TUGAS AKHIR – RM184831

ANALISIS DEFORMASI MUKA TANAH AKIBAT MANIFESTASI GUNUNG LUMPUR DI WILAYAH CEKUNGAN JAWA TIMUR DENGAN METODE PS-INSAR

BELLA ESTI AJENG SYAHPUTRI
NRP 03311640000051

Dosen Pembimbing
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – RM184831

ANALISIS DEFORMASI MUKA TANAH AKIBAT MANIFESTASI GUNUNG LUMPUR DI WILAYAH CEKUNGAN JAWA TIMUR DENGAN METODE PS-INSAR

BELLA ESTI AJENG SYAHPUTRI
NRP 03311640000051

Dosen Pembimbing
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

FINAL ASSIGNMENT – **RM184831**

ANALYSIS OF LAND SURFACE DEFORMATION DUE TO MUD VOLCANOES MANIFESTATION IN EAST JAVA BASIN AREA WITH PS-INSAR METHOD

BELLA ESTI AJENG SYAHPUTRI
NRP 03311640000051

Supervisor
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si

GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil Engineering Planning and Earth
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

ANALISIS DEFORMASI MUKA TANAH AKIBAT MANIFESTASI GUNUNG LUMPUR DI WILAYAH CEKUNGAN JAWA TIMUR DENGAN METODE PS-INSAR

Nama Mahasiswa	:	Bella Esti Ajeng Syahputri
NRP	:	03311640000051
Departemen	:	Teknik Geomatika FTLSK – ITS
Dosen Pembimbing	:	Ira Mutiara Anjasmara ST., M.Phil., Ph.D Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si

ABSTRAK

Manifestasi gunung lumpur menyebabkan adanya perubahan bentuk permukaan bumi yang berpengaruh terhadap obyek di atasnya. Penelitian ini menyajikan hasil pengolahan dari metode teknik PS-InSAR (*Permanent Scatterer Interferometric* SAR) yang bertujuan untuk analisis pola dan nilai deformasi muka tanah akibat manifestasi gunung lumpur. Lokasi penelitian ini dilakukan di manifestasi gunung lumpur Provinsi Jawa Timur yang berada pada Cekungan Jawa Timur. Dengan menggunakan metode PS-InSAR, pengolahan data *time series* pada Citra SAR L-band ALOS PALSAR 1 tahun 2007-2009 dan C-band Sentinel 1A tahun 2015-2019 dapat diidentifikasi hingga ketelitian satuan milimeter. Dalam studi ini, teknik PS-InSAR menghasilkan PSCs untuk mengidentifikasi deformasi berdasarkan koherensi di daerah manifestasi gunung lumpur dengan pengaturan radius ± 4,5 km dari daerah penelitian. Hasil pengolahan PS-InSAR menunjukkan bahwa estimasi nilai dan pola deformasi yang terjadi pada wilayah manifestasi gunung lumpur dengan kondisi eksisting yang berada diantara permukiman dan vegetasi memiliki hasil sebaran titik PS

(*Permanent Scatterer*) yang lebih padat pada pasangan Citra ALOS PALSAR 1 daripada pasangan Citra Sentinel 1A. Hasil pengolahan Tahun 2007-2009 tidak dapat dijadikan informasi deformasi karena kurangnya ketersediaan jumlah citra sebagai syarat pengolahan metode ini, sedangkan Tahun 2015-2019 menunjukkan pada Gunung Lumpur Sidoarjo mayoritas mengalami penurunan rata-rata sebesar 5,46 mm/th, Gunung Lumpur Gununganyar mengalami kenaikan rata-rata sebesar 1,71 mm/th dan penurunan sebesar 7,08 mm/th, Gunung Lumpur Kalanganyar mayoritas mengalami kenaikan rata-rata sebesar 0,99 mm/th, Gunung Lumpur Wringinanom mengalami kenaikan rata-rata sebesar 3,37 mm/th, dan Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki mayoritas mengalami kenaikan rata-rata 2,88 mm/th. Nilai dan pola deformasi muka tanah yang dihasilkan memiliki nilai beragam sesuai dengan morfologi manifestasi gunung lumpur, kondisi geologi dan lingkungan sekitar gunung lumpur. Hasil analisis penelitian ini dapat bermanfaat sebagai bahan pertimbangan pendirian bangunan untuk wilayah sekitar manifestasi gunung lumpur di Provinsi Jawa Timur.

Kata kunci: ALOS PALSAR-1, Deformasi, Gunung Lumpur, PS-InSAR, Sentinel 1A.

ANALYSIS OF LAND SURFACE DEFORMATION DUE TO MUD VOLCANOES MANIFESTATION IN EAST JAVA BASIN AREA WITH PS-INSAR METHOD

Student's Name	:	*Bella Esti Ajeng Syahputri*
NRP	:	*03311640000051*
Department	:	*Geomatics Engineering FTLSK – ITS*
Supervisor	:	*Ira Mutiara Anjasmara ST., M.Phil., Ph.D*
		Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si

ABSTRACT

The manifestation of mud volcano change the shape of the earth's surface, it can affect the objects above it. This research presents the results of Permanent Scatterer InSAR (PS-InSAR) aim for analysis pattern and deformation value of the land surface due to the manifestation of mud volcanoes. The location of this research was carried out in the mud volcanoes manifestation in East Java Province (at East Java Basin's coverage). By using the PS-InSAR method, time series data processing on the ALOS PALSAR 1 L-band SAR image in 2007-2009 and the C-band Sentinel 1A in 2015-2019 can be identified the accuracy up to millimeters. In this study, the PS-InSAR technique produces PSCs to identify deformations based on coherence in the mud volcano manifestation area with a radius of ± 4.5 km from the study area. PS-InSAR processing results presents the estimated value and deformation patterns that occur in the mud volcano manifestation area with the existing conditions that are between settlements and vegetation have the result of the distribution of the point PS (Permanent Scatterer) denser on ALOS PALSAR 1 image pair than

Sentinel image pair 1A. The results of processing in 2007-2009 can not be used as deformation information due to the lack of availability of the number of images as a condition of processing this method. The result in 2015-2019, Lumpur Sidoarjo in majority has velocity rate with an average of -5.46 mm/yr, Mud Volcano in Gununganyar has velocity rate with an average of +1.71 and -7.08 mm/yr, Mud Volcano in Kalanganyar has velocity rate of +0.99 mm/yr, Mud Volcano in Wringinanom has velocity rate with an average of +3.37 mm/yr, and Bujhel Tasek's Mud Volcano has velocity rate with an average of +2.88 mm/yr. This research can be useful as consideration for the construction of buildings for the area around the manifestation of the mud volcano in East Java Province.

Keywords: ALOS PALSAR-1, Deformation, Mud Volcano, PS-InSAR, Sentinel 1A.

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS DEFORMASI MUKA TANAH AKIBAT MANIFESTASI GUNUNG LUMPUR DI WILAYAH CEKUNGAN JAWA TIMUR DENGAN METODE PS-INSAR

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
BELLA ESTI AJENG SYAHPUTRI
NRP 03311640000051

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Ira Mutiara Anjasmara ST., M.Phil., Ph.D (.....)
NIP. 19781231 200212 2 001

Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si (.....)
NIP. 19591010 198803 1 002

SURABAYA, 5 AGUSTUS 2020

"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkah, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dengan judul "**Analisis Deformasi Muka Tanah Akibat Manifestasi Gunung Lumpur Di Wilayah Cekungan Jawa Timur dengan Metode PS-InSAR"** dengan baik dan tepat waktu.

Dalam penyusunan laporan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Ira Mutiara Anjasmara ST., M.Phil, Ph.D selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir di Departemen Teknik Geomatika.
2. Bapak Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir di Departemen Teknik Geofisika.
3. Seluruh Bapak Ibu dosen Teknik Geomatika FTSPK-ITS, yang telah memberikan dukungan, ilmu dan bimbingannya.
4. Saiyidinal Fikri yang telah membantu dalam pengolahan PS-InSAR dengan menggunakan *Software* SarProZ.
5. Teman-teman Departemen Teknik Geomatika ITS, khususnya angkatan 2016 atas dukungan dan semangat yang telah diberikan.
6. Serta seluruh pihak yang membantu penyusunan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penelitian ini terdapat kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran sebagai pembelajaran untuk penelitian-penelitian selanjutnya. Penulis berharap semoga penelitian ini dapat membawa manfaat bagi seluruh pembaca.

Surabaya, 5 Agustus 2020

Penulis

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
ABSTRAK v
LEMBAR PENGESAHAN ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xxiii
DAFTAR LAMPIRAN xxv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang Masalah 1
1.2 Perumusan Masalah 2
1.3 Batasan Permasalahan 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Deformasi 5
2.2 Cekungan Jawa Timur 6
2.2.1 Struktur Geologi Cekungan Jawa Timur 6
2.2.2 Fisiografi Cekungan Jawa Timur 9
2.3 Gunung Lumpur 11
2.3.1 Fenomena Gunung Lumpur di Jawa Timur 12
2.4 SAR 16
2.4.1 Sentinel-1A 17
2.4.2 ALOS PALSAR-1 24
2.5 Pemantauan Deformasi Berbasis InSAR 27
2.6 PS-InSAR dengan *Software* SARProZ 29
2.7 Penelitian Terdahulu 32
BAB III METODOLOGI 35

3.1 Lokasi Penelitian 35
3.2 Data dan Peralatan 36
3.2.1 Data 36
3.2.2 Peralatan 44
3.3 Diagram Alir Penelitian 46
3.3.1 Tahap Pengolahan PS-InSAR pada *Software* SARproZ 49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 57
4.1 Hasil Pengolahan Data PS-InSAR 57
4.1.1 Hasil *Input Dataset Selection* 57
4.1.2 Hasil *Preliminary Analysis* 62
4.1.3 Hasil InSAR 66
4.1.4 Hasil PS-InSAR 71
4.2 Hasil Nilai Dan Pola Deformasi Muka Tanah 82
4.3 Analisis Identifikasi Deformasi Akibat Fenomena Manifestasi Gunung Lumpur Berdasarkan Hasil Pengolahan PS-InSAR109
BAB V KESIMPULAN 129
5.1 Kesimpulan 129
5.2 Saran 131
DAFTAR PUSTAKA 133
LAMPIRAN 143
BIODATA PENULIS 151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lokasi geografi pada beberapa *back-arc* basin pada region cekungan 7
Gambar 2.2 Litostratigrafi penampang utara-selatan tentative pada Zona Rembang-Kendeng 8
Gambar 2.3 Peta fisiografis daerah Jawa - Madura 10
Gambar 2.4 (a) Tahapan diapir lumpur ke gunung berapi lumpur, (b) Tipe morfologi gunung berapi lumpur 12
Gambar 2.5 Distribusi lumpur diapir dan gunung berapi lumpur di Jawa ke Madura dengan peta dasar gayaberat Jawa 13
Gambar 2.6 Parameter sistem Sentinel-1 18
Gambar 2.7 Karakteristik Satelit Sentinel 1 19
Gambar 2.8 Karakteristik SM Sentinel-1 20
Gambar 2.9 Karakteristik IW Sentinel-1 20
Gambar 2.10 Karakteristik EW Sentinel-1 21
Gambar 2.11 Karakteristik WV Sentinel-1 22
Gambar 2.12 Mode Akuisisi Sentinel-1 22
Gambar 2.13 Karakteristik Satelit ALOS 25
Gambar 2.14 Mode akuisisi PALSAR 25
Gambar 2.15 Tingkat Produk tersedia per mode akuisisi 26
Gambar 2.16 Konfigurasi sistem SAR 27
Gambar 2.17 Diagram alir proses PS-InSAR dengan *Software* SARProZ 31
Gambar 3.1 Peta lokasi penelitian 35
Gambar 3.2 Perbandingan luasan *scene* antara Citra Sentinel 1A dan Citra ALOS PALSAR-1 37
Gambar 3.3 Posisi *scene* citra Sentinel-1A pada Alaska *Satellite Facility* 38

Gambar 3.4 Posisi *scene* citra Sentinel-1A pada Copernicus *Open Access Hub*.....40
Gambar 3.5 Posisi *scene* citra ALOS/PALSAR 1 pada Alaska *Satellite Facility* © JAXA/METI 2007-2009.....43
Gambar 3.6 Bagan diagram alir penelitian.....46
Gambar 3.7 Bagan diagram alir pengolahan PS-InSAR pada software SARProZ.....49
Gambar 3.8 Tampilan menu *Dataset Selection*.....50
Gambar 3.9 Tampilan menu SLC *Data Processing*.....51
Gambar 3.10 Tampilan menu *Site Processing*.....52
Gambar 3.11 Tampilan menu GCP *Selection*.....53
Gambar 3.12 Tampilan menu InSAR *Parameters*.....54
Gambar 3.13 Tampilan Menu APS *Processing*.....55
Gambar 3.14 Tampilan menu *Load Mask*.....56
Gambar 4.1 (a) *Baseline plot* pada Citra ALOS PALSAR *path* 426 *frame* 7040, (b) *Baseline plot* pada Citra ALOS PALSAR *path* 427 *frame* 7030.....58
Gambar 4.2 (a) *Baseline plot* Citra Sentinel 1A pada (a) *subswath* IW1, (b) *subswath* IW2.....59
Gambar 4.3 Peta reflektifitas hasil pasangan (a) Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040, (b) Citra Sentinel 1A pada *subswath* IW 2. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur.....63
Gambar 4.4 Peta reflektifitas hasil pasangan Citra ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur....64
Gambar 4.5 Peta reflektifitas hasil pasangan Citra Sentinel 1A pada *subswath* IW 1. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur.....65

Gambar 4.6 Contoh hasil interferogram (a) Citra ALOS PALSAR-1 pada *path* 426 *frame* 7040 dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW2 67
Gambar 4.7 Contoh hasil interferogram (a) Citra ALOS PALSAR pada *pat* 427 *frame* 7030, dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW1 67
Gambar 4.8 Contoh hasil pengolahan *phase unwrapping* (a) Citra ALOS PALSAR-1 pada *path* 426 *frame* 7040 dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW2 68
Gambar 4.9 Hasil pengolahan *phase unwrapping* (a) Citra ALOS PALSAR pada *path* 427 *frame* 7030, dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW1 69
Gambar 4.10 Contoh perbandingan koherensi citra di wilayah Pulau Madura, Jawa Timur pada (a) Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040, dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW2 70
Gambar 4.11 Contoh perbandingan koherensi citra di wilayah Jawa Timur daratan, Provinsi Jawa Timur pada (a) Citra ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 , dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW1 71
Gambar 4.12 Histogram *temporal coherence* pada proses APS *Estimation* Citra ALOS PALSAR-1 (a) *path* 426 *frame* 7040 , dan (b) *path* 427 *frame* 7030 72
Gambar 4.13 Histogram temporal coherence pada proses APS *Estimation* Citra Sentinel 1A (a) *subswath* IW2, dan (b) *subswath* IW1.....74
Gambar 4.14 Hasil Plot APS *Estimation* ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 berdasarkan titik referensi. 75
Gambar 4.15 Hasil Plot APS *Estimation* ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 berdasarkan titik referensi 75

Gambar 4.16 Hasil Plot APS *Estimation* Sentinel 1A *subswath* IW2 berdasarkan pemilihan titik referensi 76
Gambar 4.17 Hasil Plotting APS *Estimation* Sentinel 1A *subswath* IW1 berdasarkan pemilihan titik referensi 77
Gambar 4.18 Histogram *temporal coherence* pada *Multi Image Sparse Processing* Citra ALOS PALSAR (a) *path* 426 *frame* 7040 , dan (b) *path* 427 *frame* 7030 78
Gambar 4.19 Histogram *temporal coherence* pada *Multi Image Sparse Processing* Citra Sentinel 1A (a) *subswath* IW2, dan (b) *subswath* IW1 79
Gambar 4.20 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 berdasarkan titik referensi 80
Gambar 4.21 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 berdasarkan titik referensi.....80
Gambar 4.22 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* Sentinel 1A *subswath* IW2 berdasarkan titik referensi 81
Gambar 4.23 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* Sentinel 1A *subswath* IW1 berdasarkan titik referensi 81
Gambar 4.24 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 83
Gambar 4.25 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 84
Gambar 4.26 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur.....85

Gambar 4.27 Hasil plot LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 86
Gambar 4.28 Garis pola profil melintang dari Barat ke Timur pada Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 87
Gambar 4.29 Profil Melintang A ke B (Barat-Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 87
Gambar 4.30 Profil Melintang C ke D (Barat-Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 88
Gambar 4.31 Profil Melintang E ke F (Barat-Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 88
Gambar 4.32 Garis pola profil melintang dari Barat Daya ke Timur Laut pada Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 89
Gambar 4.33 Profil Melintang G ke H (Barat Daya-Timur Laut) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur 89
Gambar 4.34 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 91
Gambar 4.35 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 92
Gambar 4.36 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 93
Gambar 4.37 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 94

Gambar 4.38 Pola garis profil melintang dari Barat ke Timur dan Selatan ke Utara pada Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 95
Gambar 4.39 Profil Melintang A ke B (Selatan ke Utara) pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 95
Gambar 4.40 Profil Melintang C ke D (Barat -Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur 96
Gambar 4.41 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur 97
Gambar 4.42 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur 98
Gambar 4.43 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur 99
Gambar 4.44 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur 100
Gambar 4.45 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur 101
Gambar 4.46 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur.....102
Gambar 4.47 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur 103

Gambar 4.48 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur 104
Gambar 4.49 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur 105
Gambar 4.50 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur 106
Gambar 4.51 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur 107
Gambar 4.52 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur 108
Gambar 4.53 Penampakan Gunung Lumpur Sidoarjo melalui Google Earth pada tahun (a) 2006, dan (b) 2019 .. 112
Gambar 4.54 Peta penurunan tanah kawasan lumpur Sidoarjo dengan pengukuran GPS pada Tahun 2016 113
Gambar 4.55 Letusan LUSI awal di lima lokasi berbeda diselaraskan di sepanjang garis patahan Watukosek. Tekuk dan tebing sungai disejajarkan dengan Sistem Sesar Watukosek..... 115
Gambar 4.56 Penampang geologi yang sejalan dengan Patahan Watukosek yang melintasi kompleks cekungan busur depan dan cekungan busur belakang..... 116
Gambar 4.57 Endapan lumpur Sidoarjo dengan latar belakang pusat semburan, Gunung Penanggungan dan Gunung Arjuno 118
Gambar 4.58 Penampakan Gunung Lumpur Gununganyar melalui Google Earth pada tahun (a) 2006, dan (b) 2019 .. 119

