

## ANALISIS DEFORMASI KOTA SURABAYA DI WILAYAH SEKITAR SESAR KENDENG DENGAN METODE PS-INSAR

Toifatul Ulma\*

Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

\*Penulis Koresponden : toifatul.ulma16@mhs.geodesy.its.ac.id

**Abstrak.** Kota Surabaya adalah kota terbesar kedua di Indonesia yang memiliki populasi hingga 3 juta jiwa. Sebagai kota metropolitan, Surabaya telah menjadi pusat berbagai kegiatan dengan fasilitas yang dibangun dengan baik. Berdasarkan penelitian geologi yang telah dilakukan, Kota Surabaya dilewati oleh Sesar Kendeng yang perlu menjadi perhatian khusus karena patahan ini diteliti aktif dan bergerak secara terus menerus. Dengan demikian, aktivitas dari sesar ini dimungkinkan akan menjadi ancaman di daerah ini. Oleh karena itu, sebagai upaya untuk mengurangi tingkat risiko yang terjadi maka perlu dilakukan pemantauan pada aktivitas Sesar Kendeng secara berkala. Pada penelitian ini metode yang digunakan dalam pengamatan perubahan permukaan tanah atau deformasi adalah metode *Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar* (PS-InSAR) menggunakan citra satelit Sentinel-1 tipe *single look complex* dengan akuisisi data tahun 2017-2019. Hasil dari pengolahan PS-InSAR menunjukkan sebagian besar penurunan permukaan tanah (*subsidence*) terjadi di bagian Surabaya Utara (Asemrowo dan Morokrembangan) dan Timur (Kenjeran, Sukolilo, dan Gunung Anyar Tambak) dengan *velocity* penurunan rata – rata sebesar 50 mm/tahun. Sedangkan di bagian Surabaya Barat yang dilewati oleh Sesar Kendeng mengalami kenaikan muka tanah (*uplift*) dengan *velocity* kenaikan rata-rata sebesar 20 mm/tahun. Hasil dari penelitian ini divalidasi dengan data deformasi GPS pada tahun 2017-2019.

**Kata Kunci:** deformasi; PS-InSAR; Sesar Kendeng; validasi GPS

**Abstract.** The city of Surabaya is the second largest city in Indonesia with a population of up to 3 million. As a metropolitan city, Surabaya has become the center of various activities with well-developed facilities. Based on geological research that has been carried out, the city of Surabaya is passed by the Kendeng Fault which needs special attention because this fault is studied actively and moves continuously. Thus, the activity from this fault is likely to become a threat in this area. Therefore, to reduce the level of risk that occurs, it is necessary to monitor the Kendeng Fault activity periodically. In this study, the method used in observing changes in soil surface or deformation is the *Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar* (PS-InSAR) method using Sentinel-1 satellite imagery type *single look complex* with data acquisition 2017-2019. The results of PS-InSAR processing showed that most of the subsidence occurred in the parts of North Surabaya (Asemrowo and Morokrembangan) and East (Kenjeran, Sukolilo, and Mount Anyar Tambak) with mean subsidence velocity of 50 mm / year. Meanwhile, in the part of West Surabaya where the Kendeng Fault passes, there is an uplift with mean velocity of increase of 20 mm / year. The results of this study were validated with GPS deformation data for the years 2017-2019.

**Keywords:** deformation; PS-InSAR; Kendeng Fault; GPS validation

### PENDAHULUAN

Kota Surabaya adalah kota terbesar kedua di Indonesia dengan jumlah penduduk 2,87 juta jiwa (Badan Pusat Statistik, 2018). Pertumbuhan penduduk yang pesat juga diimbangi dengan peningkatan jumlah bangunan infrastruktur dan kebutuhan air. Ini dibuktikan dengan banyaknya permintaan surat Ijin Mendirikan Bangunan (IMB) pada tahun 2015 hingga 2016 dimana pembangunan

apartemen meningkat sebesar 10.6% dibandingkan dengan tahun sebelumnya (Pitoko, 2016).

Berdasarkan kondisi geologinya, sebagian besar daratan Kota Surabaya didominasi oleh *alluvial* (tanah endapan), khususnya bagian Utara dan Timur Kota Surabaya (Anjasmara dkk., 2017). Sedangkan Surabaya bagian Barat terbentuk dari beberapa formasi yaitu, Lidah, Pucangan, dan Kalipucang. Dari hasil penelitian terbaru Pusat Gempa Nasional, dapat



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Anjasmara dkk., 2017)

dilihat bahwa Surabaya dilewati oleh sesar aktif yakni Sesar Kendeng (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Berdasarkan pengamatan, terdapat anomali Bouguer yang membuat Sesar Kendeng ini terdiri dari kumpulan sesar naik dan banyak lipatan (*blind faults*). Ditinjau dari bentangnya, Sesar Kendeng terbagi menjadi dua segmen, yaitu Segmen Surabaya yang memanjang dari wilayah Semarang, Provinsi Jawa Tengah hingga 300 km ke Provinsi Jawa Timur. Berikutnya merupakan Segmen Waru yang membentang mulai dari bukit di kawasan Karang Pilang hingga ke wilayah Sidoarjo, Jombang dan berakhir di Nganjuk. Di wilayah Kota Surabaya, sesar ini terletak di antara daratan alluvium dan formasi Kalipucang dengan arah lintasan dari barat ke timur. Kondisi tersebut diindikasikan dapat menyebabkan Kota Surabaya rawan terhadap adanya pergerakan tanah atau deformasi.

