocity (mm/th)	Simpangan Baku ( $\sigma$ ) (mm)	Cummulative Disp (mm)
GNSS	2.149	0.550	13.850
InSAR	1.885	0.537	13.327

## 5.2. Karakterisasi Pergerakan Vertikal Permukaan Tanah Wilayah Tuban

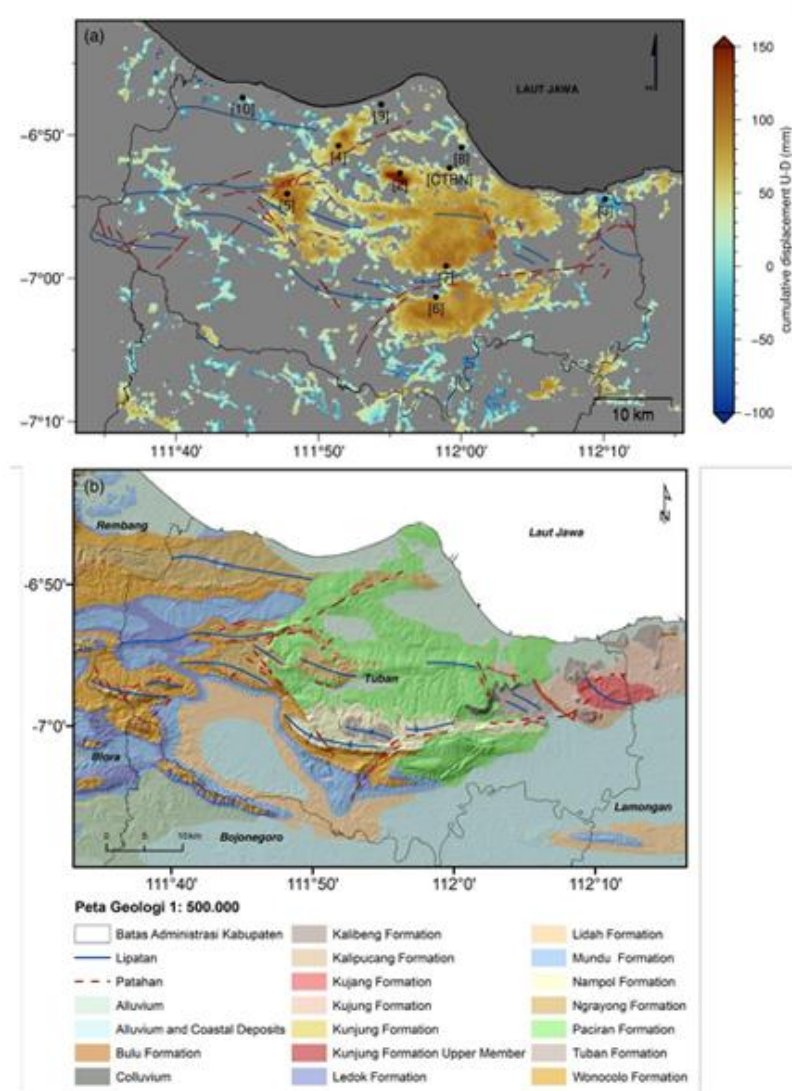
Karakterisasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola pergerakan tanah yang terjadi dan mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhinya. Berdasarkan hasil pengolahan InSAR dengan metode SBAS pada pengamatan dari bulan April 2017 hingga November 2021, diketahui bahwa terdapat pergerakan permukaan tanah di wilayah Tuban yang didominasi oleh kenaikan permukaan tanah (*uplift*). Gambar 10 bagian (b) menunjukkan peta geologi wilayah Tuban, di mana wilayah yang mengalami pergerakan tanah signifikan berada di Formasi Paciran. Formasi Paciran, yang terdiri dari batu gamping pejal dan batu gamping dolomitan, merupakan salah satu formasi geologi utama di wilayah Tuban (Situmorang dkk., 1992). Daerah ini memiliki topografi yang khas dengan bukit-bukit terjal serta permukaan batuan yang tajam dan berongga. Batu gamping dolomitan di Formasi Paciran umumnya memiliki tekstur butiran halus hingga kasar yang berwarna putih keabuan (Pringgoprawiro, 1983). Batu ini lebih keras dan tahan terhadap pelapukan dibandingkan dengan batu gamping biasa karena kandungan magnesium yang lebih tinggi (Oktavianto, 2024).