Gambar 4.59 Titik PS pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar pada olahan (a) Citra ALOS PALSAR-1, dan (b) Citra Sentinel 1A.....119
Gambar 4.60 Gunung lumpur LUSI dan lima gunung lumpur lainnya yang diketahui berlokasi di sepanjang zona Sesar Watukosek. 121
Gambar 4.61 Patahan Watukosek menjalar dari kompleks gunung berapi Arjuno, melintasi gunung lumpur Lusi dan memanjang ke arah Timur Laut yang ditandai dengan garis putus-putus putih 122
Gambar 4.62 Penampakan Gunung Lumpur Kalanganyar melalui Google Earth pada tahun (a) 2006, dan (b) 2019 ..123
Gambar 4.63 Penampakan Gunung Lumpur Wringinanom melalui Google Earth pada tahun (a) 2005, dan (b) 2019 ..124
Gambar 4.64 Peta Geologi wilayah manifestasi Gunung Lumpur Pulau Jawa, Jawa Timur.....124
Gambar 4.65 *Updating* sesar aktif di Pulau Jawa bagian tengah-timur.....126
Gambar 4.66 Penampakan Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Bujhel Tasek Laki melalui Google Earth pada tahun (a) 2011, dan (b) 2019.....127
Gambar 4.67 Peta Geologi wilayah manifestasi Gunung Lumpur Pulau Madura, Jawa Timur 127

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Stratigrafi subdivisi Zona Kendeng dan Rembang.....9
Tabel 3.1 Manifestasi gunung lumpur pada provinsi Jawa Timur 36
Tabel 3.2 Data akuisisi Citra satelit Sentinel-1A pada wilayah semburan gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2015-2016 38
Tabel 3.3 Data akuisisi Citra satelit Sentinel-1A pada wilayah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2017-2019 40
Tabel 3.4 Data akuisisi Citra satelit ALOS/PALSAR 1 pada wilayah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2006-2011 43
Tabel 4.1 Data akuisisi slave Citra satelit ALOS/PALSAR 1.....58
Tabel 4.2 Data akuisisi slave Citra Sentinel 1A subswath IW 1 .60
Tabel 4.3 Data akuisisi slave Citra Sentinel 1A subswath IW 2 .60
Tabel 4.4 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS Displacement pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo90
Tabel 4.5 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar.....96
Tabel 4.6 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar 100
Tabel 4.7 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom 104

Tabel 4.8 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki.....108
Tabel 4.9 Hasil pengolahan InSAR pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Shirzaei dkk. (2015).....110
Tabel 4.10 Hasil pengolahan InSAR pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Yulyta dkk. (2015).....110
Tabel 4.11 Hasil pengolahan InSAR pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Fukushima dkk. (2009).....111
Tabel 4.12 Hasil pengolahan GPS pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Sudarsono, Hariyanto, dan Kurniawan (2017).....113

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 143
Lampiran 2. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 143
Lampiran 3. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan Sentinel 1A *subswath* IW 1 144
Lampiran 4. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan Sentinel 1A *subswath* IW 2 145
Lampiran 5. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 pada wilayah Pulau Madura, Jawa Timur 147
Lampiran 6. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 pada wilayah Pulau Jawa, Jawa Timur 147
Lampiran 7. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi Sentinel 1A *subswath* IW 1 pada wilayah Pulau Jawa, Jawa Timur 148
Lampiran 8. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi Sentinel 1A *subswath* IW 2 pada wilayah Pulau Madura, Jawa Timur 149
Lampiran 9 Peta lokasi penelitian 150

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Menurut Milkov (2003), sekitar 1.100 gunung lumpur telah didokumentasikan di darat dan di perairan dangkal di landas kontinen, dan beberapa gunung lumpur tersebar di lereng benua dan dataran abyssal. Adanya studi tentang gunung lumpur penting dilakukan untuk berbagai tujuan, seperti indikator sistem perminyakan aktif, sumber metana di atmosfer dan laut, serta geohazard. Kasus di seluruh dunia menunjukkan bahwa diapirisme dan vulkanisme lumpur memiliki hubungan dekat dengan minyak bumi. Hal ini memiliki kesamaan kasus dengan gunung lumpur di Jawa dan Madura. Rembesan minyak, gas dan lapangan pengeboran ditemukan dan diproduksi di bagian timur Zona Bogor, Zona Serayu Utara. Dan Zona Rembang-Kendeng. Zona Rembang-Kendeng merupakan bagian dari Cekungan Jawa Timur, zona tersebut merupakan salah satu daerah perminyakan tertua dan terkaya di Indonesia.

Selain penghasil minyak bumi dan gas, fenomena ekstrusi gunung lumpur juga mengeluarkan air dan lumpur,serta mengubah bentuk permukaan bumi (*ground deformation*). Perubahan bentuk permukaan bumi berpengaruh terhadap obyek yang ada di atasnya seperti struktur bangunan dan utilitas sehingga penting untuk dilakukan pemantauan. Adapun beberapa penelitian telah dilakukan terkait dengan deformasi permukaan bumi, seperti Abidin dkk. (2008) dan Fukushima dkk. (2009). Kedua penelitian tersebut membahas perubahan permukaan dari data yang diperoleh dari metode pengamatan *Global Positioning System* (GPS) dan *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR). Teknik InSAR mampu mendeteksi perubahan permukaan bumi dengan memanfaatkan beda fase gelombang elektromagnetik yang direkam pada dua waktu pengamatan yang berbeda. Data yang dapat digunakan dengan teknik ini salah satunya adalah satelit radar. Pemilihan metode PS-InSAR merupakan metode terbaru

pengolahan citra radar yang memberikan akurasi yang baik dan meminimalkan efek dekorelasi temporal.

Metode PS-InSAR dapat digunakan untuk mengukur pergerakan kecil pada suatu wilayah dari waktu ke waktu dengan akurasi mencapai milimeter. Meskipun metode ekstraterestris memiliki ketelitian yang masih di bawah metode terestris, namun metode PS-InSAR mampu melakukan pengamatan dan penilaian pada daerah yang luas dengan waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan metode terestris. Dengan demikian PS-InSAR dapat diterapkan di berbagai bidang, baik untuk penelitian ilmiah, penilaian resiko, serta pemantauan, terutama untuk aplikasi pemantauan *land subsidence* (Iodice dkk. 2009). Metode ini dapat diaplikasikan pada penelitian deformasi muka tanah akibat manifestasi gunung lumpur yang terjadi di Cekungan Jawa Timur.

1.2 Perumusan Masalah

Dengan memperhatikan latar belakang penelitian diatas, maka dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

a. Bagaimana pemrosesan data pada Citra Sentinel 1A dan ALOS PALSAR dengan menggunakan teknik PS-InSAR?
b. Bagaimana hasil nilai dan pola deformasi muka tanah akibat manifestasi gunung lumpur pada Wilayah Cekungan Jawa Timur?
c. Bagaimana cara mengidentifikasi deformasi akibat fenomena manifestasi gunung lumpur hasil pengolahan PS-InSAR?

1.3 Batasan Permasalahan

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Penelitian mengambil studi kasus pada manifestasi gunung lumpur di Provinsi Jawa Timur yang berada pada Wilayah Cekungan Jawa Timur
b. Data yang digunakan adalah Citra Satelit Sentinel-1A dan ALOS PALSAR 1

c. Metode geodetik yang digunakan yaitu PS-InSAR (*Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar)*
d. Hasil akhir penelitian disajikan dalam nilai rata-rata laju kecepatan deformasi secara *Line of Sight* (LOS)

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Mengetahui pemrosesan PS-InSAR pada Citra Sentinel 1A dan ALOS PALSAR 1.
b. Mengetahui estimasi laju kenaikan dan penurunan tanah, serta pola sebaran dan besaran estimasi nilai deformasi di Wilayah Cekungan Jawa Timur.
c. Dapat mengidentifikasi hasil pengolahan PS-InSAR terhadap deformasi akibat manifestasi gunung lumpur yang terjadi di Provinsi Jawa Timur yang berada pada Wilayah Cekungan Jawa Timur.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diberikan dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah untuk:

a. Memperoleh variasi metode yang digunakan dalam mengamati dan menilai deformasi muka tanah di Wilayah Cekungan Jawa Timur (*East Java Basin*) menggunakan metode PS-InSAR dengan analisa hasil dua citra.
b. Hasil produk dari pengolahan ini dapat digunakan sebagai data pembanding untuk penelitian mengenai deformasi selanjutnya.

"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Deformasi

Deformasi dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif yang salah satu penyebabnya adalah pergerakan lempeng bumi. Suatu titik dikatakan bergerak absolut apabila terdapat perubahan gerakan dari titik itu sendiri dan suatu titik dikatakan bergerak relatif apabila gerakan titik itu dilihat dari referensi titik lain. Perubahan kedudukan ini mengacu pada suatu sistem koordinat referensi yang digunakan. Menurut Islami (2017), Terdapat empat arah gaya yang menyebabkan batuan terdeformasi, yaitu *confining stress, tensional stress, compressional stress* dan *shear stress.* Struktur batuan sekunder terjadi pada batuan akibat adanya stress (seperti kompresi atau peregangan) yang dialami batuan setelah formasi aslinya. Struktur yang paling mudah diamati jika bebatuan memiliki struktur primer yang jelas, seperti lapisan stratifikasi yang dibentuk oleh episode endapan berturut-turut. Terdapat beberapa struktur sekunder seperti:

- Patahan (*Fault*)

Patahan adalah bergeser ataupun patahnya posisi formasi batuan dari posisi semula yang bisa saja diikuti dengan naiknya atau turunnya salah satu bagian batuan atau kedua dua bagian tersebut namun menghasilkan ketinggian yang tidak sama dari posisi mula mula. Patahan bisa disebabkan oleh *stress* regangan, *stress* kompresi dan *stress* geser. Terdapat beberapa jenis patahan diantaranya, yaitu :

- Patahan normal (*Normal fault*),
- Patahan terbalik (*Reverse fault*),
- Patahan thrust (*Thrust fault*),
- Patahan geser (*Slip fault*),
- Patahan oblik (*Oblique fault*)

- Lipatan (*Fold*)

Lipatan terjadi ketika formasi batuan diberi gaya kompresi sehingga batuan tersebut mengalami deformasi dalam bentuk terlipat. Terdapat dua jenis lipatan, yaitu :

- Antiklin (*Anticline*)

  Antiklin adalah lipatan batuan yang menggelembung keatas akibat dari gaya yang mendorong secara lateral.

- Sinklin (*Sincline*)

  Sinklin adalah lipatan yang menggelembung kearah bawah.

- Kubah (*Dome*)

Kubah merupakan akibat dari gaya dorong dari semua arah dengan arah sedikit menyudut dibawah garis horizontal sehingga batuan batuan tersebut mengalami lipatan. Kubah tidak selalu berbentuk lingkaran namun bisa saja memanjang.

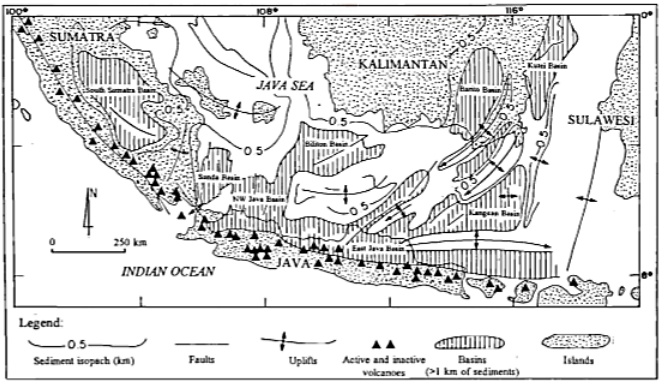
- Cekungan (*Basin*)

Cekungan merupakan akibat dari tekukan batuan yang terdorong oleh gaya lateral.

2.2 Cekungan Jawa Timur

2.2.1 Struktur Geologi Cekungan Jawa Timur

Cekungan Jawa Timur terletak di batas tenggara Paparan Sunda. Paparan tersebut berada di sebagian besar wilayah Indonesia barat dan termasuk Semenanjung Melayu, Sumatra, Kalimantan, Jawa, dan wilayah yang tertutup oleh laut di antara pulau-pulau tersebut. Cekungan Jawa Timur diklasifikasikan sebagai cekungan *retro-arc* di sebelah utara busur vulkanik aktif di Jawa Tengah (Susilohadi 1995).

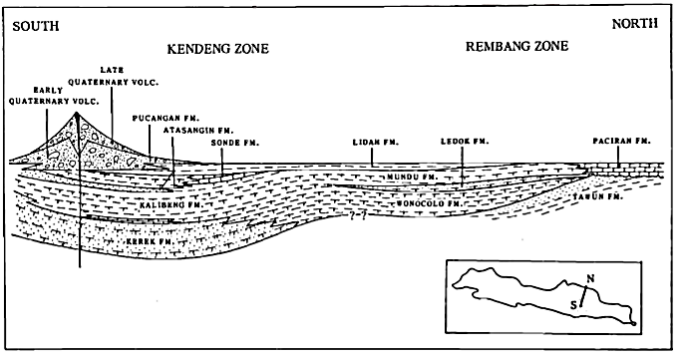


Gambar 2.1 Lokasi geografi pada beberapa *back-arc* pada region cekungan (setelah Ben-Avraham dan Emery 1973)

Banyak peneliti menyetujui bahwa tekanan yang disebabkan oleh gerakan ke utara lempeng Indian Australia menjadi penyebab atas sebagian besar deformasi struktural di Jawa Timur dan lingkungan sekitarnya (Sudiro dkk. 1973; Situmorang dkk. 1976; Bishop 1980; Baumann. 1982). Patahan adalah elemen struktural yang paling menonjol di Paparan Sunda (Ben-Avraham dan Emery 1973). Di Laut Jawa bagian timur merupakan tren patahan yang menonjol ke arah timur laut. Menurut Koesoemadinata dan Pulunggono (1971), patahan ini mungkin berasal dari patahan *dextral strike-slip*, tetapi terdapat beberapa gerakan vertikal diferensial yang terjadi.

Di Jawa timur, struktur dataran tinggi yang dominan adalah bagian timur-barat pada sepanjang garis tengah Jawa yang sejajar dengan batas lempeng. Unit litologi paling luas di Paparan Sunda selatan adalah Miosen Awal. Endapan ini diikuti oleh fase regresif di mana lumpur diendapkan di bagian yang lebih dalam dari cekungan Laut Jawa bagian barat, sementara lumpur dan batuan karbonat terakumulasi di Laut Jawa bagian timur. Fase regresif di

Laut Jawa bagian timur ini dikaitkan dengan pengangkatan dan pelipatan. Selama Plio-Pleistosen, sedimentasi laut berlanjut di Paparan Sunda dan secara bertahap mengubah morfologi cekungan menjadi dataran yang relatif datar (Ben-Avraham dan Emery 1973).



Gambar 2.1 Litostratigrafi penampang utara-selatan tentative pada Zona Rembang-Kendeng
(Susilohadi 1995)

Aktivitas magmatik di Paparan Sunda terjadi di seluruh Tersier dan Kuarter. Vulkanisme terjadi di sepanjang tepi paparan ini dan dianggap terkait dengan peristiwa tektonik besar oleh van Bemmelen (1949).

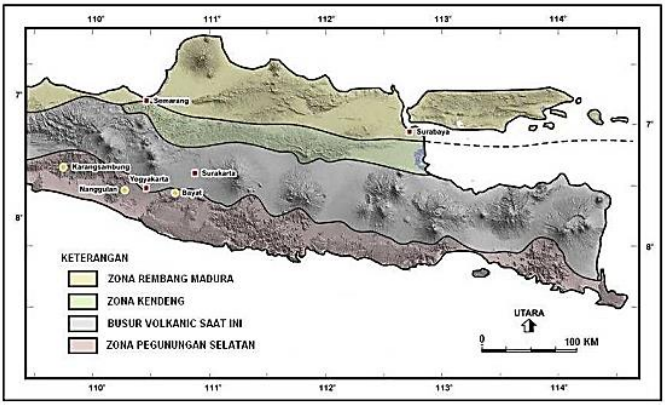
Tabel 2.1 Stratigrafi subdivisi Zona Kendeng dan Rembang (Pringgoprawiro 1983)

Umur		**Blow Zone**	**Zona Kendeng**	**Zona Rembang**	
Pleistosen		N23	Kabuh, Notopuro Formasi Pucangan	Dander Member	Formasi Paciran
		N22		Malo Member	
Pliosen		N21	Formasi Sonde	Formasi Lidah	
		N20	Klitik Member	Formasi Mundu	
		N19	Atasangin Member		
Miosen	Akhir	N18	Formasi Kalibeng	Formasi Ledok	Hiatus
		N17			
		N16	Formasi Banyak	Formasi Wonocolo	
		N15	Formasi Kerek		
	Tengah	N14		Formasi Bulu	
		N13		Ngrayong Member	
		N12			
		N11			
		N10	Formasi Pelang	Formasi Tawun	
		N9			
	Awal	N8			
		N7		Hiatus	
		N6		Formasi Tuban	
		N5			
		N4	Tidak ada singkapan	Formasi Prupuh	
Oligosen		N3			
		N2		Formasi Kujung	
		N1			
		P19			

2.2.2 Fisiografi Cekungan Jawa Timur

Van Bemmelen (1949) menggambarkan fisiografi Jawa secara terperinci, Fitur fisiografi ini sebagian besar dihasilkan dari gerakan orogenik selama Tersier dan Kuarter. Di Cekungan Jawa Timur, di mana wilayah studi berada, terdapat dua zona antiklin yang menonjol, yaitu Zona Rembang dan Kendeng. Zona

Rembang telah diakui sebagai zona kaya minyak di Jawa Timur. Zona ini terdiri dari sejumlah antiklin berarah timur-barat, bergantian dengan dataran aluvial. Zona Rembang memiliki lebar rata-rata 50 km dan ketinggian kurang dari 500 m di atas permukaan laut. Dari daerah Tuban-Paciran, lipatan menurun ke arah barat laut Purwodadi. Di beberapa tempat, Zona Rembang mengalami pengikisan sehingga memperlihatkan strata Miosen. Di bagian timur lautnya, zona ini ditandai dengan keberadaan batu kapur terumbu Plio-Pleistosen yang menutupi formasi Miosen Tengah.