Deformasi adalah perubahan kedudukan atau pergerakan titik secara absolut maupun relatif baik pada skala regional maupun lokal atau hanya pada sebagian kecil wilayah (Haqqi dkk., 2015). Deformasi tanah dapat berakibat pada beberapa kerusakan infrastruktur dan fasilitas lainnya. Ancaman bencana yang timbul dari Sesar Kendeng dapat diprediksi akan menimbulkan korban jiwa dan kerugian yang besar jika tidak dilakukan mitigasi bencana secara terkendali.

Mengacu pada berbagai faktor yang telah disebutkan sebelumnya, maka perlu dilakukan

penelitian secara berkala untuk mengamati terjadinya pergerakan tanah di Kota Surabaya. Identifikasi deformasi dapat diamati secara temporal menggunakan citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Permanent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar* (PS-InSAR). Metode PS-InSAR dapat digunakan untuk mendeteksi pergerakan kecil dari sebuah wilayah dengan akurasi mencapai millimeter (Iodice, 2009). Dengan menerapkan metode PS-InSAR, penelitian ini diharapkan dapat mengamati rata-rata kecepatan penurunan tanah di Kota Surabaya yang diamati dari tahun 2017 hingga tahun 2019, serta melakukan analisis titik-titik penurunan tanah yang mempunyai potensi bahaya.

## METODOLOGI

### Lokasi Penelitian

Lokasi pada penelitian ini adalah Kota Surabaya dengan koordinat  $07^{\circ}11'00''$  -  $07^{\circ}21'00''$  Lintang Selatan dan  $112^{\circ}36'00''$ - $112^{\circ}54'00''$  Bujur Timur. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kota Surabaya tahun 2018, luas Kota Surabaya sebesar 326,36 km<sup>2</sup>. Kota Surabaya berbatasan langsung dengan Selat Madura (Utara dan Timur), Kabupaten Gresik (Selatan), dan Kabupaten Sidoarjo (Barat).

### Data dan Peralatan

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Set data citra satelit Sentinel-1A dengan tipe *Single Look Complex* level 1, arah *ascending* dan polarisasi VV. Citra yang digunakan sebanyak 33 yang ditampilkan pada Tabel 1.
- DEM SRTM 30 meter.

Tabel 1. Daftar Set Citra Sentinel-1A yang Digunakan pada Penelitian

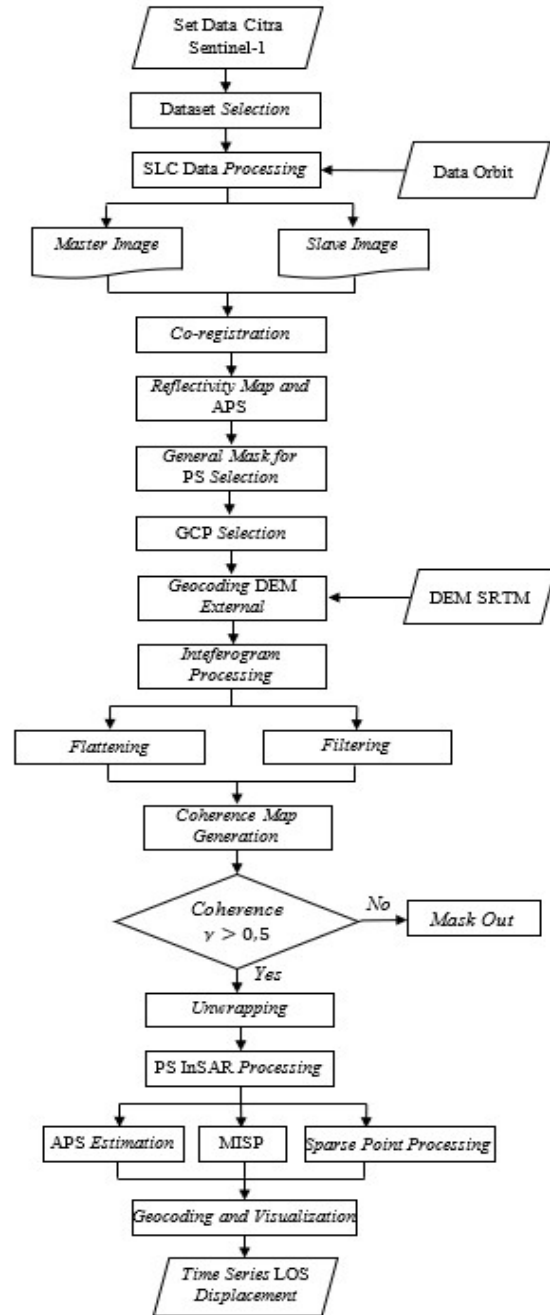
Tanggal Akuisisi	Absolut Orbit	Look Direction
19-06-2017	17101	Right
25-07-2017	17626	Right
18-08-2017	17976	Right
11-09-2017	18326	Right
29-10-2017	19026	Right
22-11-2017	19376	Right
16-12-2017	19726	Right
28-12-2017	19901	Right
01-01-2018	20076	Right
26-02-2018	20776	Right
22-03-2018	21126	Right
15-04-2018	21476	Right
09-05-2018	21826	Right
26-06-2018	22526	Right
20-07-2018	22876	Right
01-08-2018	23051	Right
25-08-2018	23401	Right
06-09-2018	23576	Right
30-09-2018	23926	Right
24-10-2018	24276	Right
29-11-2018	24801	Right
28-01-2018	25676	Right
21-02-2019	26026	Right
17-03-2019	26376	Right
22-04-2019	26901	Right
28-05-2019	27426	Right
21-06-2019	27776	Right
15-07-2019	28126	Right
20-08-2019	28651	Right
25-09-2019	29176	Right
19-10-2019	29526	Right
24-11-2019	30051	Right
18-12-2019	30401	Right