Kemungkinan pergerakan vertikal di jenis batuan Formasi Paciran dapat dikaitkan dengan karakteristik batuanya. Batu gamping dolomitan dan batu gamping di Formasi Paciran rentan terhadap pelarutan karstik. Proses pelarutan ini dapat menciptakan rongga dan saluran bawah tanah, yang seiring waktu dapat mempengaruhi stabilitas dari pergerakan vertikal tanah. Pergerakan air tanah dalam sistem karstik juga dapat menyebabkan peningkatan tekanan hidrolik di dalam batuan yang berpori (Oktavianto, 2024). Tekanan ini dapat mendorong *uplift* permukaan tanah, terutama di area yang memiliki permeabilitas tinggi akibat pelarutan karstik.

Terdapat juga patahan (sesar) dan lipatan yang teridentifikasi di wilayah Tuban. Patahan (sesar) yang diidentifikasi di Kabupaten Tuban mencakup sesar naik (*thrust fault*), sesar turun (*normal fault*), dan sesar geser (*strike-slip fault*). Sesar naik berarah relatif barat-timur, sementara sesar normal dan sesar geser umumnya berarah barat daya-timur laut dan sebagian barat laut-tenggara (Profil Pertambangan dan Industri Kabupaten Tuban, 2018). Salah satu sesar normal yang berarah timur laut-barat daya, melalui wilayah Kecamatan Merakurak hingga Kecamatan Kerek, di mana bagian yang terletak di sebelah barat sesar bergerak relatif naik dibandingkan dengan bagian sebelah timur. Hasil ini sesuai dengan hasil *displacement* vertikal olahan InSAR, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Titik pengamatan di sekitar patahan ini adalah titik 4 dan 5. Titik 4 dan 5 menunjukkan *uplift* dengan laju masing-masing 17,730 mm/tahun dan 22,588 mm/tahun. Selain itu, titik pengamatan 3 menunjukkan adanya *subsidence* dengan laju -7,247 mm/tahun. Wilayah ini merupakan wilayah pemukiman padat yang berada di pesisir, sehingga kemungkinan *subsidence* terjadi disebabkan oleh faktor antropogenik, seperti pengambilan atau ekstraksi air tanah yang berlebihan.

Dengan mempertimbangkan karakteristik geologi dan faktor-faktor yang mempengaruhi, *uplift* yang terjadi di wilayah Tuban kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi aktivitas tektonik dan proses pelarutan karstik. Aktivitas tektonik di sepanjang patahan dapat menyebabkan pergerakan vertikal, sementara pelarutan karstik dapat meningkatkan porositas dan tekanan hidrolik dalam batuan, yang juga berkontribusi pada *uplift*. Di sisi lain, *subsidence* yang terjadi di wilayah pesisir Kabupaten Tuban kemungkinan besar disebabkan oleh aktivitas manusia, terutama pengambilan air tanah yang berlebihan. Berdasarkan penelitian Zikayah, (2023), daerah pesisir di Kabupaten Tuban merupakan wilayah yang memiliki banyak infrastruktur dan pusat-pusat kegiatan. Infrastruktur tersebut meliputi jalan arteri primer Pantai Utara (Pantura) yang menghubungkan Jawa

Timur sampai Jawa Barat, pelabuhan, pergudangan, industri, pemukiman, serta wisata. Sebagai contoh, pada tanggal 30 Juni 2020 dan 6 Juli 2020, di Kecamatan Bancar beberapa rumah terdampak banjir rob (Zikayah, 2023). Faktor pemicu utama dari kejadian ini adalah penurunan muka tanah yang diikuti oleh kenaikan muka air laut. Aktivitas antropogenik seperti pengambilan air tanah yang berlebihan mempercepat proses *subsidence* di wilayah ini.