Gambar 2.2 Peta fisiografis daerah Jawa - Madura
(Ngadenin, Subiantoro, dan Widana 2014)

Zona Kendeng dipisahkan dari Zona Rembang oleh depresi Zona Randublatung. Sedikit yang diketahui tentang geologi Zona Randublatung karena terbatasnya singkapan dan data sumur. Seperti di Zona Rembang, Zona Kendeng juga ditandai oleh sejumlah antiklinoria berarah timur yang terbentuk pada masa Pleistosen Tengah. Kompleksitas tinggi, lebar dan lipatan Zona Kendeng secara bertahap menurun ke arah timur, dan menghilang di bawah endapan aluvial di wilayah Mojokerto. Batas selatan

Zona Kendeng adalah depresi yang telah diisi dengan hasil vulkanik kuarter dari Zona Solo.

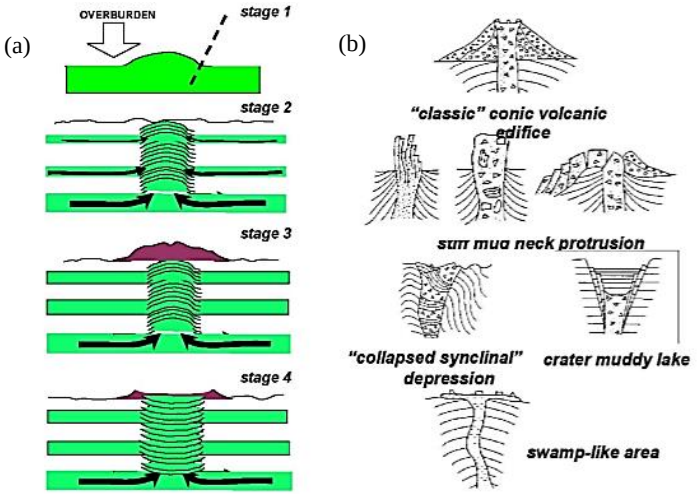
2.3 Gunung Lumpur

Gunung lumpur (*Mud Volcanoes*) adalah struktur penembus yang menunjukkan adanya pelepasan sedimen berlebih yang muncul ke atas dari bawah permukaan ke permukaan bumi karena gaya apung dan tekanan diferensial. Struktur ini terjadi di cekungan elisional (Kholodov 1983), yang ditandai oleh adanya percepatan deposisi dari sedimen muda yang tebal, adanya tekanan berlebih dari fluida, sedimen yang kurang padat, dan aliran minyak bumi yang terkompresi (Satyana dan Asnidar 2008). Istilah gunung lumpur umumnya diterapkan pada erupsi atau ekstrusi permukaan lumpur berair atau tanah liat yang hampir selalu disertai dengan gas metana, dan yang biasanya cenderung membangun lumpur padat atau endapan tanah di sekitar lubangnya yang mungkin memiliki bentuk kerucut atau seperti gunung berapi (Hedberg 1974). Gunung lumpur juga umumnya berkaitan dengan garis fraktur, patahan, atau lipatan tajam. Terdapat korelasi erat antara lumpur atau badan serpih yang kurang terkompaksi (*overpressured*), lumpur atau serpih serpih, dan semua tingkat gradasi dari satu ke yang lain (Satyana dan Asnidar 2008).

Produk ekstrusi gunung lumpur adalah lumpur tanah liat, menghubungkan air asin dan gas (terutama metana). Lumpur didorong ke atas oleh gaya apung yang timbul dari kontras kerapatan ruah antara massa berlumpur berlebih dan lapisan padat dengan kepadatan lebih besar. Asal-usul pada dasarnya sama yaitu berkaitan dengan faktor-faktor dalam sistem elisional. Morfologi permukaan gunung berapi lumpur meliputi daerah seperti rawa, danau berlumpur kawah, bangunan kerucut klasik, dan depresi *synclinal* yang runtuh (Milkov 2000),. Menurut Satyana dan

Asnidar (2008), tahap pengembangan diapir lumpur ke gunung berapi lumpur meliputi :

- Tahap 1: Fase embrionik,
- Tahap 2: Fase diapirik,
- Tahap 3: Fase letusan gunung lumpur,
- Tahap 4: Fase pasca erupsi / runtuh.

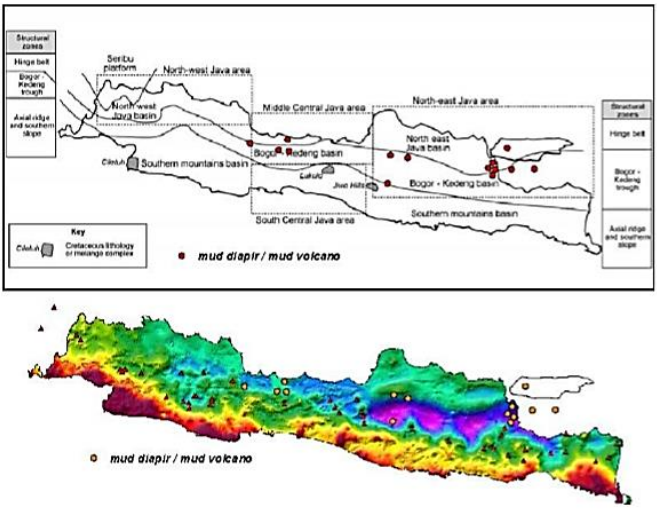


Gambar 2.3 (a) Tahapan diapir lumpur ke gunung berapi lumpur, (b) Tipe morfologi gunung berapi lumpur
(Satyana dan Asnidar 2008)

2.3.1 Fenomena Gunung Lumpur di Jawa Timur

Pulau Jawa terbentuk dari kumpulan batu yang terkait dengan margin konvergensi aktif lempeng. Pulau ini terdiri dari kompleks busur *plutonicvolcanic*, prisma akresi, zona subduksi, dan batuan sedimen terkait (Satyana dan Armandita 2004). Di Jawa, minyak bumi telah ditemukan dan diproduksi selama lebih dari 100 tahun di daerah-daerah diapir dan gunung lumpur.

Rembesan minyak, gas, dan lapangan pengeboran telah ditemukan dan diproduksi di bagian timur Zona Bogor, Zona Serayu Utara, dan Zona Rembang-Kendeng. Zona Rembang-Kendeng merupakan bagian dari Cekungan Jawa Timur. Zona tersebut termasuk dalam salah satu daerah perminyakan tertua dan terkaya di Indonesia. Penemuan dan produksi minyak bumi baru-baru ini juga terjadi di Selat Madura (Satyana dan Asnidar 2008).



Gambar 2.4 Distribusi lumpur diapir dan gunung berapi lumpur di Jawa ke Madura dengan peta dasar gayaberat Jawa (Satyana dan Asnidar 2008)

Diapir lumpur dan gunung lumpur memiliki hubungan spasial dan genetik dengan minyak bumi. Minyak dan gas merembes dan memproduksi ke tempat yang sama dengan lumpur diapir dan gunung berapi lumpur di Zona Selat Bogor-Serayu-Kendeng-Madura Utara. Diapirisme lumpur dan vulkanisme lumpur dianggap menyiratkan sistem perminyakan, terutama dalam pematangan batuan sumber yang menghasilkan minyak

bumi, pembentukan kemiringan dan patahan struktural untuk migrasi minyak bumi dan menghasilkan perangkap struktural diapirik pada horizon dangkal (Satyana dan Asnidar 2008).

Diapir lumpur dan gunung lumpur ditemukan di Cekungan Jawa Timur. LUSI adalah salah satu dari banyak gunung lumpur di bagian timur Zona Kendeng. Gunung berapi lumpur lain yang dikenal dekat dengan LUSI (bervariasi aktif, punah, atau tidak aktif) adalah Porong, Kalang Anyar (Sidoarjo), Gununganyar (Surabaya), Socah (Bangkalan-Madura), Wringinanom (perbatasan Gresik-Mojokerto), Semolowaru, Pulungan, dan Sedati (Sidoarjo). Berdasarkan kronik sejarah, cerita rakyat, dan data geologi menguraikan keberadaan kompleks gunung lumpur meletus pada masa sejarah selama periode Jenggala dan Kerajaan Majapahit di Indonesia (abad ke-12 hingga 15). Hal tersebut mengindikasikan keberadaan gunung lumpur di periode ini di zona yang disebut Tunggorono - Jombatan - Segunung - Canggu - Bangsal di Jombang-Tarik, sebagian besar di daerah Sidoarjo, sepanjang 25 km (Satyana 2007).

Zona Kendeng adalah salah satu fitur tektonik termuda di wilayah Jawa timur. Zona tersebut terbentuk hampir pada awal hingga akhir Pliosen (Lunt dkk. 1996). Zona tersebut adalah bagian dari cekungan yang terus menerus merosot dari Miosen ke ujung Pleistosen tengah. Miosen akhir dan sedimen tua di Zona Kendeng biasanya tebal yang tersusun dari batulempung dan pasir vulkaniklastik. Batuan dan batu kapur dari Formasi Kalibeng Bawah dan Atas diendapkan di hampir seluruh lingkungan laut selama Pliosen. Pada saat itu, aktivitas vulkanik mungkin dimulai pada busur vulkanik ke selatan (gunung berapi Wilis dan Lawu). Kegiatan ini mempengaruhi bagian barat Zona Kendeng Timur pada permulaan Pleistosen, dimana sedimen vulkaniklastik Pucangan Pleistosen awal berada di atas Kalibeng Atas. Selama

Pleistosen awal, lempung biru laut Pucangan diendapkan di timur di mana endapan vulkanik akhirnya terbentuk (Duyfjes 1936). Bahan vulkanik awalnya disimpan di lingkungan laut di barat, tetapi mengisi cekungan dengan sangat cepat, sehingga input sedimen di dekat pusat vulkanik melebihi akomodasi. Di bagian timur, di mana sedimen vulkanik tiba dan input vulkaniklastik tidak cukup untuk mengisi cekungan sampai Pliosen akhir.

Depresi/Zona Kendeng adalah cekungan elisional terbaik di Indonesia, oleh karena itu banyak lumpur diapir dan gunung lumpur terjadi pada zona tersebut. Fitur tektonik muda, cekungan surut, terkompresi, sedimen muda yang sangat tebal diendapkan dengan cepat dalam periode yang relatif singkat, dan secara termal signifikan karena busur vulkanik terdekat membuat Depresi Kendeng menjadi elisional. Laju sedimentasi yang tinggi dimulai selama Miosen Atas - Waktu Pliosen Awal yang menyebabkan pengendapan suksesi sedimen yang sangat tebal. Tanah liat dan sedimen lumpur diselingi dengan hamparan pasir mengandung banyak cairan. Adanya sedimen berlebih, suksesi serpihan plastik yang kurang padat yang mendasari lapisan yang lebih padat dan jenuh dengan cairan, dan aktivitas tektonik yang tinggi mendukung diapir lumpur dan pengembangan gunung lumpur di wilayah tersebut. Diapirisme lumpur dan vulkanisme lumpur tampaknya memainkan peran penting dalam geologi regional di wilayah tersebut, serta pembentukan lipatan pada kedalaman yang dangkal. Bagian seismik menunjukkan bahwa banyak lipatan di Zona Kendeng diintegrasikan oleh diapir.

Dari segi morfologi, gunung lumpur LUSI adalah jenis kombinasi antara daerah rawa dan danau berlumpur kawah. Ini jelas tahap-3 pengembangan (pada fase erupsi). Jenis morfologi yang serupa ditunjukkan oleh gunung berapi lumpur Kalanganyar. Sedangkan gunung lumpur Pulungan, Gununganyar, dan Socah

menunjukkan morfologi bangunan vulkanik berbentuk kerucut klasik. Tahapan gunung api lumpur tersebut yaitu Kalang Anyar (dorman, stage 3 hingga 4), Pulungan (punah –tingkat 4), Gunung Anyar (punah -tingkat 4), Gresik (dorman-panggung 3), Socah (dorman - tahap 3 hingga 4), Porong (punah - tahap 4) (Satyana dan Asnidar 2008).

2.4 SAR

Menurut Zalite dan Voormansik (2016), *Synthetic Aperture Radar* (SAR) adalah sistem penginderaan jauh pencitraan gelombang mikro yang aktif, koheren, dan dapat dipasang pada platform yang berada di udara atau platform pesawat ruang angkasa. Untuk platform pesawat ruang angkasa, terdapat empat istilah yang disebutkan dalam definisi SAR agar dapat memahami prinsip-prinsip SAR yaitu sebagai berikut :

- *Imaging*

  Sistem pencitraan membentuk gambar digital dari area yang diamati. Hal ini memberikan informasi bagaimana sinyal yang direkam bervariasi dalam ruang, tidak hanya dalam kekuatan perekaman.

- *Active*

  Sistem SAR membawa penerangannya sendiri, yaitu antena yang berfungsi sebagai pemancar dan penerima. Hasil dari konfigurasi seperti itu adalah bahwa SAR dapat memberikan gambar yang baik tanpa adanya sinar matahari.

- *Coherent*

  Sistem yang koheren dapat merekam tidak hanya amplitudo dari sinyal yang diterima tetapi juga fase. Dengan demikian, piksel dalam gambar SAR dapat berisi informasi tentang kekuatan sinyal serta fase tersebut.

- *Microwave*

SAR beroperasi dalam domain gelombang mikro, yaitu menggunakan panjang gelombang dari ≈1 cm hingga ≈1 m. Manfaat langsung menggunakan gelombang mikro adalah sinyal dapat menembus awan (memberikan gambar yang tidak tergantung cuaca) dan media lainnya, seperti vegetasi.

2.4.1 Sentinel-1A

Sentinel-1 adalah konstelasi satelit Program Copernicus yang dilakukan oleh *European Space Agency*. Misi ini terdiri dari konstelasi dua satelit, Sentinel-1A dan Sentinel-1B, yang memiliki bidang orbit yang sama. Sentinel- 1A adalah satelit radar pencitraan Eropa yang diluncurkan pada 2014, sedangkan Sentinel-1B diluncurkan pada 25 April 2016. Instrumen *Synthetic Aperture Radar* (SAR) adalah instrumen utama yang dibawa oleh pesawat ruang angkasa Sentinel-1. Instrumen ini beroperasi di C-Band dengan polarisasi horizontal dan vertikal dan didasarkan pada antena *array planar* yang dapat digunakan yang membawa Modul Transmit / *Receive*. Antena ini memiliki fasilitas *azimuth* dan *steering beam* elevasi, yang memungkinkan akuisisi data SAR dalam empat mode berbeda, sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu.

System Parameter	Value
Radar Carrier Frequency	5.405 GHz
RF Peak Power	4.141 kW
Incidence Angle Range	20°-46°
Look direction	Right

System Parameter	Value
Antenna Length	12.3 m
Azimuth Beam Width	0.23°
Azimuth Beam Steering Range	-0.9° to +0.9°
Antenna width	0.82 m
Elevation Beam Width	3.43°
Elevation Beam Steering Range	-13.0° to +12.3°
Maximum Range Bandwidth	100 MHz
Pulse Repetition Frequency (PRF) Range	1000 Hz - 3000 Hz
Polarisation Options	Single (HH, VV) Dual (HH+HV, VV+VH)
Attitude Steering	Zero-Doppler Steering and Roll Steering

Gambar 2.5 Parameter sistem Sentinel-1
(Aulard-Macler 2012)

Adapun kegunaan dari Citra Sentinel-1 yaitu dapat memantau zona es laut dan lingkungan kutub, pemetaan dalam mendukung bantuan kemanusiaan dalam situasi krisis, pengawasan lingkungan laut, memantau risiko gerakan permukaan tanah, dan pemetaan permukaan tanah: hutan, air dan tanah, pertanian (ESA 2012).

Lifetime	7 years (consumables for 12 years)
Orbit	Near-polar Sun-synchronous orbit at 693 km altitude; 12-day repeat cycle; 175 orbits per cycle
Mean local solar time	18:00 at ascending node
Orbital period	98.6 min
Maximum eclipse duration	19 min
Attitude stabilisation	3-axis stabilised
Attitude accuracy	0.01° (each axis)
Instrument	Right looking with respect to the flight direction
Steering	Zero Doppler yaw steering and roll steering (–0.8° to +0.8°)
Attitude profile	Geocentric and geodetic
Orbit knowledge	10 m (each axis, 3σ) using GPS
Operative autonomy	96 h
Launch mass	2300 kg (including 130 kg mono-propellant fuel)
Dimensions (stowed)	3900 × 2600 × 2500 mm
Solar array average power	5900 W (end-of-life)
Battery capacity	324 Ah
Satellite availability	0.998
S-band TT&C data rates	64 kbit/s telecommand; 128 kbit/s – 2 Mbit/s telemetry (programmable)
X-band downlink data rate	2 × 260 Mbit/s
Launcher	Soyuz from Kourou

Gambar 2.6 Karakteristik Satelit Sentinel 1
(ESA 2012)

2.4.1.1 Mode akuisisi Sentinel-1

Sentinel-1 SAR dapat dioperasikan dalam salah satu dari empat mode akuisisi, yaitu :

- *Stripmap Mode* (SM)

  Mode SM Sentinel-1 adalah mode pencitraan stripmap SAR standar, di mana petak tanah diterangi dengan urutan pulsa kontinu sedangkan berkas antena menunjuk ke sudut azimut tetap dan sekitar tetap. sudut *off-nadir*. Hal ini menghasilkan strip gambar dengan kualitas gambar sepanjang lintasan kontinu pada sudut datang yang konstan.

Parameter	Value
Minimum Ground Swath Width	80 km
Incidence Angle Range	18.3°-46.8°
Number of Elevation Beams	6
Azimuth resolution	5.0 m
Ground Range Resolution	5.0 m
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)

Gambar 2.7 Karakteristik SM Sentinel-1
(Aulard-Macler 2012)

- *Interferometric Wide Swath Mode* (IW)

  Mode Sentinel-1 IW memperoleh data dari petak lebar (terdiri dari 3 sub-petak), dengan mengorbankan resolusi, menggunakan teknik pencitraan TOPSAR. Pencitraan TOPSAR adalah bentuk pencitraan ScanSAR (berkas antena dialihkan secara siklis di antara tiga sub-petak, di mana untuk setiap lompatan, balok dikemudikan secara elektronik dari belakang ke depan dalam arah azimuth. Hal ini menyebabkan tingkat NESZ dan ambiguitas yang seragam dalam semburan pemindaian, menghasilkan gambar berkualitas lebih tinggi.