**Peralatan**

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari perangkat keras (*hardware*) yaitu Personal Computer RAM 256 GB dan perangkat lunak (*software*) antara lain SARProz untuk mengolah citra satelit Sentinel-1 (Qin, 2018), Matlab, *Google Earth*, dan *Generic Mapping Tools* untuk memplot peta deformasi.

**Tahapan Penelitian**

Berikut merupakan diagram alir pengolahan PS-InSAR pada penelitian ini yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Pengolahan PS-InSAR

1. *Dataset Selection*

Tahap ini dilakukan untuk memilih folder berisi citra SAR dalam format *Single Look Complex* (SLC) yang akan digunakan dalam pengolahan. Pada pemilihan file ini didapatkan informasi

secara otomatis mengenai set data citra yang akan digunakan.

## 2. SLC Data Processing

Tahap ini bertujuan untuk menentukan parameter dari data citra yang akan digunakan pada proses pengolahan nanti. Parameter tersebut seperti polarisasi dan *subswath* citra sesuai dengan daerah yang akan dianalisis. Dari parameter yang telah ditentukan selanjutnya dilakukan pengunduhan data orbit satelit dan data cuaca serta dilakukan pemilihan *Area of Interest*.

## 3. Co-registration

Tahap ini merupakan proses menentukan hubungan antara dua citra SAR yang didefinisikan sebagai citra *master* dan *slave*. Baik tidaknya data yang terkoregistrasi ditentukan dari nilai koherensi pada akhir proses pengolahan. Dimana nilai koherensi tersebut antara 0 hingga 1. Nilai yang mendekati angka 1 menunjukkan koherensi yang kuat antara kedua citra tersebut.

## 4. Reflectivity Map and APS

Perhitungan nilai *Amplitude Stability Index* dari tiap piksel citra serta pembentukan peta reflektifitas yang menunjukkan rata-rata amplitudo dari sekumpulan citra yang digunakan. Menurut Gonnuru dan Kumar (2018) *Amplitude Stability Index* didapatkan dari:

$$ASI = 1 - D_A \quad (1)$$

dengan :

$ASI$  : *Amplitude Stability Index*

$D_A$  : *Dispersion Amplitude*

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (2)$$

dengan :

$\sigma_A$  : Standar deviasi amplitudo

$\mu_A$  : Rata-rata amplitudo

## 5. General Mask for PS Selection

Pembentukan titik-titik *sparse* yang akan berguna untuk penentuan titik-titik PS.

## 6. GCP Selection dan Geocoding DEM External

Tahap ini bertujuan untuk mengkonversi koordinat citra menjadi koordinat permukaan bumi. *Geocoding* awal ini menggunakan data DEM sebagai parameter dalam mengkonversi koordinat citra menjadi koordinat permukaan.

## 7. Interferogram Processing

Pembentukan interferogram dari masing-masing citra akan menghasilkan beda fase dimana perbedaan fase ini dapat menunjukkan identifikasi awal adanya perubahan pada permukaan bumi. Parameter dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan *coherence threshold* > 0,5 (Ferretti dkk., 2001).

## 8. Coherence Map Generation

Perhitungan nilai *spatial coherence* atau rata-rata nilai koherensi dari set interferogram.

## 9. Unwrapping

*Wrapped phase* pada tiap interferogram bernilai modulo  $2\pi$  ( $-\pi, \pi$ ) dimana nilai ini harus melalui proses *unwrapping* untuk mendapatkan nilai *phase* yang sebenarnya. Pada proses ini, *atmospheric decorrelation* akan dihilangkan sehingga informasi yang didapat lebih jelas.

## 10. PS-InSAR Processing

Bagian ini terbagi menjadi 3 tahapan utama yaitu:

- *Atmospheric Phase Screen Estimation*

Merupakan pembentukan awal dari titik PS dimana parameter yang digunakan adalah *Amplitude Stability Index* (ASI) yang dipilih berdasarkan *Amplitude Dispersion Index* dengan nilai batas < 0,2. Nilai ini dapat memberikan peluang pada titik yang terpilih, memiliki nilai ASI tinggi. Selain itu, juga memastikan titik *Point Scatterer* yang terpilih memiliki *decorrelation noise* rendah. Parameter nilai ASI yang digunakan adalah 0,8 (Farova dkk., 2019).