Gambar 10. (a) Hasil *Cumulative Displacement Vertikal (U-D)*, (b) Peta Geologi Wilayah Tuban (Sumber data geologi: Badan Geologi, Kementerian ESDM).

## 6. Kesimpulan

Penelitian ini mengungkapkan bahwa wilayah selatan dan barat kota Tuban mengalami *uplift* yang signifikan dengan laju rata-rata 16 mm/tahun selama periode April 2017 hingga November 2021. *Uplift* ini diduga berhubungan dengan aktivitas tektonik dan karakteristik geologi setempat, terutama pada Formasi Paciran yang didominasi oleh batu gamping dolomitan. Aktivitas tektonik di sepanjang patahan dan proses pelarutan karstik berkontribusi terhadap pergerakan permukaan tanah ini. Sebaliknya, *subsidence* terdeteksi di wilayah pesisir utara kota Tuban dengan laju rata-rata -8 mm/tahun. *Subsidence* ini diduga disebabkan oleh faktor antropogenik, khususnya ekstraksi air tanah yang berlebihan yang menyebabkan kompaksi sedimen dan penurunan permukaan tanah. Wilayah pesisir yang padat dengan infrastruktur dan aktivitas manusia, seperti pemukiman, industri, dan fasilitas pelabuhan, sangat rentan terhadap fenomena ini.

Validasi hasil pengamatan InSAR dengan data GNSS menunjukkan korelasi yang sangat tinggi dengan nilai korelasi 0,99. *Velocity* yang diukur menggunakan GNSS adalah 2,149 mm/tahun, sedangkan dengan InSAR adalah 1,885 mm/tahun. *Cumulative displacement* yang diukur dengan GNSS adalah 13,850 mm, sedangkan dengan InSAR adalah 13,327 mm. Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat perbedaan metode pengukuran, kedua teknik tersebut menghasilkan data yang konsisten dan dapat diandalkan untuk memantau *displacement* vertikal permukaan tanah di wilayah Tuban.

Dengan demikian, penggunaan metode InSAR dapat diandalkan dan efektif sebagai alat pemantauan pergerakan tanah di daerah yang luas. Kedua metode ini, bila digunakan secara bersamaan, dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang dinamika pergerakan tanah di wilayah tersebut.