Parameter	Value
Minimum Ground Swath Width	250 km
Incidence Angle Range	29.1°-46.0°
Number of Sub-swath	3
Azimuth Steering Angle	± 0.6°
Azimuth Resolution	20 m
Ground Range Resolution	5 m
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)

Gambar 2.8 Karakteristik IW Sentinel-1
(Aulard-Macler 2012)

- *Extra Wide Swath Mode* (EW)

  Mode EW menggunakan teknik pencitraan TOPSAR yang menyediakan cakupan petak yang sangat besar (diperoleh dari pencitraan 5 sub-petak) dengan mengorbankan pengurangan lebih lanjut dalam resolusi. Seperti mode IW, mode EW adalah mode sapuan tunggal TOPSAR.

Parameter	Value
Minimum Ground Swath Width	400 km
Incidence Angle Range	18.9°-47.0°
Number of Sub-swath	5
Azimuth Steering Angle	± 0.8°
Azimuth Resolution	40 m
Ground Range Resolution	20 m
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)

Gambar 2.9 Karakteristik EW Sentinel-1
(Aulard-Macler 2012)

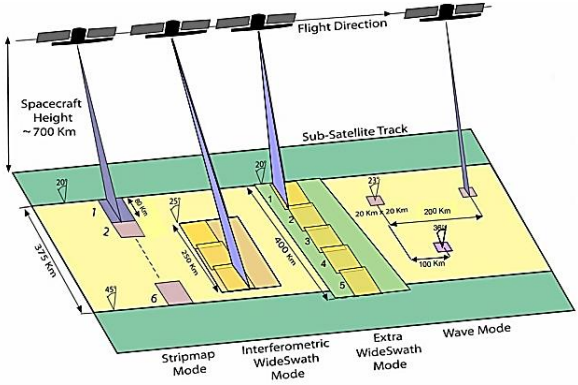
- *Wave Mode* (WV)

  Mode WV terletak pada interval reguler 100 km di sepanjang trek, mirip dengan mode pencitraan gelombang ERS dan ENVISAT ASAR. Sub-sampling ini memungkinkan menghasilkan volume data rendah. Sketsa diperoleh dalam mode '*leap frog*', yaitu satu sketsa diperoleh pada sudut kejadian jarak dekat sementara sketsa berikutnya diperoleh pada sudut insiden jarak jauh. Mode WV memungkinkan pengambilan sampel data volume rendah dari area yang luas, dirancang khusus untuk aplikasi laut.

Parameter	Value
Vignette ground coverage	20 km x 20 km
Along Track Distance between Vignettes	100 km
Incidence Angle Range	21.6 – 25.1 and 34.8 – 38.0
Number of elevation beams	2
Azimuth Resolution	5.0 m
Ground Range Resolution	5.0 m
Polarisation Options	Single (HH or VV)

Gambar 2.10 Karakteristik WV Sentinel-1
(Aulard-Macler 2012)

Instrumen SAR mampu beroperasi dengan siklus kerja 25 menit per orbit dalam mode akuisisi SM, IW atau EW.



Gambar 2.11 Mode Akuisisi Sentinel-1
(Aulard-Macler 2012)

2.4.1.2 Polarisasi Sentinel-1

Instrumen Sentinel-1 dapat mentransmisikan polarisasi linier horizontal (H) atau vertikal (V). Instrumen ini dapat menerima, pada dua saluran penerima yang terpisah, baik sinyal H dan V secara bersamaan. Produk-produk ko-polarisasi tunggal

diperoleh dengan mengoperasikan radar dengan polarisasi (H atau V) yang sama pada saat mengirim dan menerima. Produk polarisasi ganda diperoleh dengan mengoperasikan radar dengan satu (H atau V) polarisasi pada saat pengiriman dan keduanya secara bersamaan saat menerima. Produk polarisasi ganda disediakan dalam bentuk dua gambar yang masing-masing sesuai dengan saluran polarisasi yang berbeda (HH, VV, HV atau VH). Gambar memiliki karakteristik produk yang sama dan terdaftar bersamaan.

Untuk mode SM, IW dan EW, data dapat diperoleh dalam ko-polarisasi tunggal (HH atau VV) atau polarisasi ganda (HH + HV atau VV + VH). Untuk mode WV, hanya akuisisi data co-polarisasi tunggal yang didukung (hanya HH atau VV).

2.4.1.3 Jenis produk Sentinel-1

- L1 (*Level* 1)

  Jenis-jenis produk L1 berikut ini didefinisikan sebagai berikut :

  - *Slant Range, Single-Look Complex* (SLC)
  - *Ground Range, Multi-Look, Detected* (GRD)

  Data tambahan untuk pemrosesan produk Sentinel-1 L1 dapat dikelompokkan ke dalam kategori berikut:

  - Model Elevasi Digital
  - Parameter Prosesor L1 Parameter Data Kalibrasi
  - Parameter Instrumen
  - Informasi parameter Orbit dan Attitude

- L2 (*Level* 2)

  Untuk mode akuisisi Sentinel-1 jenis produk L2 didefinisikan sebagai berikut :

  - *Ocean SWell spectra* (OSW)
  - *Ocean WInd field* (OWI)
  - *Radial Surface VeLocity* (RVL)

Data tambahan untuk pemrosesan produk Sentinel-1 L2 dapat dikelompokkan ke dalam kategori berikut:

- Model atmosfer ECMWF
- Simulasi data *cross spectra*
- Data es laut
- *Wavewatch*3 *Stokes drift*
- Matriks Kesalahan Koefisien Eksitasi
- Parameter prosesor L2

2.4.2 ALOS PALSAR-1

The Advanced Land Observing Satellite (ALOS) diluncurkan pada 24 Januari 2005, yang merupakan proyek bersama antara JAXA dan *Resources Observation System Organization* (JAROS). ALOS memiliki tiga instrumen penginderaan jauh, yaitu Instrumen penginderaan jauh *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM) untuk pemetaan ketinggian digital, *Advanced Infrared* dan *Near Infrared Radiometer* tipe 2 (AVNIR-2) untuk pengamatan cakupan lahan yang tepat, dan *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) untuk pengamatan darat siang dan malam dan semua cuaca (European Space Agency 2007).

Item	Characteristics
Orbit	Sun synchronous, Sub recurrent
Equator pass time	~10.30 (desc.); ~22.30 (asc.)
Altitude	691.65 km
Inclination	98.16 deg.
Recurrence cycle	46 days $14+^{27}/_{46}$ rev./day; 671 rev./cycle
Orbital control	+/- 2.5 km (at equator)
GPS orbital position accuracy	1 m (off-line)
Star Tracker attitude determination accuracy	0.0002 deg (off-line) (~2.5 m on the ground)
Attitude stability	0.0004 deg/5 sec
Time accuracy (abs.)	1 ms
High-speed Solid State Recorder (HSSR)	Capacity: 96 Gbytes Data rate (max): 360 Mbps (recording) 240 Mbps (playback)
Data transmission: Ka-band antenna X-band antenna	 240 Mbps (via DRTS) 120 Mbps (direct GS down-link)
Solar Array Paddle	3 m x 22 m, 9 segments
Generated power	> 7 kW at EOL
Total weight	4000 kg

Gambar 2.12 Karakteristik Satelit ALOS
(Ichitsubo dkk. 2003)

2.4.2.1 Mode Akuisisi PALSAR

PALSAR adalah L-*band* SAR dengan antena aktif yang memberikan kemampuan *beam steering* di ketinggian, dengan tampilan geometri yang fleksibel. PALSAR dapat beroperasi dalam 5 mode data sains yang berbeda. Karakteristik utama untuk berbagai mode dirangkum dalam tabel berikut:

PALSAR ACQUISITION MODES					
	FINE BEAM SINGLE POLARISATION (FBS)	FINE BEAM DOUBLE POLARISATION(FBD)	DIRECT DOWNLINK (DSN)	ScanSAR (WB1/WB2)	POLARIMETRY (PLR)
Central Frequency	1270 MHz				
PRF	1500 - 2500 Hz (discrete stepping)				2 x FBS PRF
range Sampling Frequency	32 MHz	16 MHz	16 MHz	16 MHz (WB1)/ 32 MHz (WB2)	16 MHz
Chirp bandwidth	28 MHz	14 MHz	14 MHz	14 MHz (WB1) / 28 MHz (WB2)	14 MHz
Polarsation	HH or VV	HH/HV or VV/VH	HH or VV	HH or VV	HH/HV + VV/VH
Off-nadir angle [deg]	9.9-50.8	9.9-50.8	9.9-50.8	20.1-36.5	9.7-26.2
Incidence angle [deg]	7.9-60.0	7.9-60.0	7.9-60.0	18.0-43.3	8-30
Swath Width [Km]	40-70	40-70	40-70	250-350	20-65
Bit quantization [bits]	5	5	3 or 5	5	3 or 5
Data rate [Mbps]	240	240	120	120 or 240	240

Gambar 2.13 Mode akuisisi PALSAR
(European Space Agency 2007)

Produk PALSAR yang disediakan oleh ADEN (ALOS *Data European Node*) dihasilkan menggunakan prosesor JAXA PALSAR, terintegrasi dalam *segmen ground* ADEN. Oleh karena itu, format produk dan informasi tambahan yang disediakan dalam produk (koordinat produk, parameter kalibrasi, dan lain-lain) adalah yang ditentukan oleh JAXA.

Tingkat produk yang tersedia untuk setiap mode akuisisi PALSAR dijelaskan sebagai berikut :

Observation Mode		Processing Level			Remarks
		1.0	1.1	1.5	
Fine mode	Single polarization (FBS)	√	√	√	18 beams
	Dual polarization (FBD)	√	√	√	18 beams
Scan SAR mode	Burst mode 1 (WB1)	√	Not available	√	3 scans 4 scans 5 scans (default)
	Burst mode 2 (WB2)	√	Not available	√	3 scans 4 scans 5 scans (default)
Direct Downlink mode (DN)		√	√	√	18 beams
Polarimetry mode (PLR)		√	√	√	12 beams

Gambar 2.14 Tingkat Produk tersedia per mode akuisisi
(European Space Agency 2007)

2.4.2.2 Jenis Produk PALSAR

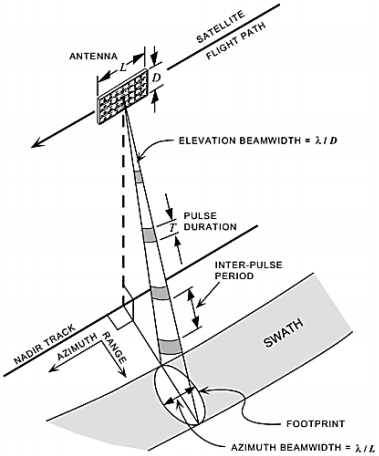
- L1.0
  - Data 1 *scene* area diekstraksi dari data yang diterima.
  - Jumlah file data SAR sama dengan jumlahnya polarisasi dalam kasus polarisasi ganda dan mode polarimetri.
  - Data dalam mode SAR SCAN tidak dibagi menjadi pemindaian individu.
  - Sesuai dengan produk data mentah yang siap jadi diproses menjadi kompleks tampilan tunggal (L1.1)
  - Tipe data: 8 bit (I) + 8 bit (Q)
- L1.1
  - Produk *Single Look Complex*.

- Disediakan dalam geometri *slant range*
- Spasi piksel alami
- Tipe data: 32 bit (I) + 32 bit (Q) (* 1)

- L1.5
  - Disediakan dalam geometri *ground range*
  - *Multi-look in range* dan azimuth.
  - Jarak piksel dapat dipilih untuk *fine mode*.
  - Lintang dan bujur dalam produk dihitungtanpa mempertimbangkan ketinggian medan tetapi berdasarkan ellipsoid GRS80.
  - 16 bit *unsigned integer* (* 2)

2.5 Pemantauan Deformasi Berbasis InSAR

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) adalah teknologi penginderaan Jauh yang menggunakan citra hasil dari satelit radar. Satelit radar memancarkan gelombang radar secara konstan, kemudian gelombang radar tersebut direkam setelah diterima kembali oleh sensor akibat dipantulkan oleh target di permukaan bumi (Augustan 2010).



Gambar 2.15 Konfigurasi sistem SAR
(Zalite dan Voormansik 2016)

Citra radar yang diperoleh dari pesawat udara maupun satelit berisi dua informasi penting. Informasi tersebut adalah daya sinar pancar berupa amplitudo dan fase yang dipengaruhi oleh banyaknya gelombang yang dipancarkan serta dipantulkan kembali. Pada saat gelombang dipancarkan dilakukan pengukuran fase. Pada citra yang diperoleh dari tiap elemen citra (piksel) akan memiliki dua informasi tersebut. Intensitas sinyal dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari obyek yang memantulkan gelombang tersebut, sedangkan fase gelombang digunakan untuk menentukan jarak dari satelit ke obyek. Dari analisis jarak tersebut dapat dibentuk model topografi (DEM) dan juga perubahan (deformasi) pada area sampai ketelitian orde cm (Augustan 2010). Sedang fase pada interferogram mengandung beberapa kontribusi yang berasal dari beberapa sumber:

$$\phi_{int} = \phi_{topo} + \phi_{defo} + \phi_{orb} + \phi_{atm} + \phi_{scat} + \phi_{noise} \qquad (2.1)$$

Dimana ϕ_{int} adalah fase interferometric, ϕ_{topo} adalah fase topografik, ϕ_{defo} adalah fase akibat deformasi dalam *Line of Sight* (LOS), ϕ_{orb} adalah fase penggepengan bumi dan residual fase dalam penentuan orbit, ϕ_{atm} adalah fase atmosferik, ϕ_{scat} adalah fase akibat adanya variasi temporal dan spasial dari dua data pengamatan, serta ϕ_{noise} adalah fase akibat faktor-faktor degradasi, seperti akibat dari *thermal noise, corregistration noise,* dan *interpolation noise.* Perbedaan fase yang muncul dalam citra interferogram adalah perbedaan fase dari sinyal LOS (*Line of Sight*).

Untuk mendapatkan orde ketelitian seperti itu, maka metode pengolahan data InSAR dilakukan dengan cara di differrensialkan. Pada metode ini digunakan beberapa pasang interferogram sekaligus untuk mendeteksi perubahan permukaan topografi dengan ketelitian yang sangat tinggi. Pola interferensi dari 2 citra (*master* dan *slave*) SAR pada daerah yang sama, diperoleh dengan cara 2 kali lintasan bergantung pada topografi yang dicitrakan.

Master adalah citra SAR yang digunakan sebagai acuan utama dalam melakukan interpolasi perhitungan untuk *slave*, sedangkan *slave* merupakan citra SAR dengan liputan yang memiliki perbedaan waktu akuisisi yang dapat digunakan untuk perbandingan data dengan citra SAR *master*.

Pada citra hasil lintasan pertama diperoleh nilai fasa, begitu pun dengan citra kedua pada lintasan kedua diperoleh juga nilai fasa. Jika terjadi perbedaan fasa antara pencitraan lintasan pertama dengan lintasan kedua, maka akan terlihat *fringes* (rumbai - rumbai) pada interferogram yang dinamakan *displacement fringes*. Pada interferogram terdapat 2 macam *fringe* utama, yaitu *displacement fringe* yang diakibatkan karena pergeseran permukaan topografi, kedua adalah *topographic fringe* yang diakibatkan bentuk topografi (Prasetyo 2010).

Teknik SAR interferometrik (InSAR) memungkinkan untuk memetakan perpindahan permukaan dengan resolusi spasial yang belum pernah terjadi sebelumnya, dengan akurasi beberapa sentimeter, dan telah digunakan untuk mempelajari kesalahan gempa bumi dan vulkanik sumber magma (Simons dan Rosen 2015). Meskipun terdapat banyak aplikasi InSAR untuk pemetaan deformasi di gunung berapi magmatik, akan tetapi relatif sedikit studi tentang penerapannya terhadap gunung lumpur, dengan pengecualian letusan LUSI di Indonesia (Aoki dan Sidiq 2014).

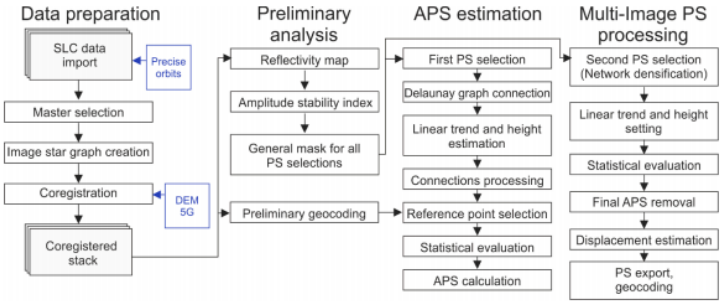
2.6 PS-InSAR dengan Software SARProZ

Menurut Crosetto dkk. (2016), PS-InSAR (*Permanent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar*) merupakan teknik penginderaan jauh yang merepresentasikan teknik DinSAR yang lebih spesifik dengan cara mengeksploitasi beberapa citra SAR yang diakuisisi pada daerah yang sama dan pemrosesan data yang sesuai, serta menganalisis prosedur untuk memisah beda fase perpindahan dari komponen fase lain yang diwakili.

PS-InSAR digunakan untuk mengukur deformasi berdasarkan LOS (*Line of Sight*) dari sensor SAR ke permukaan

secara *time series* dengan mengestimasi masing-masing wilayah akuisisi SAR, menghilangkan efek atmosfer, topografi, dan noise sinyal. Teknik ini mengeksploitasi interferogram dengan satu *scene* utama (*master*). Dalam teknik ini, hanya piksel yang koheren dengan fase atau amplitudo stabil yang diproses. Jumlah titik yang dihasilkan di daerah vegetasi dimungkinkan memiliki hasil yang rendah. Hasil luaran dari PS-InSAR yaitu deformasi yang berkala (*time series*) dan estimasi kecepatan deformasi hasil analisis dari PSs atau DSs, serta *Residual Topographic Error* (RTE) yang merupakan perbedaan antara ketinggian sebenarnya pada titik tengah sebaran fase yang diberikan oleh PS dan ketinggian dari DEM pada titik tersebut. RTE adalah kunci parameter untuk mencapai PS *geocoding* yang akurat.