- *Multi Image Sparse Processing*

Tahapan ini akan membentuk amplitudo *time series* dari titik PS yang telah terpilih. Proses ini juga akan membentuk perubahan permukaan tanah yang terjadi dalam rentang data SAR yang digunakan. Setelah itu dilakukan estimasi nilai *Atmospheric*

*Phase Screen* (APS) yang bertujuan untuk menghilangkan efek atmosferik akibat perubahan secara temporal dan spasial dari keadaan atmosfer.

- *Sparse Point Processing*  
Proses pembentukan titik-titik final PS dari *Point Scatterers Candidate* pada tahap sebelumnya. Titik PS didapatkan setelah pembentukan phase residual. Fase residu adalah sisa dari penghilangan APS dan nilai estimasi parameter. Parameter-parameter yang digunakan sama dengan parameter ketika proses *APS Estimation*.
- *Geocoding and Visualization*  
Mengkonversi koordinat titik-titik PS menjadi koordinat bumi. Titik PS dikonversi ke dalam koordinat geografis. Pada tahap ini, hasil akhir titik-titik PS dapat di tampilkan dalam *Google Earth*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Baseline Plot*

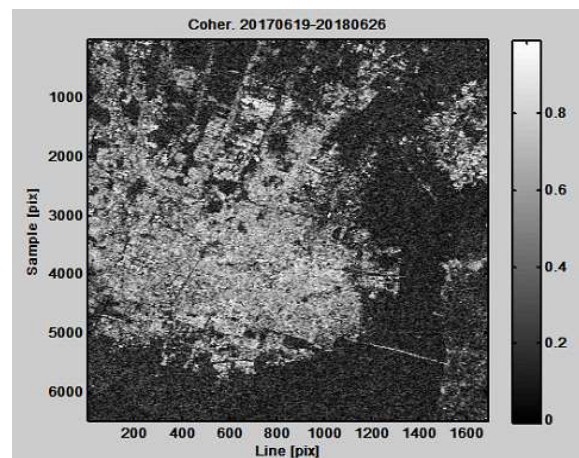
Pada metode InSAR terdapat dua parameter yang dapat memengaruhi koherensi, yang dalam hal ini merupakan parameter langsung untuk memperlihatkan tingkat kemiripan antara dua pengamatan. Parameter pertama adalah spasial (*perpendicular baseline*), yang menunjukkan informasi terkait sensitivitas terhadap tinggi topografi, efektivitas dari *phase unwrapping*, serta seberapa banyak dekorelasi akibat gradien fase. Selanjutnya adalah *temporal baseline* yang dapat mereduksi fase sinyal akibat *noise* dan topografi akibat dari gradien fase yang umumnya sesingkat mungkin (Ferretti dkk., 2001). Citra perekaman tanggal 6 Juni 2018 dipilih sebagai *master*, sedangkan 32 citra lainnya berperan sebagai *slave*. Citra master merupakan citra yang dinilai paling optimal, yang mana citra tersebut terpilih berdasarkan panjang *baseline temporal* dan *perpendicular* yang terpendek dari seluruh set data citra yang digunakan. Konfigurasi citra pada pengolahan PS-InSAR ini menggunakan *single-master image* sesuai dengan algoritma PS-InSAR yang menggunakan beberapa citra SAR pada area yang sama untuk menghasilkan

interferogram dengan satu citra *master* (Nam dkk., 2021).

Jarak *perpendicular* terjauh terletak pada pasangan citra *master* tanggal 6 Juni 2018 dan citra *slave* tanggal 25 September 2019 yaitu sebesar 64 m. Sedangkan jarak temporal terjauh terletak diantara citra *master* tanggal 6 Juni 2018 dan citra *slave* tanggal 18 Desember 2019 yaitu 540 hari. Jauhnya perbedaan waktu pada tiap pasangan citra dapat mengakibatkan dekorelasi temporal dan rendahnya koherensi karena adanya perubahan kondisi objek diantara selang waktu pengamatan. Sedangkan jauhnya selisih *perpendicular baseline* dapat mengakibatkan dekorelasi spasial, ini mempengaruhi geometrik citra.

### Nilai Koherensi

Koherensi menunjukkan sejauh mana kemiripan tiap piksel antara citra *master* dan *slave* dengan nilai 0 sampai 1. Hilangnya atau kosongnya data pada beberapa piksel (koherensi nol) disebabkan oleh dekorelasi temporal sehingga nilai koherensi menurun.



Gambar 3. Visualisasi *Image Coherence*

Gambar 3, menunjukkan beberapa area yang tidak memiliki informasi piksel karena rendahnya nilai koherensi akibat dekorelasi temporal. Kondisi troposfer antara dua citra dapat mempengaruhi perubahan refraksi/ pembiasan sinyal sehingga dapat menurunkan nilai koherensi (Hanssen, 2001).