## 7. Daftar Pustaka

- Alaska Satellite Facility. (2023). Introduction to SAR - HyP3. Diakses 15 Juni 2024. <https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction-to-sar/>
- Andreas, H., Abidin, H. Z., Sarsito, D. A., Meilano, I., dan Susilo. (2019). Investigating the tectonic influence to the anthropogenic subsidence along northern coast of Java Island Indonesia using GNSS data sets. *International Symposium on Global Navigation Satellite System 2018 (ISGNSS 2018)*. Vol. 94. Bali, Indonesia.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., dan Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11):2375–83. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Dudek, M., Tajduś, K., Misa, R., dan Sroka, A. (2020). Predicting of land surface uplift caused by the flooding of underground coal mines – A case study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 132. Doi : 10.1016/j.ijrmms.2020.104377.
- Fujiwara S, Nishimura T, Murakami M, Nakagawa H, Tobita M, Rosen PA (2000) 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 27 (14):2049-2052. doi : <https://doi.org/10.1029/1999gl011291>
- Fuhrmann, T., dan Garthwaite, M. C. (2019). Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. *Remote Sensing* 11(3):241. doi: 10.3390/rs11030241.
- Galloway, D. L., Jones, D. R. dan Ingebritsen, S. E. 1999. Land subsidence in the United States. Korkouli, P., Wegmuller, W. A., dan Tnasey, K. 2017. *Earth Observation of land and emergency monitoring*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Lazecký, M., Spaans, K., & Wright, T. (2020). LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*, 12(15), Article 2430. doi:10.3390/rs12152430.
- Liu C, Liu X, Huang R, Zhang L, Ye Z, Tong X (2024) Stability analysis of continuous operating reference stations on Vancouver Island with a permanent GPS deformation array based on GAMIT/GLOBK. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 133:104118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104118>
- Morishita, Yu, Lazecky, M., Wright, T., Weiss, J., Elliott, J., dan Hooper, A. (2020). LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sensing* 12(3):424. doi:10.3390/rs12030424.
- Morishita Y (2021) Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS. *Progress in Earth and Planetary Science* 8 (1):6. doi:10.1186/s40645-020-00402-7
- Morishita Y, Sugimoto R, Nakamura R, Tsutsumi C, Natsuaki R, Shimada M (2023) Nationwide urban ground deformation in Japan for 15 years detected by ALOS and Sentinel-1. *Progress in Earth and Planetary Science* 10 (1):66. doi:10.1186/s40645-023-00597-5
- Oktavianto, F. (2024). *Karakteristik Batugamping pada Quarry PT. Solusi Bangun Indonesia Daerah Mliwang, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur dan Rekomendasi Pemanfaatannya*. Skripsi, Universitas Gadjah Mada.
- Panuntun, H., dan Taftazani, M. I. (2022). Geodetic Imaging of Surface Deformation of Tengger Caldera ( Bromo Volcano ) Using Time Series Radar Interferometry. Dalam *Prosiding SNTT*
- Panuntun H, Heliani LS, Suryanto W, Pratama C (2022) Importance of Tropospheric Correction to C-band InSAR Measurements: Application in the 2018 Palu Earthquake. *Indonesian Journal of Geography* 50 (3):207-213. doi:10.22146/ijg.68984
- Pasaribu, J. M., Nugroho, J. T., dan Wiweka. (2014). *Pemanfaatan Penginderaan Jauh Untuk Pemantauan Penurunan Muka Tanah (Land Subsidence)*. Bunga Rampai: Pemanfaatan Penginderaan Jauh untuk Pemantauan, Deteksi, dan Kajian Lingkungan.
- Pringgoprawiro, H., (1983). *Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara Suatu Pendekatan Baru*. Institut Teknologi Bandung. 138 hal
- Pemerintah Kabupaten Tuban (2018). *Profil Pertambangan dan Industri Kabupaten Tuban Propinsi Jawa Timur*. Diakses 15 Juni 2024 [https://www.academia.edu/38169161/PROFIL\\_GEOLOGI\\_KAB\\_TUBAN\\_PROPINSI\\_JAWA\\_TIMUR.pdf](https://www.academia.edu/38169161/PROFIL_GEOLOGI_KAB_TUBAN_PROPINSI_JAWA_TIMUR.pdf).
- Situmorang, R.L., Smit, R., dan Van Vesseem, E.J. (1992). *Peta Geologi Lembar Jatirogo, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Skala 1:100.000. 1 lembar.

- Susilo, S., Salman, R., Hermawan, W., Widyaningrum, R., Wibowo, S. T., Lumban-Gaol, Y. A., Meilano, I., dan Yun, S. H. (2023). GNSS land subsidence observations along the northern coastline of Java, Indonesia. *Scientific Data* 10(1):1–8. doi: 10.1038/s41597-023-02274-0.
- Weiss JR, Walters RJ, Morishita Y, Wright TJ, Lazecky M, Wang H, Hussain E, Hooper AJ, Elliott JR, Rollins C, Yu C, González PJ, Spaans K, Li Z, Parsons B (2020) High-Resolution Surface Velocities and Strain for Anatolia From Sentinel-1 InSAR and GNSS Data. *Geophysical Research Letters* 47 (17):e2020GL087376. doi:<https://doi.org/10.1029/2020GL087376>
- Yudinugroho, M. (2021). Analisis Pergerakan Permukaan Tanah Pada Sesar Opak Menggunakan Metode Quasi Persistent Scatterer Interferometry (Q-PSI) Synthetic Aperture Radar (SAR). Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- Zikayah, H. (2023). Kajian Kerusakan Lingkungan akibat Aktivitas Pabrik Semen Tuban terhadap Kondisi Masyarakat dan Lingkungan Sekitar. Tesis, Universitas Gadjah Mada.