Perangkat lunak SARProZ digunakan untuk PS-InSAR (Perissin dkk. 2011) yang memungkinkan kumpulan data besar untuk diproses. SARProZ telah berhasil digunakan, misalnya, oleh Qin dan Perissin (2015) untuk membuat peta perpindahan Hong Kong dengan membuktikan keakuratan PS-InSAR berada pada level satu millimeter. Adapun alur kerja umum dan spesifikasi pengaturan untuk kumpulan data tertentu menurut Fárová dkk. (2019) dijelaskan secara singkat sebagai berikut :



Gambar 2.16 Diagram alir proses PS-InSAR dengan *Software* SARProZ (Fárová dkk. 2019)

Terdapat banyak metode untuk memilih *scatterers* tersebut, metode yang dibahas dan digunakan dalam studi ini adalah *Amplitude Stability Index* (ASI). Dalam metode ini, *Amplitude Stability Index* seluruh titik dihitung, maka titik yang memiliki nilai lebih tinggi dari batas ambang ASI yang dipilih. *Amplitude Stability Index* (ASI) dihitung dengan menggunakan nilai *Amplitude Dispersion Index* (ADI) sebagai berikut :

$$\mathrm{ASI} = 1 - \mathrm{D_A} = 1 - \left(\frac{\sigma_A}{\mu_A}\right) \tag{2.2}$$

Dimana, σ_A adalah standar deviasi, μ_A adalah nilai rata-rata dan D_A adalah *dispersion index*. Ferretti dkk. (2001) merekomendasikan ambang yang sesuai untuk memilih PS pertama ketika ASI > 0,75 (D_A < 0,25). Stabilitas fase dapat dinilai setelah memperkirakan dan menghapus kontribusi fase yang berbeda (*Atmospheric Phase Screen* (APS), kesalahan DEM, ketidakakuratan orbit, nilai amplitudo absolut hampir tidak sensitif terhadap sebagian besar fenomena ini. Jadi, sebuah piksel yang secara konstan memiliki amplitudo yang sama selama semua akuisisi diharapkan memiliki dispersi fase kecil.

2.7 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian terdahulu belum ditemukan penelitian dengan metode PS-InSAR untuk analisis deformasi manifestasi gunung lumpur di Wilayah Cekungan Jawa Timur, akan tetapi telah dilakukan beberapa penelitian terkait deformasi muka tanah pada manifestasi gunung lumpur dengan mengunakan teknik SAR lainnya, seperti penelitian dengan teknik InSAR yang dilakukan oleh Fukushima dkk. (2009). yaitu "*Subsidence associated with the LUSI mud eruption, East Java, investigated by SAR interferometry*". Pada penelitian ini menggunakan data ALOS PALSAR level 1.0 dengan akuisisi pada tanggal 19 Mei 2006 hingga 21 Mei 2007 di dua lokasi *path* dan *frame* yang berbeda. Pemrosesan data dilakukan pada Software GAMMA dengan memasukkan DEM SRTM agar dapat mengurangi efek topografi. Interferogram SAR yang diproses mencakup periode waktu satu tahun sejak dimulainya letusan lumpur LUSI pada Bulan Mei 2006 secara terus-menerus menunjukkan penurunan permukaan ellipsoidal sekitar 4 km×3 km yang berpusat pada lubang erupsi utama. Efek pemuatan lumpur dan pemunculan saluran lumpur silinder dengan radius beberapa puluh meter terlalu kecil untuk menjelaskan jumlah total penurunan permukaan tanah yang diamati dalam enam bulan pertama letusan. Penipisan material dan penurunan tekanan fluida pada kedalaman merupakan kemungkinan penyebab dominan penurunan muka tanah. Penelitian ini menemukan bahwa deflasi spheroid yang terletak lebih dangkal dari 1 km menjelaskan perpindahan yang diamati. Kemudian penelitian ini dilanjutkan oleh Agustan and Kimata (2011) pada penelitiannya yang berjudul "Analisis Deformasi Daerah Porong – Sidoarjo Terkait Semburan Lumpur Dengan Teknik Interferometri.

Pada penelitian tersebut menggunakan data satelit ALOS dengan sensor PALSAR tipe L-*Band* sejak tahun 2007 sampai 2009 dan diolah dengan metode 2-*pass differential* InSAR. Dalam penelitian ini, data PALSAR yang diolah terdiri dari data tingkat 1.0 dan 1.1 serta dalam *fine beam single polarization* (FBS) dan

fine beam double polarization mode (FBD). Interferogram dibentuk berdasarkan dua data radar dalam format *Single Look Complex* (SLC) dengan resolusi FBS sehingga proses konversi format dan resolusi dilakukan dengan menggunakan algoritma *range oversampling*. Hasil dari pengolahan data pada penelitian tersebut berupa perubahan permukaan dari hasil pemodelan data satelit radar sampai tanggal 9 Januari 2009 yang mengindikasikan lokasi bidang slip terletak pada kedalaman dangkal yaitu sekitar 1 km di bawah permukaan.

Selain itu, pembahasan tentang pengolahan SAR yang berlokasi di Lumpur Sidoarjo juga telah diteliti lebih lanjut oleh Yulyta dkk. (2015) dengan judul "Studi Pengamatan Penurunan Dan Kenaikan Muka Tanah Menggunakan Metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR)". Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah empat buah citra satelit ALOS/PALSAR (Februari 2008, Januari 2009, dan Februari 2010 dan Januari 2011) dan DEM SRTM 90 m yang kemudian diproses secara *Differential Interferometri* SAR (DInSAR) hingga didapatkan besar deformasi pada radius 1,5 km dari pusat semburan. Hasil metode DInSAR menunjukkan deformasi vertikal yang terjadi di sekitar wilayah semburan bervariasi, dibeberapa lokasi mengalami *subsidence* dan beberapa mengalami uplift, tergantung peristiwa yang terjadi pada kurun waktu tersebut. Rata-rata besar penurunan tanah yang terjadi antara tahun 2008-2011 yaitu antara 0-20 cm/th sedangkan besar *uplift* rata-rata yaitu 0-10 cm/tahun. Karena pengolahan data SAR dengan teknik DInSAR masih memiliki kesalahan atau dekorelasi berupa dekorelasi temporal, atmosferik, serta *noise*, maka sebaiknya gunakan teknik yang lebih akurat untuk penelitian selanjutnya, yaitu teknik PS-InSAR (*Permanent Scatterer Interferometry* SAR).

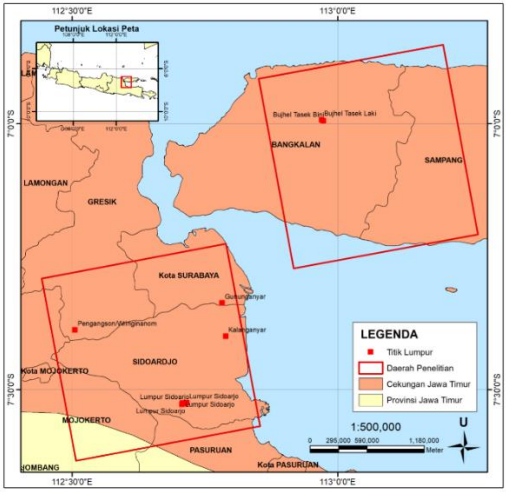
Dengan beberapa referensi penelitian tersebut, maka penelitian ini akan menjadi penelitian pertama yang membahas mengenai deformasi muka tanah pada manifestasi gunung lumpur dengan mengunakan teknik PS-InSAR.

"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

BAB III
METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi geografis penelitian pada tugas akhir ini yaitu 112°50′22,08″-113°18′4,17″ BT dan 6°48′59,37″-7°17′2,7″ LS, yang menunjukkan lokasi daerah manifestasi gunung lumpur di Pulau Madura, Provinsi Jawa Timur dan 112°27′16,7″-112°51′59,02″ BT dan 7°13′7,21″-7°38′34,04″ LS, yang menunjukkan lokasi daerah manifestasi gunung lumpur di Jawa Timur daratan, Provinsi Jawa Timur. Kedua lokasi geografis tersebut berada pada wilayah Cekungan Jawa Timur. Peta lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Peta lokasi penelitian

Adapun lokasi gunung lumpur yang diteliti dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Manifestasi gunung lumpur pada provinsi Jawa Timur

No.	Nama Gunung Lumpur	Koordinat
1	Gununganyar	7°20'14,08" LS 112°46'56,32" BT
2	Bujhel Tasek Bini	6° 59′ 41,03″ LS 112° 58′ 22,53″ BT
3	Bujhel Tasek Laki	6° 59′ 33,39″ LS 112° 58′ 10,93″ BT
4	Lumpur Sidoarjo	• 7° 31′ 40,5″ LS 112° 42′ 23,34″ BT • 7° 31′ 32,22″ LS 112° 42′ 28,08″ BT • 7° 31′ 33,72″ LS 112° 42′ 47,34″ • 7° 31′ 28,92″ LS 112° 42′ 55,74″ BT
5	Kalanganyar	7° 23′ 59,1″ LS 112° 47′ 20,75″ BT
6	Pengangson/Wringinanom	7° 23′ 17″ LS 112° 30′ 18″ BT

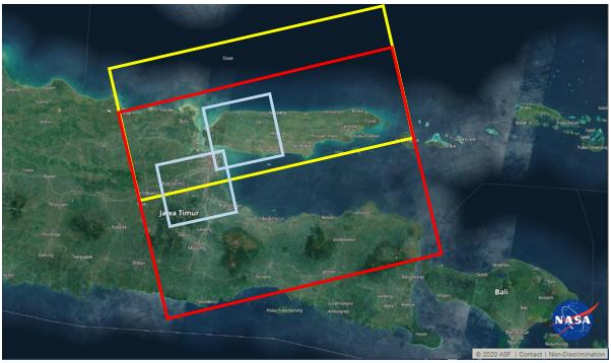
3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dengan rincian data yang digunakan sebagai berikut :

a. Citra Satelit Radar

Satelit radar yang digunakan dengan menggunakan Citra Sentinel 1A dan Citra ALOS PALSAR-1. Adapun hasil akuisisi luasan *scene* pada masing-masing citra tertampil pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Perbandingan luasan *scene* antara Citra Sentinel 1A dan Citra ALOS PALSAR-1

Pada Gambar 3.2, kotak berwarna kuning dan merah menunjukkan luasan *scene* pada Citra Sentinel 1A dengan mode sapuan *Interferometric Wide Swath* (IW), sedangkan pada kotak berwarna biru muda merupakan luasan *scene* pada Citra ALOS PALSAR-1 dengan mode sapuan *Fine Beam Dual Polarization* (FBD). Berikut merupakan rincian data citra yang digunakan :

- Citra Satelit Sentinel-1A
  - Mode : *Level* 1.0 *Single Look Complex*
  - Polarisasi : VV (*Single Polarization*)
  - Frekuensi : C-*Band*
  - Tahun akusisi : 2015 – 2019
  - Sumber : - Alaska *Satellite Facility* (Copernicus Sentinel data 2015-2016. Diakses pada ASF DAAC 16 Februari 2020, Diproses oleh ESA).
    - Copernicus *Open Access Hub* (Copernicus Sentinel data 2017-2019. Diakses pada ASF DAAC 20 Februari 2020, Diproses oleh ESA).

Berikut merupakan wilayah akuisisi data Citra satelit Sentinel-1A pada wilayah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur :

Gambar 3.3 Posisi *scene* citra Sentinel-1A pada Alaska *Satellite Facility* (Copernicus Sentinel data 2015-2016, Diproses oleh ESA)

Tabel 3.2 Data akuisisi Citra satelit Sentinel-1A pada wilayah semburan gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2015-2016

No.	**ID *File* Citra**	**Tanggal akuisisi**	**Polarisasi**	**Arah Terbang**
1	S1A_IW_SLC__1SSV_20151227T104948_20151227T105007_009226_00D4DA_8F06	27 Desember 2015	VV	*Ascending*

No.	ID *File* Citra	Tanggal akuisisi	Polarisasi	Arah Terbang
2	S1A_IW_SLC__1SSV_20160213T104947_20160213T105005_009926_00E916_5405	13 Februari 2016	VV	*Ascending*
3	S1A_IW_SLC__1SSV_20160519T104952_20160519T105011_011326_0112EA_8CA4	19 Mei 2016	VV	*Ascending*
4	S1A_IW_SLC__1SSV_20160823T104958_20160823T105017_012726_014057_4BCD	23 Agustus 2016	VV	*Ascending*
5	S1A_IW_SLC__1SSV_20161010T104959_20161010T105018_013426_01571D_1CB1	10 Oktober 2016	VV	*Ascending*

Gambar 3.4 Posisi *scene* citra Sentinel-1A pada *Copernicus Open Access Hub*
(Copernicus Sentinel data 2017-2019, Diproses oleh ESA)

Tabel 3.3 Data akuisisi Citra satelit Sentinel-1A pada wilayah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2017-2019

No.	**ID *File* Citra**	**Tanggal akuisisi**	**Polarisasi**	**Arah Terbang**
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20170315T104941_20170315T105009_015701_019D77_52A0	15 Maret 2017	VV	*Ascending*
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20170514T104944_20170514T105012_016576_01B7E6_A792	14 Mei 2017	VV	*Ascending*
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20170818T104949_20170818T105017_017976_01E2A8_D480	18 Agustus 2017	VV	*Ascending*

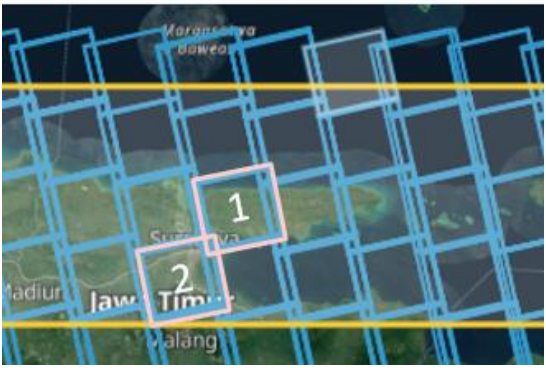
No.	ID *File* Citra	Tanggal akuisisi	Polarisasi	Arah Terbang
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20171122T104951_20171122T105019_019376_020DB3_ED28	22 November 2017	VV	*Ascending*
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20171216T104950_20171216T105018_019726_02189B_3505	16 Desember 2017	VV	*Ascending*
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20180202T104948_20180202T105016_020426_022EAF_E749	2 Februari 2018	VV	*Ascending*
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20180521T104951_20180521T105019_022001_026084_B78F	21 Mei 2018	VV	*Ascending*
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20180825T104956_20180825T105024_023401_028BE5_6C8D	25 Agustus 2018	VV	*Ascending*
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20181117T104957_20181117T105025_024626_02B48A_14A1	17 November 2018	VV	*Ascending*
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20181223T104956_20181223T105024_025151_02C729_2EEE	23 Desember 2018	VV	*Ascending*
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20190209T104954_20190209T105022_025851_02E07C_D88B	9 Februari 2019	VV	*Ascending*

No.	ID *File* Citra	Tanggal akuisisi	Polarisasi	Arah Terbang
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20190209T104954_20190209T105022_025851_02E07C_D88B	9 Februari 2019	VV	*Ascending*
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20190528T104957_20190528T105025_027426_031810_B45C	29 Mei 2019	VV	*Ascending*
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20190808T105002_20190808T105030_028476_0337FA_8BFA	8 Agustus 2019	VV	*Ascending*
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20191112T105004_20191112T105032_029876_036871_D85A	12 November 2019	VV	*Ascending*
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20191218T105003_20191218T105031_030401_037A9E_87B5	18 Desember 2019	VV	*Ascending*

b. Citra Satelit ALOS/PALSAR 1

- Mode : *Level* 1.1 *Complex*
- Polarisasi : HH (*Single Polarization*)
- Frekuensi : L-*Band*
- Tahun akusisi : 2007-2009
- Sumber Data : Alaska *Satellite Facility © JAXA/METI ALOS PALSAR L1.1 2007-2009.* Diakses pada ASF *DAAC 8 Februari 2020.*

Berikut merupakan wilayah akuisisi data Citra satelit ALOS/PALSAR pada wilayah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur :



Gambar 3.5 Posisi *scene* citra ALOS/PALSAR 1 pada Alaska *Satellite Facility © JAXA/METI 2007-2009.*

Pada gambar 3.4, angka 1 menunjukkan posisi *scene* citra ALOS/PALSAR 1 pada *path* 426 *frame* 7040 dan angka 2 menunjukkan posisi *scene* citra ALOS/PALSAR 1 pada *path* 427 *frame* 7030.