Salah satu contoh koherensi rendah ditunjukkan pada area *mangrove* yang berada di Surabaya Timur, pertumbuhan vegetasi atau pergerakan daun dapat menyebabkan adanya perbedaan *phase* dari dua

pengambilan data. Bagaimanapun perbedaan kondisi saat masa tanam, tumbuh dan panen juga menunjukkan adanya variasi phase disepanjang data *time series* serta dapat menurunkan nilai koherensi, kondisi ini terjadi di sekitar Kecamatan Benowo yang lokasinya berada di sebuah sawah yang ditanami padi.

Pada penelitian ini digunakan parameter *threshold coherence* sebesar 0,5 dimana piksel yang memiliki koherensi bawah 0,5 akan terhapus. Pemilihan 0,5 dilakukan untuk mempertahankan informasi *mean LOS Velocity* dan menyeleksi atau meminimalisir rendahnya koherensi pada area studi

### Rata-Rata Kecepatan Deformasi (*Mean LOS Velocity*)

Pada metode PS-InSAR, *Point Scatterer* (PS) didefinisikan oleh stabilitas fase yang dipilih pada saat proses *PS candidates* berdasarkan karakteristik fase yang bergantung pada nilai *amplitude dispersion*. Sehingga, *PS candidates* dapat dipilih dengan cara menghitung *amplitude dispersion index* dan memilih piksel dengan nilai *amplitude dispersion index* yang kurang dari nilai *threshold* yang telah didefinisikan di awal (Harris dkk., 2016).

Metode di atas memiliki tingkat kesuksesan yang tinggi dalam penentuan PS yang cukup baik, sebagai contoh pada bangunan buatan manusia yang memiliki nilai *Signal to Ratio* (SNR) yang tinggi (>10). Nilai *amplitude dispersion* yang bernilai tinggi (>0,4) berada pada wilayah yang didominasi oleh vegetasi dan bernilai rendah pada wilayah urban atau pemukiman. Pada Gambar 6, dapat dilihat persebaran PS lebih rapat pada daerah urban yang

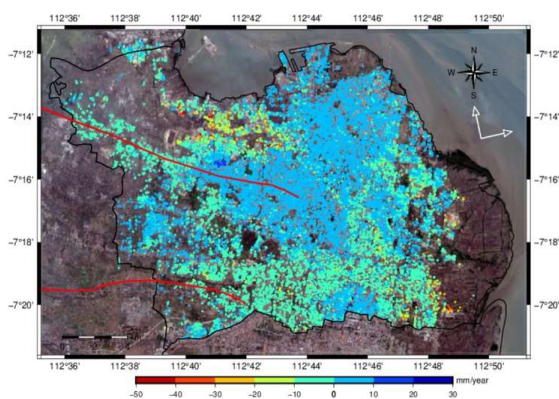
memiliki dominan dengan bangunan buatan manusia. Sedangkan pada daerah yang didominasi oleh vegetasi, persebaran PS-nya kurang rapat. Hal ini dikarenakan pada daerah urban penggunaan *amplitude analysis* sangat baik, sedangkan kerapatan piksel PS yang diidentifikasi oleh *amplitude dispersion* di area alam umumnya lebih rendah (Farina dkk., 2006).

Dengan pengolahan menggunakan *SARProz* dihasilkan sebaran PS yang menunjukkan nilai *velocity rate* dari perpindahan pada arah *Line of Sight* (LOS) untuk seluruh area penelitian. Pada Gambar 4, *velocity* penurunan rata – rata di Kota Surabaya 50 mm/tahun. Jika dilihat dari pola deformasinya, Surabaya Utara mayoritas mengalami *land subsidence*. Kecepatan deformasi di Asemrowo mencapai -50 mm/tahun dimana nilai ini merupakan nilai *subsidence* terbesar di Kota Surabaya. Karakter tanah basah yang mudah bergerak di Surabaya Utara menyebabkan mayoritas di wilayahnya terjadi *land subsidence* (Ferretti dkk., 2001). Selain itu daerah tersebut merupakan daerah industri dimana intensitas kendaraan berat yang melalui daerah tersebut cukup tinggi. Sedangkan Surabaya Barat mayoritas mengalami *uplift*.

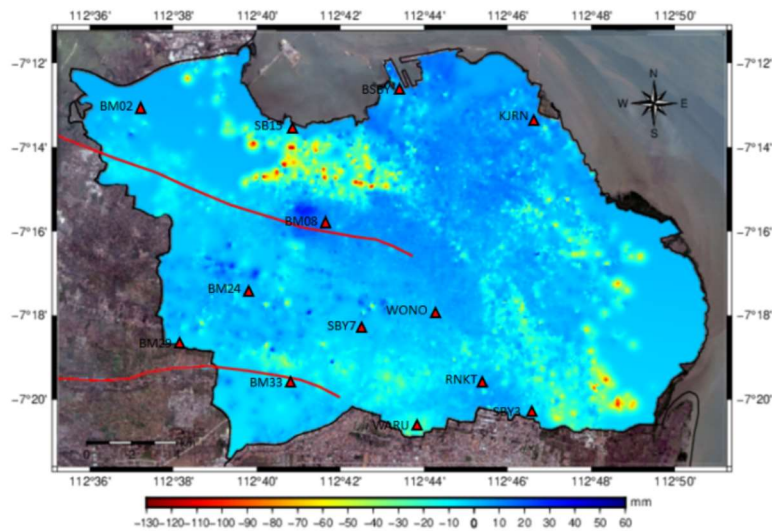
Jika dilihat dari topografinya, antara Surabaya Utara dan Barat mempunyai karakteristik topografi yang berbeda. Perbedaan topografi tersebut yang menjadi penyebab adanya perbedaan pola deformasi dimana Surabaya Utara cenderung turun dan Surabaya Barat cenderung naik, ditambah lagi dengan sesar Kendeng yang melewati Surabaya Barat. Surabaya Selatan sebagian mengalami *uplift* dan sebagian *subsidence* namun kecil, sedangkan *subsidence* di Surabaya Timur sebagian besar terjadi di lokasi yang jaraknya tidak jauh dengan kawasan *mangrove* dan pantai.