Tabel 3.4 Data akuisisi Citra satelit ALOS/PALSAR 1 pada wilayah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2006-2011

No.	**ID *File* Citra**	**Tanggal akuisisi**	**Polarisasi**	**Arah Terbang**
No: 1 *Path* : 426 *Frame* : 7040				
1	ALPSRP087457040	15 September 2007	HH	*Ascending*
2	ALPSRP121007040	2 Mei 2008	HH	*Ascending*
3	ALPSRP127717040	17 Juni 2008	HH	*Ascending*
4	ALPSRP141137040	17 September 2008	HH	*Ascending*

No.	ID *File* Citra	Tanggal akuisisi	Polarisasi	Arah Terbang
5	ALPSRP181397040	20 Juni 2009	HH	*Ascending*
6	ALPSRP188107040	5 Agustus 2009	HH	*Ascending*
No: 2 *Path* : 427 *Frame* : 7030				
1	ALPSRP076517030	2 Juli 2007	HH	*Ascending*
2	ALPSRP083227030	17 Agustus 2007	HH	*Ascending*
3	ALPSRP089937030	2 Oktober 2007	HH	*Ascending*
4	ALPSRP130197030	4 Juli 2008	HH	*Ascending*
5	ALPSRP136907030	19 Agustus 2008	HH	*Ascending*
6	ALPSRP143617030	4 Oktober 2008	HH	*Ascending*
7	ALPSRP190587030	22 Agustus 2009	HH	*Ascending*

c. DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) resolusi 30 meter
d. Data Orbit SAR Citra
e. Peta Administrasi Wilayah Provinsi Jawa Timur
f. Data Geologi Gunung Lumpur di Provinsi Jawa Timur

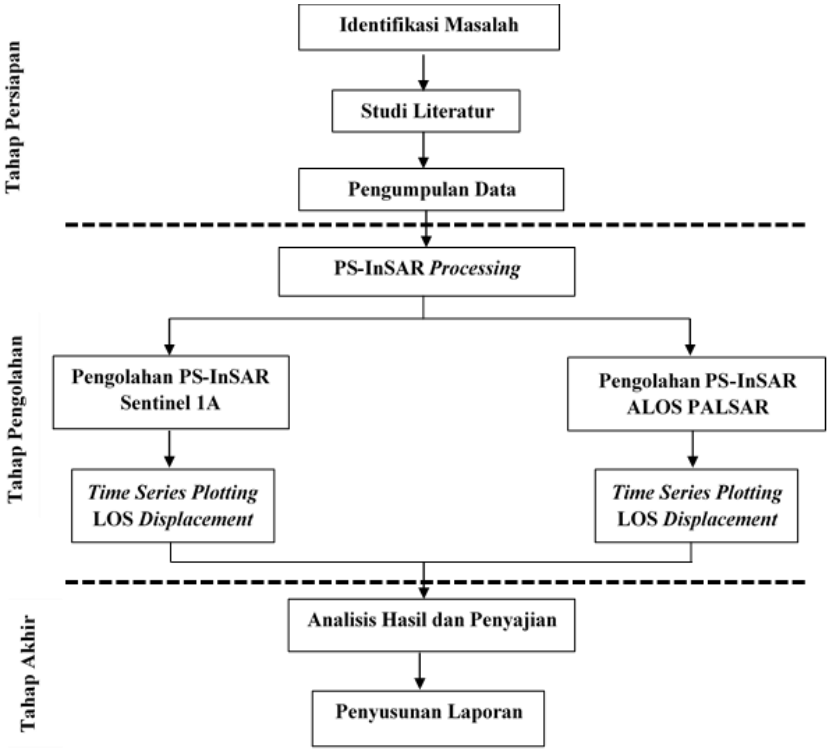
3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

a. *Software*
   - SARProZ (Copyright © 2009-2016 Daniele Perissin) (Perrisin 2016)
   - *Google Earth Pro*

- GMT (*Generic Mapping Tools*) versi 6.0.0 (Wessel dkk. 2013)

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6 Bagan diagram alir penelitian

Secara garis besar, tahapan penelitian dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.6 dengan penjelasan tahap penelitian meliputi :

a. Tahap Persiapan

Pada tahapan persiapan ini dilakukan beberapa langkah meliputi :

- Identifikasi Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana cara mengetahui adanya deformasi muka tanah di sekitar manifestasi gunung lumpur di wilayah Cekungan Jawa Timur dengan menggunakan metode PS-InSAR dari citra ALOS PALSAR 1 dan Sentinel 1A.

- Studi literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan deformasi muka tanah akibat semburan lumpur, teknologi radar, *Interferometry* SAR, teknik pengolahan SAR dengan metode PS-InSAR, dan literatur lain yang mendukung baik dari buku, jurnal, majalah, koran, internet, dan lain sebagainya.

- Pengumpulan Data

Pada tahapan ini dilakukan proses pengumpulan data-data penunjang yang digunakan dalam penelitian tugas akhir untuk memperlancar proses pengolahan data. Adapun data-data tersebut diantaranya citra satelit Sentinel-1A *level* 1.0 (*Single Look Complex*), cira satelit ALOS PALSAR 1 *level* 1.1 *Complex*, data DEM, data orbit dan data penunjang lainnya. Dalam PS-InSAR, kebutuhan data yang digunakan secara temporal tidak melebihi 7 tahun dari akuisisi data awalnya.

b. Tahap Pengolahan Data

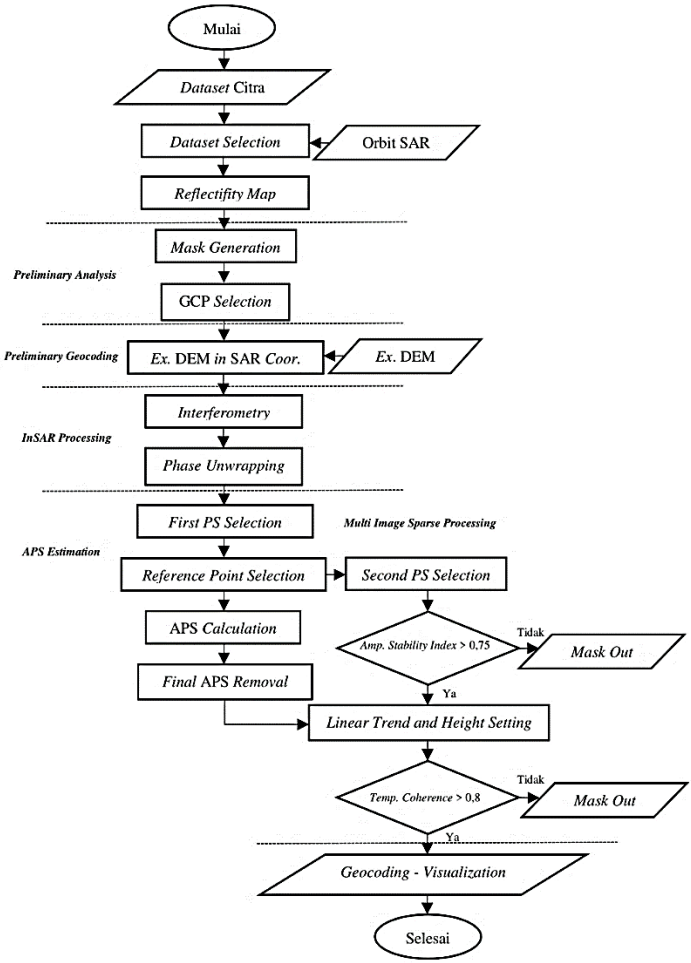
Tahap pengolahan data pada tahap ini, data Sentinel-1A yang digunakan telah dalam format *Single Look Complex* (SLC) yang kemudian dilakukan pengolahan PS-InSAR citra Sentinel-1A dengan 1 citra sebagai *master*, hal ini juga berlaku untuk citra ALOS PALSAR 1. Kemudian semua data diolah dengan metode PS-InSAR pada *Software* SARproZ, dan dilakukan proses *plotting* data *time series* LOS *Velocity Rate* untuk dilakukan analisa hasil.

c. Tahap Akhir

Tahap akhir dari penelitian ini yaitu analisa perbandingan hasil akibat perbedaan tipe citra, serta analisis data yang dilakukan dengan mengidentifikasi besar penurunan muka tanah pada Wilayah Cekungan Jawa Timur pada hasil data citra satelit Sentinel 1A dengan ALOS/PALSAR 1 dengan metode PS- InSAR terhadap

kondisi geologi Wilayah Jawa Timur, serta penyusunan laporan penerapan metode PS-InSAR (*Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar*) untuk analisis deformasi muka tanah Wilayah Cekungan Jawa Timur.

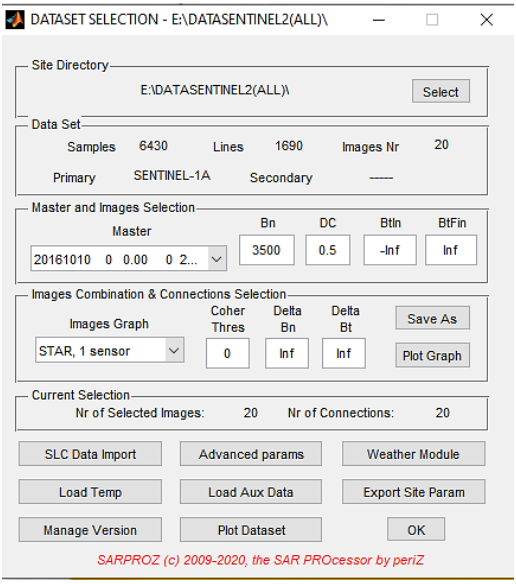
3.3.1 Tahap Pengolahan PS-InSAR pada *Software* SARproZ



Gambar 3.7 Bagan diagram alir pengolahan PS-InSAR pada *software* SARProZ

Berikut merupakan penjelasan dari diagram alir pada Gambar 3.7 :

a. *Dataset Selection*

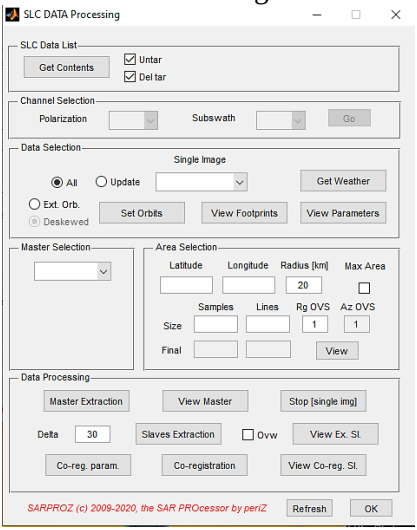


Gambar 3.8 Tampilan menu *Dataset Selection*

Terdapat beberapa fungsi di dalam *Dataset Selection* yang digunakan yaitu :

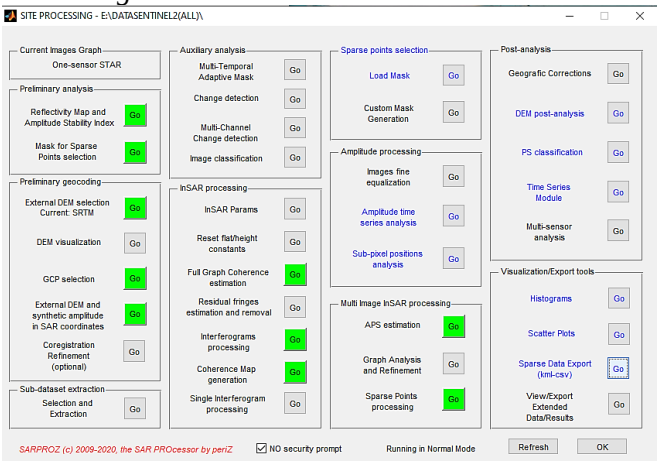
- *Site Directory*, digunakan untuk pemilihan folder yang berisi kumpulan file SLC yang akan diolah. Informasi folder tersebut akan dapat dilihat pada kolom Data Set. Citra SAR yang dapat digunakan adalah data yang sudah dalam bentuk SLC (*Single Look Complex*).
- *Master and Images Selection*, digunakan untuk memilih data master yang ingin digunakan. Pada fungsi ini juga dapat digunakan untuk mengatur ambang batas pada *Normal Baseline* dan Doppler Centroid untuk mengurangi proses pada kumpulan citra

- *Images Combination and Connections Selection*, digunakan untuk mendefinisikan kombinasi pasangan data SAR (*Master* dan *Slave*) dan jaringan koneksi yang digunakan untuk generasi berbagai *differential interferogram*.
- *SLC Data Import*, terdapat beberapa fungsi dalam menu ini, seperti :
  - *SLC Data List*, untuk membuka folder .zip pada file citra
  - *Channel Selection*, untuk memilih polarisasi dan subswath citra yang diinginkan.
  - *Data Selection*, untuk mendownload dan mengatur orbit citra yang digunakan, cuaca dan melihat kesesuaian *footprint* citra pada google *earth.*
  - *Area Selection*, untuk memilih *Area Of Interest* dari citra dengan memasukkan radius pengolahan citra yang akan diolah.
  - *Data Processing*, untuk mengekstrak *master* dan *slave* data citra dan melakukan co-regristrasi citra.



Gambar 3.9 Tampilan menu SLC *Data Processing*

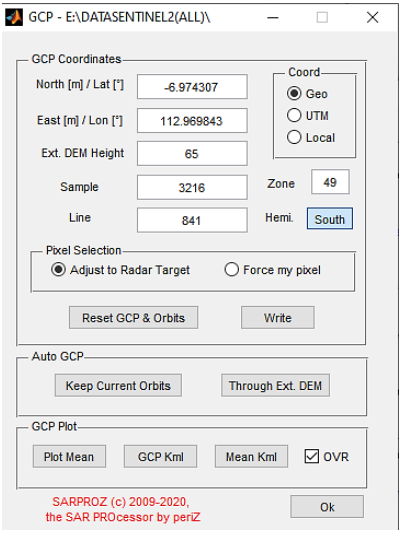
b. *Site Processing*



Gambar 3.10 Tampilan menu *Site Processing*

- *Preliminary Analysis*, merupakan tahap awal pada *Site Processing*. Terdapat beberapa tahap pada *Preliminary Analysis*, yaitu :
  - *Reflectivity Map and Amplitude Stability Index*, pada tahap ini dihasilkan tampilan atau citra dalam bentuk pantulan yang dihasilkan oleh objek yang ada di permukaan bumi sebagai rata-rata temporal dari semua dataset citra yang telah dipilih dan pembentukan *amplitude stability index*.
  - *Mask Generation*, fungsi ini digunakan untuk pemilihan *sparse points*.
- *Preliminary Geocoding*, bertujuan untuk memperbaiki offset orbit awal dan mengimpor DEM eksternal. Adapaun beberapa fungsi pada tahap ini, seperti :
  - *External* DEM *Selection*, fungsi ini digunakan untuk memilih sumber DEM eksternal.
  - *Ground Control Point* (GCP) *Selection*, pada tahap ini dilakukan pemilihan titik kontrol yang nantinya akan

digunakan untuk memproyeksikan citra SAR yang masih dalam geometri *slant range* ke sistem koordinat global.

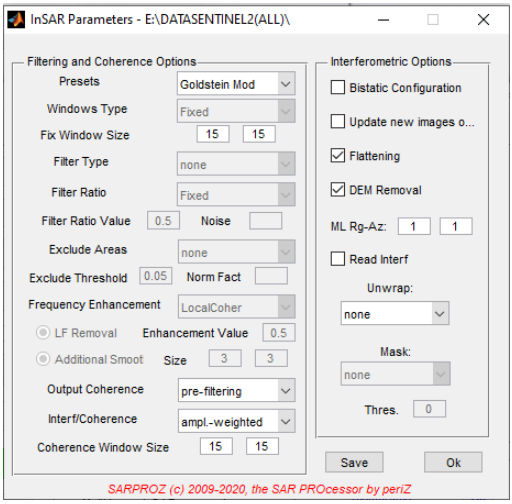


Gambar 3.11 Tampilan menu GCP *Selection*

- *Ext.* DEM *in* SAR *Coordinates*, fungsi ini memproses DEM eksternal dan amplitude sintetik kedalam koordinat SAR atau dalam bentuk geometri *slant range*.

- InSAR *Processing*, bertujuan untuk untuk mempersiapkan dan melakukan analisis interferometrik. Terdapat beberapa fungsi yang dapat digunakan seperti:
  - InSAR *Parameters*, terdapat beberapa parameter untuk dapat digunakan pada pengolahan InSAR, seperti *flattening* (pendataran beda fase interferogram kedalam bidang proyeksi 2 dimensi), DEM *Removal* (menghapus komponen fase topografi yang tidak sesuai dengan DEM), *Multi-Looking* (me-*reduce* ukuran file serta mengurangi pola acak dari efek *noise* yang bisa menyebabkan munculnya *speckle*), Goldstein Mod (Penghapusan *temporal decorrelation*, *geometric*

decorrelation, *volume scattering*, dan error dari pemrosesan untuk disesuaikan dengan *window size*.

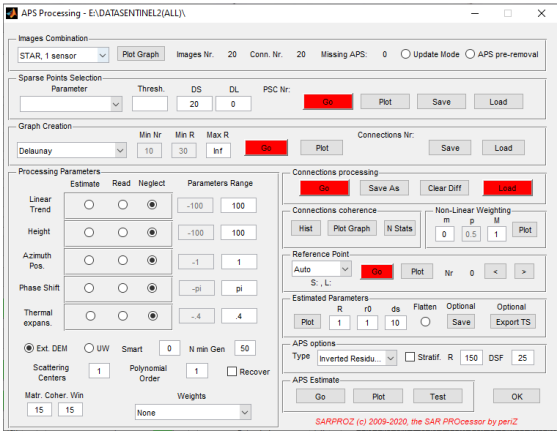


Gambar 3.12 Tampilan menu InSAR Parameters

- *Full Graph Coherence Estimation*, untuk memproses koefisien *phase to height* dan *phase to flat* agar dapat digunakan dalam memperbaiki interferogram pada medan datar maupun curam (ekstrem).
- *Interferograms Processing*, untuk membentuk citra interferogram dari hasil kali citra *master* dan *slave* untuk dibentuk fase yang mewakili perbedaan fase dari kedua citra tersebut.
- *Phase Unwrapping*, untuk mengintegrasi dan mengonversi rekaman perubahan fase relatif pada interferogram menggunakan algoritma numerik dengan memastikan semua kelipatan 2π ke dalam nilai metrik atau nilai sebenarnya untuk memperoleh bidang pemindahan rentang deformasi rata-rata pada wilayah penelitian.

- *Coherence Map Generation*, dilakukan pembuatan peta hasil pengolahan InSAR untuk koherensi.

- *Multi Image* InSAR *Processing*, bertujuan untuk mengimplementasikan pendekatan PS-QPS. Terdapat beberapa fungsi dalam tahap ini, yaitu :
  - *Atmospheric Phase Screen* (APS) *Estimation*, fungsi ini digunakan untuk mengatasi pengaruh atmosfer yang dialami oleh sinyal radar yang ditembakkan oleh satelit yang dapat menimbulkan artifak pada interferogram. Ada beberapa pilihan pada prosesing APS *estimation*, yaitu *inverted parameters, inverted residuals, triangulation inverted residuals*, dan *stratified*. Namun apabila data yang dimiliki sangat stabil dan memiliki nilai koherensi yang baik, maka tipe *inverted residuals* dapat digunakan untuk memperoleh hasil APS yang baik.