### Validasi dengan Hasil Pengolahan Data GPS

Dari hasil pengolahan juga didapatkan nilai *displacement LOS velocity* untuk setiap titik PS. Hasil *displacement* tersebut selanjutnya dilakukan



Gambar 4. Mean LOS Velocity



Gambar 5. Stasiun GPS untuk Pengamatan Deformasi Kota Surabaya

interpolasi dengan grid 1", hal ini disesuaikan dengan resolusi citra Sentinel-1A yaitu 20 meter.

Dari hasil pengolahan juga didapatkan nilai *displacement LOS velocity* untuk setiap titik PS. Hasil *displacement* tersebut selanjutnya dilakukan interpolasi dengan grid 1", hal ini disesuaikan dengan resolusi citra Sentinel-1A yaitu 20 meter. Hasil interpolasi ini digunakan untuk kebutuhan validasi titik PS dengan hasil pengolahan data titik GPS yang telah dilakukan sebanyak 4 kala (Anjasmara dkk., 2019). Data GPS ini yang bersifat kontinu dan periodik dan didapatkan dari metode *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Data tersebut diolah menggunakan *software GPS Analysis at MIT* (GAMIT) dan *Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program* (GLOBK). Adapun waktu pengamatan GPS yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.

Hasil *LOS displacement LOS velocity* yang didapatkan dari pengolahan PS-InSAR berkisar pada -130 mm/tahun sampai dengan +50 mm/tahun. Terdapat 13 titik GPS yang digunakan dalam validasi hasil dari pengolahan data SAR ini.

Tabel 2. Waktu Pengamatan GPS

Kala	Tanggal	Day
1	10-13 Maret 2017	069-072
2	11-15 September 2017	254-258
3	11-15 Mei 2018	131-135
4	26-29 Oktober 2018	299-302

Untuk memvalidasi, hasil dari pengolahan data GPS harus dikonversi ke dalam *LOS displacement*, dikarenakan vektor pergeseran SAR dalam 1 dimensi sepanjang arah LOS sistem radar yang terdiri dari komponen perpindahan vertikal, *northing* dan *easting*. Hal ini dikarenakan keterbatasan informasi yang ada pada data SAR, yaitu dari perbedaan sudut pandang (*incidence angle*) dan juga orbit di periode waktu yang sama, sedangkan data GPS berupa *vertical displacement* atau 3D. Hasil konversi dan perbandingan *displacement* antara keduanya ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Nilai *Displacement* Data SAR dengan GPS Konversi

Stasiun	<i>Displacement SAR</i> (mm/tahun)	<i>Displacement GPS</i> (mm/tahun)	Nilai Residu (mm/tahun)
BM02	3,426	3,395	0,031
BM08	16,125	17,733	1,608
BM24	-6,878	-7,830	0,952
BM29	-6,887	-7,981	1,094
BM33	5,297	-13,580	18,877
BSBY	8,110	-7,990	16,100
KJRN	0,458	0,570	0,112
RNKT	-4,371	-5,268	0,897
SBL1	-2,423	-1,850	0,573
SBY3	-2,693	-2,090	0,603
SBY7	-16,207	-16,426	0,219
WARU	-2,616	-2,210	0,406
WONO	3,426	3,395	0,031

Dari hasil perbandingan pada Tabel 3, dapat dianalisis bahwa terdapat perbedaan nilai antara data SAR dengan data GPS hasil konversi pada titik

BM33 dan BSBY, dimana titik BM33 pada data SAR mengalami *uplift* sedangkan pada data GPS mengalami *subsidence*.

Hal ini dapat dianalisis bahwa efek atmosfer terhadap hasil pengolahan PS-InSAR belum hilang sepenuhnya. Pengaruh atmosfer yang sangat memengaruhi hasil PS-InSAR adalah akibat efek troposfer (Bui dkk., 2020). Efek troposfer yang merambat pada gelombang elektromagnetik akan mengakibatkan keterlambatan fase yang akan berpengaruh terhadap penentuan nilai jarak (Hooper dkk., 2004).

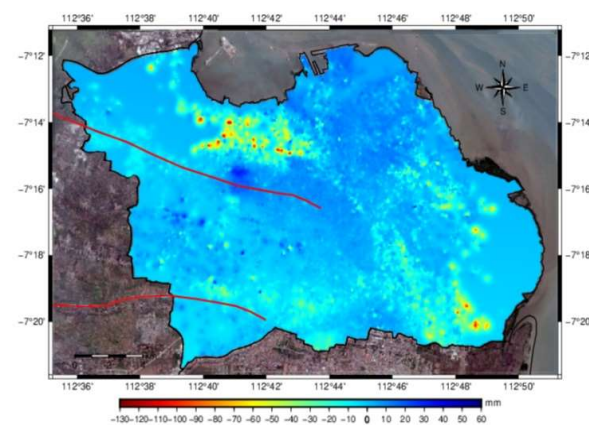
Namun, berdasarkan hasil validasi ke 12 titik lainnya memiliki nilai residu yang kecil, hal ini dapat dianalisis bahwa metode PS-InSAR dapat digunakan dalam pengamatan deformasi seperti pengamatan GPS. Terkait perbedaan nilai yang ditunjukkan oleh nilai residu di atas, hal tersebut dikarenakan perbedaan metode dan data yang digunakan dalam pengolahan data SAR dan GPS.

#### Analisis Deformasi Hubungannya dengan Kondisi Geologi dan Sesar Kendeng

Seperti yang telah diketahui, Kota Surabaya dilalui oleh bentangan Sesar Kendeng yang aktif, yaitu Segmen Waru dan Surabaya. Berdasarkan kondisi geologi, mayoritas piksel-piksel yang menunjukkan *land subsidence* terletak di area yang didominasi oleh tanah *alluvial*. *Alluvial* merupakan tanah endapan yang terbentuk dari pasir halus dan lumpur yang mengalami erosi tanah. Tanah *alluvial* banyak ditemukan di daerah dataran rendah, rawa-rawa, lembah, di sekitar muara sungai, maupun di kanan kiri aliran sungai besar. Jenis tanah ini masih dalam proses kompaksi dan konsolidasi, apabila terdapat beban bangunan-bangunan tinggi atau area padat permukiman ini akan menimbulkan turunnya permukaan tanah di kawasan tersebut.

Berdasarkan analisis yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya, titik yang mengalami penurunan tanah tersebut terletak di daratan *alluvial*. Sedangkan, kenaikan tanah sebagian besar terjadi di sepanjang formasi Kalipucang, Lidah, dan Pucangan. Rata-rata kenaikan muka tanah yang terjadi di beberapa formasi ini mencapai +20 mm/tahun, kenaikan muka tanah paling besar terjadi di area

yang berada pada formasi Pucangan, tepatnya di Kelurahan Lontar, Kecamatan Lakarsantri. Rata-rata kecepatan deformasi hasil pengolahan menunjukkan adanya perbedaan pola di antara daratan yang dilewati oleh garis sesar. Di sebelah utara garis sesar segmen Surabaya (Surabaya Utara), menunjukkan deformasi vertikal berupa penurunan muka tanah, sedangkan di sebelah garis sesar segmen Surabaya (Surabaya Barat) menunjukkan deformasi vertikal berupa kenaikan muka tanah. Jika dikorelasikan baik dari segi ilmu geodesi, geofisika, dan geologi, hal ini disebabkan oleh adanya pergerakan yang berasal dari dalam inti bumi sehingga menyebabkan posisi suatu wilayah yang berada di permukaannya dapat berubah atau berpindah.



Gambar 6. Peta Deformasi Kota Surabaya

Pada Gambar 6, kotak merah menunjukkan daerah *uplift* terbesar, sehingga tampak jelas adanya perubahan pola deformasi diantara dua wilayah (Surabaya Utara dan Surabaya Barat) yang dilewati oleh garis sesar Kendeng. Pola penurunan tanah terjadi pada rentang 0 sampai -50 mm/th, kemudian saat melewati sesar Kendeng terjadi kenaikan muka tanah mulai 0 sampai +20 mm/th. Dari nilai tersebut untuk mengindikasikan bahwa sesar Kendeng dalam kondisi aktif, diperlukan pengolahan data lebih lanjut untuk menghilangkan pengaruh deformasi yang disebabkan selain dari aktivitas sesar, sehingga nantinya dapat diketahui seberapa besar aktivitas dan jenis sesar apakah *locked fault* atau *creeping fault*. Jika sesar Kendeng termasuk dalam *locked fault*, maka potensial gempa akan lebih besar dari pada estimasi yang diperhitungkan sebelumnya,



sedangkan jika *creeping fault*, maka sebaiknya menghindari pembangunan infrastruktur di sepanjang sesar (Anjasmara dkk., 2018).

## PENUTUP

### Simpulan dan Saran

PS-InSAR merupakan metode yang efisien untuk memantau deformasi, khususnya di daerah perkotaan. Berdasarkan nilai residual dari hasil validasi antara *LOS displacement* dan *vertical displacement* dapat disimpulkan bahwa hasil PS-InSAR sesuai dengan data GPS.

Dari analisis PS-InSAR, menunjukkan sebagian besar penurunan permukaan tanah (*subsidence*) terjadi di bagian Surabaya Utara (Asemrowo dan Morokrengan) dan Timur (Kenjeran, Sukolilo, dan Gunung Anyar Tambak) dengan *velocity* penurunan rata-rata sebesar 50 mm/tahun. Sedangkan di bagian Surabaya Barat yang dilewati oleh Sesar Kendeng mengalami kenaikan muka tanah (*uplift*) dengan *velocity* kenaikan rata-rata sebesar 20 mm/tahun. Berdasarkan data geologi, hasil pada penelitian ini sesuai dengan jenis Sesar Kendeng yaitu sesar naik, yang menyebabkan terangkatnya barisan pegunungan di selatan Jawa.