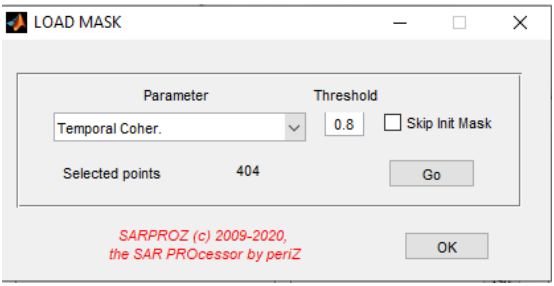


Gambar 3.13 Tampilan Menu APS *Processing*

- *Sparse Points Processing*, Tahap ini tidak jauh berbeda dengan tahap sebelumnya, pada menu yang ada dilakukan input parameter yang sudah didapatkan dari tahap yang sebelumnya. Mulai dari nilai *threshold parameter Amplitude Stability Index* hingga tipe APS

estimation. Output yang dihasilkan pada tahap ini berupa histogram *temporal coherence, estimated velocity, cumulative displacement, estimated height* dan *residual height* masing-masing *sparse points*, serta *residual phase* dari pemisahan APS dan nilai parameter estimasi.

- *Load Mask*, digunakan untuk memilih pengaturan parameter *sparse point* yang akan dianalisis.



Gambar 17.14 Tampilan menu *Load Mask*

- *Time Series Module*, berfungsi untuk mengekspor data hasil pengolahan pada *Multi Image* InSAR *Processing* untuk dapat dianalisis pada tiap pasangan citra.
- *Visualization/Export Tools*, bertujuan untuk untuk melihat/mengekspor data dan hasil. Terdapat beberapa fungsi dalam tahap ini, yaitu Histogram, *Scatter Plots*, *Sparse Data Export*, *View/Export Extended Data/Result*.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

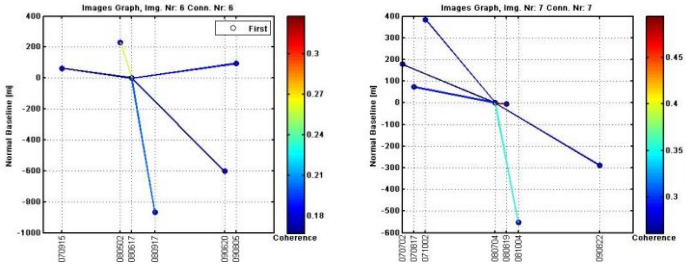
4.1 Hasil Pengolahan Data PS-InSAR

Metode PS-InSAR pada pada dasarnya adalah merupakan metode InSAR dengan data multitemporal. Menurut Virk, Singh, dan Mittal (2019), Metodologi PS-InSAR dengan menggunakan minimal 20 citra dapat memonitor pergerakan deformasi linear dengan perubahan ketinggian yang dibandingkan dengan data DEM. Pada penelitian ini, pengolahan PS-InSAR dilakukan menggunakan data SAR dari Satelit ALOS PALSAR-1 dan Sentinel 1A. Pada Citra ALOS PALSAR-1 sebanyak 6 citra (*path* 426 *frame* 7040) dan sebanyak 7 citra (*path* 427 *frame* 7030), sedangkan untuk citra Sentinel 1A sebanyak 20 citra. Penggunaan 6 – 7 citra pada Citra ALOS PALSAR dikarenakan adanya keterbatasan ketersediaan data pada wilayah penelitian dengan rentang waktu di Tahun 2007-2009, sedangkan penggunaan 20 citra pada Citra Sentinel 1A dikarenakan keterbatasan ketersediaan data pada Tahun 2015 hingga 2016, sehingga pengunduhan data dilakukan dengan rentang waktu antar citra selama 1-2 bulan secara konsisten dari pada Tahun 2015 hingga 2019.

4.1.1 Hasil Input *Dataset Selection*

- *Baseline plot* (*Temporal Baseline* dan *Perpendicular Baseline*) Citra ALOS PALSAR

  Informasi *baseline* normal atau *perpendicular baseline* ditunjukkan pada sumbu Y dan informasi dasar temporal akuisisi citra SAR berada pada sumbu X. Pada Gambar 4.1 (a) menunjukkan informasi dataset master dipilih adalah 17 Juni 2008 dan (b) menunjukkan informasi dataset *master* dipilih adalah 4 Juli 2008. Berdasarkan gambar 3.1, *path* 426 *frame* 7040 menunjukkan cakupan wilayah Pulau Madura, Jawa Timur, sedangkan pada *path* 427 *frame* 7030 menunjukkan cakupan wilayah Jawa Timur daratan, Provinsi Jawa Timur.



(a) (b)

Gambar 4.1 (a) *Baseline plot* pada Citra ALOS PALSAR *path* 426 *frame* 7040, (b) *Baseline plot* pada Citra ALOS PALSAR *path* 427 *frame* 7030

Berikut merupakan rincian data citra akusisi SAR ALOS/PALSAR 1 untuk dijadikan citra *slave* pada wilayah semburan gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2006-2011:

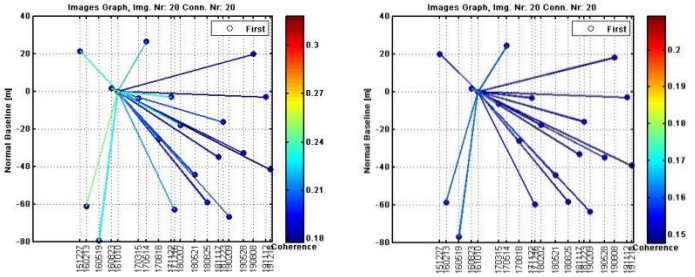
Tabel 4.1 Data akuisisi *slave* Citra satelit ALOS/PALSAR 1

No.	**Tanggal akuisisi**	***Perpendicular Baseline* (m)**	***Temporal Baseline* (*days*)**
Path : 426 *Frame* : 7040			
1	15 September 2007	64	-276
2	2 Mei 2008	231	-46
3	17 Juni 2008	0	0
4	17 September 2008	-866	92
5	20 Juni 2009	-602	368
6	5 Agustus 2009	97	414
Path : 427 *Frame* : 7030			
1	2 Juli 2007	178	-368
2	17 Agustus 2007	73	-322
3	2 Oktober 2007	385	-276
4	4 Juli 2008	0	0
5	19 Agustus 2008	-6	46
6	4 Oktober 2008	-551	92
7	22 Agustus 2009	-288	414

Jumlah citra SAR ALOS PALSAR-1 yang diolah kurang dari referensi yang diberikan oleh Virk, Singh, dan Mittal (2019), hal ini dikarenakan adanya keterbatasan ketersediaan jumlah citra yang sesuai dengan wilayah yang diteliti.

- *Baseline plot* (*Temporal Baseline* dan *Perpendicular Baseline*) Citra Sentinel 1A

Informasi *baseline* normal atau *perpendicular baseline* ditunjukkan pada sumbu Y dan informasi dasar temporal pada sumbu X. Pada gambar 4.2 (a) dan (b) menunjukkan informasi dataset master dipilih adalah 10 Oktober 2016. Berdasarkan gambar 3.2, *Subswath* IW1 menunjukkan cakupan wilayah Jawa Timur di Pulau Jawa, sedangkan *Subswath* IW2 menunjukkan cakupan wilayah Jawa Timur di Pulau Madura.



(a) (b)

Gambar 4.2 (a) *Baseline plot* Citra Sentinel 1A pada (a) *subswath* IW1, (b) *subswath* IW2

Berikut merupakan rincian data citra akusisi SAR Sentinel 1A untuk dijadikan citra *slave* pada wilayah semburan gunung lumpur Jawa Timur di Wilayah Cekungan Jawa Timur pada Tahun 2015-2019 :

Tabel 4.2 Data akuisisi *slave* Citra Sentinel 1A *subswath* IW 1

No.	**Tanggal akuisisi**	***Perpendicular* Baseline (m)**	***Temporal Baseline* (*days*)**
1	27 Desember 2015	21	-288
2	13 Februari 2016	-61	-240
3	19 Mei 2016	-79	-144
4	23 Agustus 2016	1	48
5	10 Oktober 2016	0	0
6	15 Maret 2017	-4	156
7	14 Mei 2017	26	216
8	18 Agustus 2017	-25	312
9	22 November 2017	-3	408
10	16 Desember 2017	-63	432
11	2 Februari 2018	-18	480
12	21 Mei 2018	-45	588
13	2 Februari 2018	-59	684
14	17 November 2018	-35	768
15	23 Desember 2018	-16	804
16	9 Februari 2019	-67	852
17	29 Mei 2019	-33	960
18	8 Agustus 2019	20	1032
19	12 November 2019	-3	1128
20	18 Desember 2019	-42	1164

Tabel 4.3 Data akuisisi *slave* Citra Sentinel 1A *subswath* IW 2

No.	**Tanggal akuisisi**	***Perpendicular* Baseline (m)**	***Temporal Baseline* (*days*)**
1	27 Desember 2015	20	-288
2	13 Februari 2016	-59	-240
3	19 Mei 2016	-77	-144
4	23 Agustus 2016	2	-48
5	10 Oktober 2016	-7	156
6	15 Maret 2017	24	216
7	14 Mei 2017	-26	312
8	18 Agustus 2017	-3	408
9	22 November 2017	-60	432
10	16 Desember 2017	-18	480
11	2 Februari 2018	-44	588
12	21 Mei 2018	-58	684

No.	Tanggal akuisisi	*Perpendicular* Baseline (m)	*Temporal Baseline* (*days*)
13	2 Februari 2018	-33	768
14	17 November 2018	-16	804
15	23 Desember 2018	-64	852
16	9 Februari 2019	-35	960
17	29 Mei 2019	18	1032
18	8 Agustus 2019	-3	1128
19	12 November 2019	-39	1164
20	18 Desember 2019	20	-288

Jumlah Citra yang digunakan pada pengolahan PS-InSAR Sentinel 1A telah sesuai dengan referensi jumlah data SAR menurut Virk, Singh, dan Mittal (2019) yaitu sebanyak 20 citra. 20 Citra Sentinel 1A dipilih berdasarkan pemilihan bulan akuisisi yang konsisten tiap tahun.

Panjang *baseline* merupakan faktor terpenting dalam mengukur besar *surface deformation* dengan InSAR. Dari hasil *input dataset selection* tersebut, menurut Ferreti dkk. (2007), *perpendicular baseline* yang optimal yaitu dengan batas 150 dan 300 meter. Hal ini dapat berpengaruh terhadap pengolahan citra selanjutnya yaitu pada proses interferogram. Interferogram dengan *baseline* yang pendek dapat lebih mudah untuk dilakukan *unwrap* (proses konversi nilai $(-\pi, \pi)$ radian menjadi nilai metrik pada proses InSAR). Sehingga berdasarkan hasil rincian data akuisisi SAR yang digunakan untuk penelitian ini, pada Tabel 4.1 terdapat beberapa data akuisisi yang memiliki nilai *perpendicular baseline* lebih dari 300 meter. Sedangkan pada Tabel 4.2 seluruh data akuisisi SAR memiliki *perpendicular baseline* yang optimal kurang dari 150 meter. Menurut Kurniawan dan Anjasmara (2016), apabila *perpendicular baseline* antara citra *master* dan *slave* semakin panjang, maka tingkat koherensi citra akan terus menurun karena semakin jauh perbedaan posisi satelit dalam melakukan perekaman, maka nilai dari *incidence angle* antar kedua posisi satelit juga akan semakin berbeda. Hal tersebut akan

mengakibatkan karakteristik objek pada kedua posisi semakin berbeda dan menimbulkan *low coherence value.*

Selain pengaturan *perpendicular baseline*, *temporal baseline* juga perlu diperhatikan. Menurut Kurniawan dan Anjasmara (2016), untuk mencegah rendahnya nilai koherensi pada citra akibat dekorelasi temporal, maka diperlukan data yang cukup banyak dengan jarak temporal dan *baseline* yang berdekatan. Untuk jarak temporal dapat dilakukan akuisisi data setiap 6 bulan dengan jarak *baseline* ≤ 150 meter. Apabila ditinjau dari hasil rincian akuisisi citra SAR pada Tabel 4.1 dan 4.2, Tabel 4.2 akusisi antar citra dilakukan kurang dari 6 bulan secara konsisten dan memiliki jarak *baseline* antar citra ≤ 150 meter sedangkan pada Tabel 4.1 menunjukkan akuisisi data antar citra yang dilakukan lebih dari 6 bulan dan jarak *baseline* antar citra > 150 meter. Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan ketersediaan data citra SAR ALOS PALSAR-1 pada wilayah penelitian.

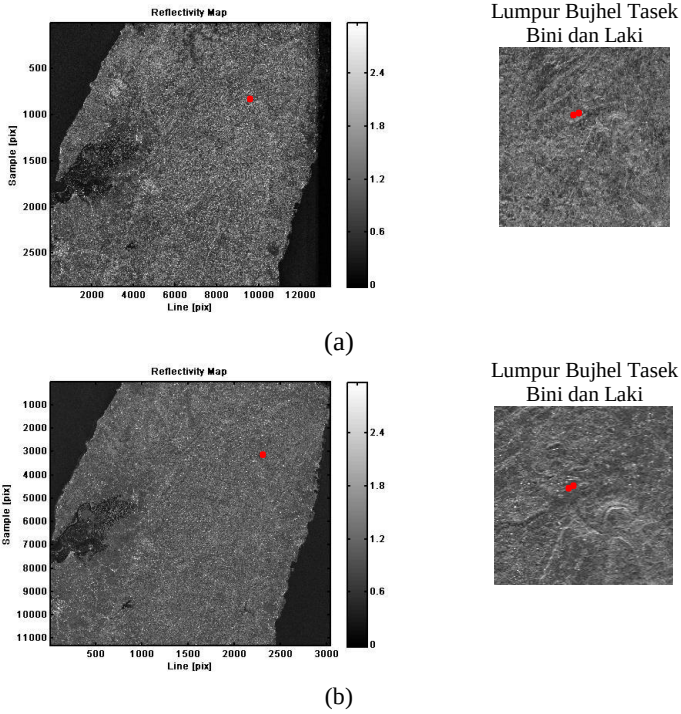
Dari hasil penjelasan tersebut, maka data SAR yang digunakan pada Tabel 4.2 dimungkinkan dapat menghasilkan data interferogram yang lebih baik dibandingkan data akuisisi pada Tabel 4.1 karena data yang digunakan memiliki rentang *temporal baseline* yang lebih rapat dan nilai *perpendicular baseline* yang sesuai.

4.1.2 Hasil *Preliminary Analysis*

Peta reflektifitas penting untuk dihasilkan karena dihasilkan melalui pemasangan set data bersama yang sangat berkorelasi satu sama lain sehingga citra memiliki nilai tinggi *signal-noise-ratio* (SNR) yang penting untuk mengurangi kemungkinan *noise*. Peta reflektifitas adalah hasil nilai perhitungan amplitudo rata-rata dari semua gambar. Amplitudo diukur dalam volt. Hasil nilai berasal dari normalisasi amplitudo yang diplot antara nol hingga tiga. 0 mewakili piksel paling gelap dan 3 mewakili piksel paling terang (Asopa, Kumar, dan Thakur 2018).

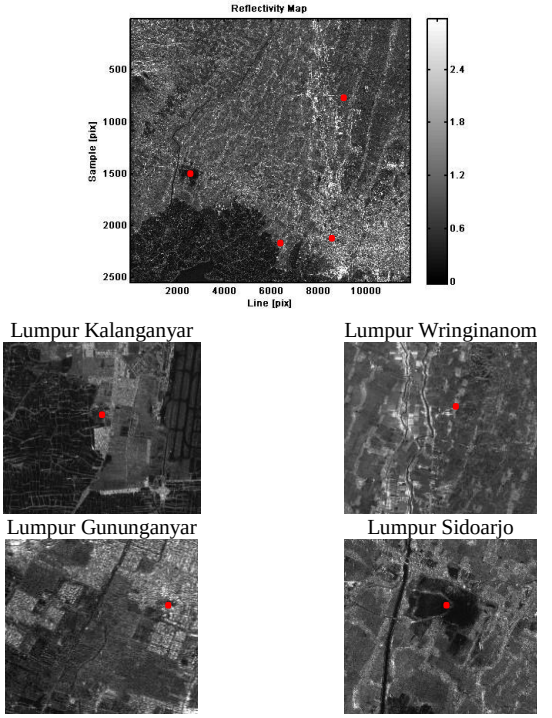
Peta reflektifitas hasil pasangan Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 didapatkan 5.579.475 titik dengan radius

wilayah AOI sebesar 18 km. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.3 (a), sedangkan peta reflektifitas hasil pasangan Citra Sentinel 1A pada *Subswath* IW 2 pada Gambar 4.3 (b) dihasilkan 3.846.127 titik dengan radius wilayah AOI sebesar 16 km.

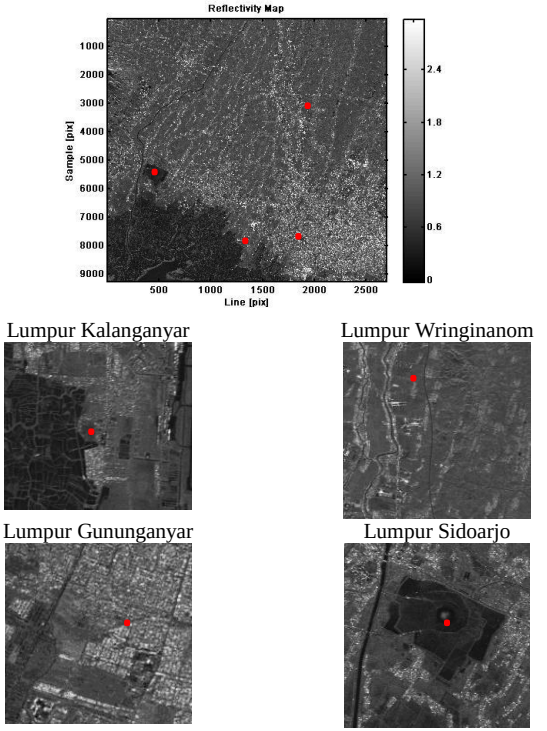


Gambar 18.3 Peta reflektifitas hasil pasangan (a) Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040, (b) Citra Sentinel 1A pada *subswath* IW 2. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur

Sedangkan hasil peta reflektifitas hasil pasangan Citra ALOS PALSAR *path* 427 *frame* 7030 didapatkan 4.426.312 titik, hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.4, sedangkan peta reflektifitas hasil pasangan Citra Sentinel 1A pada *Subswath* IW 1 pada Gambar 4.5 (b) dihasilkan 2.880.667 titik.