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian yang akan datang adalah:

1. Menggunakan data DEM dengan resolusi yang lebih baik untuk meningkatkan koreksi topografi ketika melakukan pengurangan fase akibat topografi.
2. Menggunakan citra SAR yang lebih sensitif terhadap tanah dan beresolusi spasial tinggi.
3. Untuk mengurangi dekorelasi temporal dan geometrik maka perlu adanya penambahan sejumlah data SAR yang lebih banyak lagi (rentang waktu pengamatan diperpanjang); dengan catatan jarak *perpendicular* tidak lebih dari 150 m.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada *European Space Agency* (ESA) yang telah menyediakan data Sentinel-1A dan SARProz yang telah memfasilitasi penulis dalam

penggunaan *software* pengolahan PS-InSAR. Penelitian ini didukung oleh Laboratorium Geodinamika dan Lingkungan, Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anjasmara, I.M., Mauradhia, A., dan Susilo (2019), "Surface Deformation and Earthquake Potential in Surabaya from GPS Campaigns Data", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol.389, hal. 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/389/1/012032>.
- Anjasmara, I.M., Yulyta, S., Cahyadi, M.N., Khomsin, K., Taufik, M. dan Jaelani, L. (2018), *Land Subsidence Analysis in Surabaya Urban Area Using Time Series InSAR Method*, hal. 020071, <http://doi.org/10.1063/1.5047356>.
- Anjasmara, I.M., Yusufania, M., Kurniawan, A., Resmi, A.L.C. dan Kurniawan, R. (2017), "Analysing Surface Deformation in Surabaya from Sentinel-1A Data Using DInSAR Method", *AIP Conference Proceedings*, Vol.1857, No.1, hal. 100013. <http://doi.org/10.1063/1.4987119>.
- Badan Pusat Statistik (2018), *Jumlah Penduduk Kota Surabaya*. Diambil 17 Oktober 2019, dari <https://surabayakota.bps.go.id/dynamictable/2018/04/18/23/proyeksi-penduduk-kota%20surabaya-menurut-jenis-kelamin-dan-kelompok-umur-tahun-2019.html>.
- Bui, X.-N., Anh, V., Bui, L., Long, N., Le Thi Thu, H. dan Goyal, R. (2020), "Mining-Induced Land Subsidence Detection by Persistent Scatterer InSAR and Sentinel-1: Application to Phugiao Quarries, Vietnam", dalam *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland, hal. 18–38. [http://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7\\_2](http://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7_2).
- Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F. dan Moretti, S. (2006), "Permanent Scatterers for Landslide Investigations: Outcomes from The ESA-SLAM Project", *Engineering Geology*, Vol.88, No.3, hal. 200–217. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.007>.
- Farova, K., Jelének, J., Kopackova-Strnadova, V. dan Kycl, P. (2019), "Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic", *Remote Sensing*, Vol.11, hal. 2670. <http://doi.org/10.3390/rs11222670>.
- Ferretti, A., Prati, C. dan Rocca, F. (2001), "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", *IEEE Transactions*

*on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.39, No.1, hal. 8–20. <http://doi.org/10.1109/36.898661>.

Gonnuru, P. dan Kumar, S. (2018), "PsInSAR Based Land Subsidence Estimation of Burgan Oil Field Using TerraSAR-X Data", *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Vol.9, hal. 17–25. <http://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.11.003>.

Hanssen, R.F. (2001), *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Remote Sensing and Digital Image Processing, Springer Netherlands. <http://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>.

Haqqi, M.K.F., Yuwono, B.D. dan Awaluddin, M. (2015), "Survei Pendahuluan Deformasi Muka Tanah dengan Pengamatan GPS di Kabupaten Demak (Studi Kasus : Pesisir Pantai Kecamatan Sayung)", *Jurnal Geodesi Undip*, Vol.4, No.4, hal. 81–90.

Harris, A.J.L., Groeve, T.D., Garell, F. dan Carn, S.A. (2016), *Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions*, Geological Society, United Kingdom. Diambil dari <https://pubs.geoscienceworld.org/https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/2014/Detecting-Modelling-and-Responding-to-Effusive>.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. dan Kampes, B. (2004), "A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers", *Geophysical Research Letters*, Vol.31, No.23. <http://doi.org/10.1029/2004GL021737>.

Iodice, A. (2009), "A Survey of Differential SAR Interferometry for Surface Displacement Monitoring", *2009 European Radar Conference (EuRAD)*, hal. 212–214,.

Pitoko, R.A. (2016), *Apartemen di Surabaya Bertambah 2.872 Unit*. Diambil 6 September 2017, dari <https://properti.kompas.com/read/xml/2016/07/12/180000721/Apartemen.di.Surabaya.Bertambah.2.872.Unit>.

Pusat Studi Gempa Nasional (2017), *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*,.

-----