Gambar 4.4 Peta reflektifitas hasil pasangan Citra ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur



Gambar 4.5 Peta reflektifitas hasil pasangan Citra Sentinel 1A pada *subswath* IW 1. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur

Dari hasil peta reflektifitas dapat terlihat dengan jelas bahwa di wilayah studi yang memiliki banyak piksel yang memiliki reflektivitas tinggi didapatkan hamburan balik dari piksel resolusi tanah tertentu yang stabil sepanjang waktu, dan sebaliknya, piksel gelap mewakili keberadaan objek yang tidak tetap seperti vegetasi dan air.

Setelah dihasilkan peta reflektifitas, maka terbentuk luaran grid dan melakukan komputasi cepat seleksi titik sebaran (*scatter*). Fungsi grid yaitu untuk memastikan distribusi homogen pada titik sebaran (*scatter*) (Asopa, Kumar, dan Thakur 2018). Hasil peta

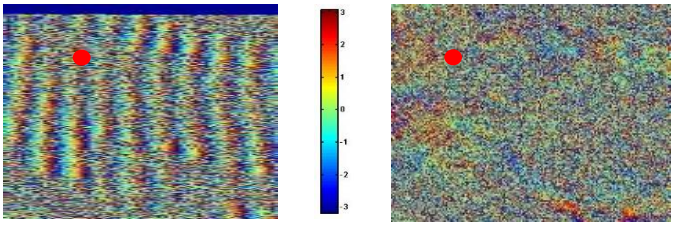
reflektifitas dapat digunakan sebagai parameter penentuan GCP (*Ground Control Point*) pada proses *preliminary geocoding* yang digunakan sebagai titik acuan koordinat citra terhadap koordinat yang sebenarnya. Nilai reflektifitas juga dapat digunakan sebagai penentuan titik PSC (*Permanent Scatterer Candidate*).

4.1.3 Hasil InSAR

InSAR memanfaatkan koherensi dalam pengukuran fase untuk mendapatkan beda jarak dan perubahan jarak dari dua atau lebih citra kompleks pada permukaan yang sama. Dua data tersebut terdiri dari *master* (referensi) dan *slave*, keduanya diproses sehingga membentuk interferogram yang didalamnya berisi informasi *phase* dan amplitudo.

Interferogram *phase* menggambarkan area penelitian yang masih mengandung unsur topografi, *noise*, atmosfer serta dipengaruhi oleh pencitraan kesamping (*side looking*). Untuk menghilangkan *side looking* maka perlu dilakukan pendataran atau *side looking* ke bidang proyeksi (Kusma 2008). Untuk menghilangkan unsur topografi, maka diperlukan proses DEM *removal*. Pada tahap ini dibutuhkan DEM SRTM yang sebelumnya telah dilakukan proses *preliminary geocoding*. Kemudian, untuk *noise* dan atmosfer berhubungan dengan *thermal disturbance* (perpindahan panas akibat suhu) terhadap nilai fase yang didapatkan. Oleh karena itu pada proses ini dilakukan *filtering*. Seluruh rangkaian pengolahan interferogram berada pada pengolahan InSAR *Processing* pada *Software* SarProZ. Adanya deformasi muka tanah dapat ditunjukkan pada hasil interferogram dengan munculnya *fringes* (rumbai-rumbai) pada interferogram akibat perbedaan fasa pencitraan antar lintasan (Prasetyo 2010), dalam satuan $(-\pi,\pi)$ radian.

Pada Gambar 4.6 menunjukkan contoh hasil interferogram wilayah Pulau Madura, Jawa Timur antara Citra ALOS PALSAR-1 pada *path* 426 *frame* 7040 dan Citra Sentinel 1A *subswath* IW 2. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur.



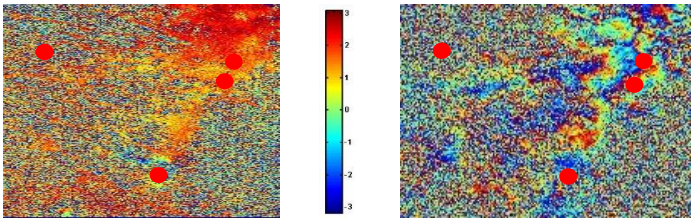
15/09/2007 – 17/06/2008 27/12/2015 – 10/10/2016

(a) (b)

Gambar 4.6 Contoh hasil interferogram (a) Citra ALOS PALSAR-1 pada *path* 426 *frame* 7040 dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW2

Hasil interferogram Citra ALOS PALSAR-1 pada *path* 426 *frame* 7040 menunjukkan pola fringes beraturan secara vertikal hampir diseluruh wilayah penelitian dengan akuisisi data di Tahun 2007-2009, sedangkan pada Citra Sentinel 1A *subswath* IW2 menunjukkan pola fringes yang tidak beraturan pada bagian pesisir pantai dengan akuisisi data di Tahun 2015-2019.

Sedangkan pada Gambar 4.7 merupakan contoh hasil interferogram pada wilayah Jawa Timur daratan, Provinsi Jawa Timur antara Citra ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 dan Citra Sentinel 1A *subswath* IW 1. Dot (.) merah menunjukkan lokasi manifestasi gunung lumpur.



02/07/2007 – 04/07/2008 27/12/2015 – 10/10/2016

(a) (b)

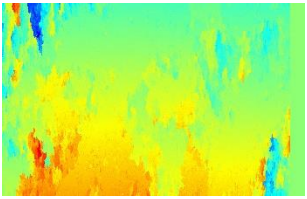
Gambar 4.7 Contoh hasil interferogram (a) Citra ALOS PALSAR pada *path* 427 *frame* 7030, dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW1

Hasil interferogram Citra ALOS PALSAR pada *path* 427 *frame* 7030 menunjukkan pola *fringes* yang tidak terbentuk dengan jelas

pada tahun 2007-2009, hanya wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo yang membentuk pola fringes dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat deformasi muka tanah yang signifikan disekitar wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo akibat aktifitas yang dihasilkan dari munculnya gunung lumpur tersebut. Sedangkan hasil interferogram Citra Sentinel 1A *subswath* IW2 menujukkan pola fringes yang jelas pada masing-masing wilayah manifestasi gunung lumpur di tahun 2015-2019.

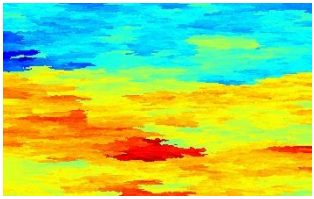
Setelah dilakukan proses interferogram, maka dilanjutkan dengan proses *phase unwrapping*. *Phase unwrapping* adalah salah satu proses utama dalam merekonstruksi model elevasi digital dari sebuah model dari data InSAR, dimana fase interferometrik yang diperoleh adalah nilai utama dari fase absolut atau pengamatan modulo-2π yang sesuai untuk topografi atau deformasi dan disebut *wrapped phase*. Dalam kondisi ini, *phase unwrapping* diperlukan untuk proses penyelesaian fase absolut melalui *wrapped phase*. Diasumsikan fase tersebut mensyaratkan bahwa daerah yang diukur memiliki kontinuitas spasial (Lin dkk. 2018).

Pemrosesan *phase unwrapping* pada penelitian ini menggunakan *phase unwrapping* dengan metode *standard*. Pengaturan metode *standard* merupakan pengaturan dengan cara mengonversi piksel demi piksel pada interferogram. Adapun contoh hasil pengolahan *phase unwrapping* dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



15/09/2007 – 17/06/2008

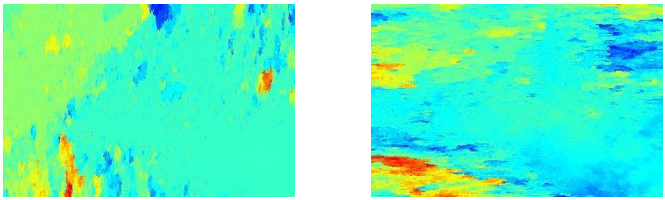
(a)



27/12/2015 – 10/10/2016

(b)

Gambar 4.8 Contoh hasil pengolahan *phase unwrapping* (a) Citra ALOS PALSAR-1 pada *path* 426 *frame* 7040 dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW2



02/07/2007 – 04/07/2008 (a)

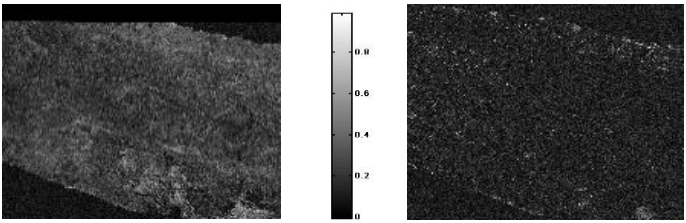
27/12/2015 – 10/10/2016 (b)

Gambar 19.9 Hasil pengolahan *phase unwrapping* (a) Citra ALOS PALSAR pada *path* 427 *frame* 7030, dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW1

Selain proses pembentukan interferogram dan *phase unwrapping*, pada proses InSAR juga menghasilkan koherensi. Koherensi merupakan nilai yang digunakan untuk mengestimasi phase *noise* dari citra interferogram (Febriyanti dan Anjasmara 2017). Misalnya, badan air memiliki koherensi rendah karena permukaannya terus bergerak; karena itu citra tampak hitam dalam hasil koherensi (Ferretti dkk. 2007). Daerah perkotaan dan daerah berbatuan dapat mempertahankan tingkat koherensi yang tinggi bahkan setelah beberapa tahun, selan itu gerakan dan perubahan vegetasi juga dapat memengaruhi koherensi. Gerakan daun biasanya akan menyebabkan hilangnya koherensi total, tetapi tidak menyiratkan bahwa area vegetasi akan selalu muncul dengan koherensi nol. Radiasi akan dapat menembus dedaunan, setidaknya sebagian, dan dapat terserap kembali oleh medan di bawahnya atau oleh batang dan cabang-cabang pohon, yang secara mekanis jauh lebih stabil dan karenanya akan berkontribusi pada koherensi (Engdahl dan Hyyppä 2003). Hasil nilai koherensi memiliki rentang nilai dari nol hingga satu. Dimana jika nilai koherensi sama dengan satu menunjukkan bahwa citra *master* dan *slave* pada interferogram benar-benar identik, begitu pula sebaliknya dengan nilai koherensi sama dengan nol (Febriyanti dan Anjasmara 2017).

ALOS PALSAR-1 memiliki panjang gelombang L-*band* lebih panjang sebesar 23,6 cm, dan oleh karena itu *critical baseline* yang dimiliki lebih besar daripada data Sentinel 1A dengan panjang gelombang C-*band* sebesar 5,6 cm. Karakteristik ini

memungkinkan L-*band* SAR untuk dapat menembus vegetasi dan menghasilkan interferogram berkualitas tinggi di area vegetasi atau koherensi rendah untuk pemantauan lereng yang tidak stabil. Gambar 4.10 merupakan contoh perbandingan koherensi citra ALOS PALSAR-1 dan Sentinel 1A pada wilayah Pulau Madura, Jawa Timur. Daerah penelitian tersebut didominasi dengan area vegetasi.

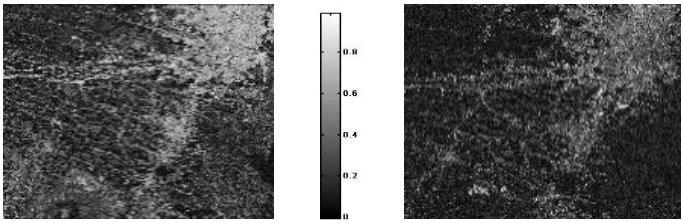


15/09/2007 – 17/06/2008 (a)

27/12/2015 – 10/10/2016 (b)

Gambar 20.10 Contoh perbandingan koherensi citra di wilayah Pulau Madura, Jawa Timur pada (a) Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040, dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW2

Sedangkan pada Gambar 4.11 merupakan contoh perbandingan koherensi citra ALOS PALSAR-1 dan Sentinel 1A pada wilayah Pulau Jawa ,Provinsi Jawa Timur, dimana wilayah yang terekam terdapat perpaduan antara vegetasi dan wilayah perkotaan. Seluruh hasil interferogram dan koherensi dapat dilihat pada Lampiran 1 hingga Lampiran 4.



02/07/2007 – 04/07/2008

27/12/2015 – 10/10/2016

(a) (b)

Gambar 4.21 Contoh perbandingan koherensi citra di wilayah Jawa Timur daratan, Provinsi Jawa Timur pada (a) Citra ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 , dan (b) Citra Sentinel 1A *subswath* IW1

Ditinjau dari hasil Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 terlihat adanya perbedaan koherensi dimana koherensi dengan nilai bukan nol yang dihasilkan oleh Citra ALOS PALSAR-1 dominan tinggi dibandingkan koherensi yang dihasilkan oleh Citra Sentinel 1A. Hal ini mengakibatkan Citra ALOS PALSAR dapat mendeteksi titik PSC (*Permanent Scatterer Candidates*) hingga wilayah perairan. Maka dari itu diperlukan pemotongan daerah (subset) pada wilayah perairan, agar titik PSc tidak dapat mendeteksi titik PS pada perairan.

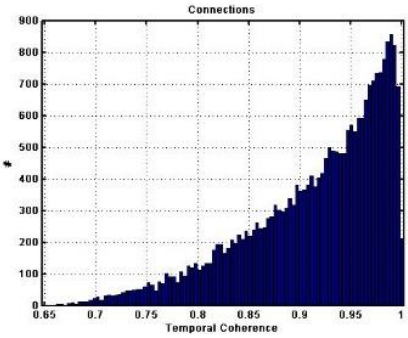
4.1.4 Hasil PS-InSAR

Deformasi muka tanah daerah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur yang berada pada Wilayah Cekungan Jawa Timur diestimasi menggunakan teknik PS-InSAR dalam penelitian ini. Teknik PS-InSAR menggunakan sejumlah besar set data untuk secara tepat memperkirakan dan menghapus kesalahan fase karena atmosfer dan topografi. Pemilihan piksel PS (*Permanent Scaterrers*) menggunakan stabilitas amplitudo dan stabilitas fase untuk memastikan kepadatan piksel PS yang tinggi.

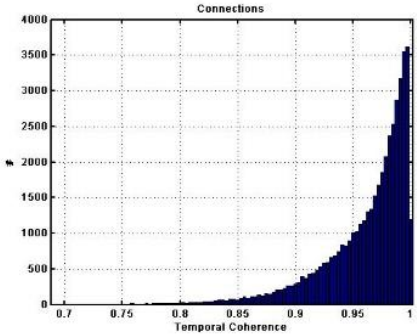
Ferretti dkk. (2001) merekomendasikan ambang batas yang sesuai untuk memilih PS pertama ketika *Amplitude Stability Index* (ASI) > 0,75 (D_A < 0,25). Sehingga dalam penelitian ini ditetapkan batas ambang pengaturan ASI 0,8 untuk seleksi PS pertama pada seluruh set data citra SAR. Pada titik sebaram (*scatter*) ALOS PALSAR-1 dan Sentinel 1A hanya sejumlah kecil poin yang memenuhi parameter ketat ini, namun, kondisi ini diperlukan untuk mendapatkan estimasi APS yang benar. Hanya ada beberapa lokasi dengan nilai-nilai ASI yang cukup tinggi. Dengan demikian, lebih sedikit poin yang dipilih untuk diproses lebih lanjut. Kualitas estimasi APS dinilai dengan analisis koherensi temporal PS setelah inversi grafik dan penghapusan APS.

Pada proses *Atmospheric Phase Screen* (APS) *Estimation* didapatkan hasil *temporal coherence* pada proses *connection processing*. *Connection processing* yaitu proses mengestimasi beberapa parameter seperti estimasi *linear trend* dan ketinggian yang disesuaikan dengan DEM Eksternal. Pada Gambar 4.10, menunjukkan histogram *temporal coherence* pada wilayah Pulau Madura, Jawa Timur.

(a)



(b)



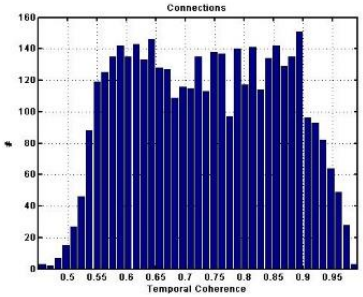
Gambar 4.22 Histogram *temporal coherence* pada proses APS *Estimation* Citra ALOS PALSAR-1 (a) *path* 426 *frame* 7040 , dan (b) *path* 427 *frame* 7030

Gambar 4.10 (a) dan (b) menunjukkan bahwa *temporal coherence* yang dihasilkan dari titik PS yang dihasilkan dari pengaturan *Amplitudo Stability Index* (ASI) dengan batas ambang 0,8 dan parameter batas *linear trend* pada *path* 426 *frame* 7040

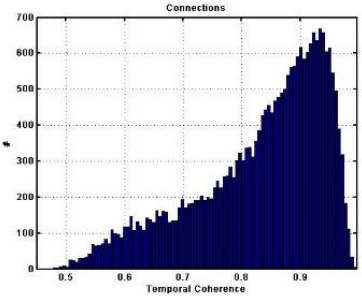
antara -200 hingga 200 mm/tahun dan ketinggian antara -100 hingga 100 m, sedangkan parameter batas *linear trend* pada *path* 427 *frame* 7030 antara -200 hingga 200 mm/tahun dan ketinggian antara -500 hingga 500 m. Pada Gambar 4.10 (a) dan (b) menunjukkan bahwa parameter *linear trend* dan ketinggian menunjukkan bahwa nilai koherensi diatas 0,8 lebih dominan. Apabila nilai *temporal coherence* ≥ 0,8 lebih dominan maka hasil estimasi parameter tersebut dianggap baik. Selain itu, nilai *temporal coherence* yang tinggi menunjukkan semakin baik estimasi parameter dan APS (Sofiadin 2019).

Hal ini berbeda dengan pengaturan pada Sentinel 1A, titik PS yang dihasilkan dari pengaturan *Amplitudo Stability Index* (ASI) dengan batas ambang > 0,8 dan parameter batas *linear trend* antara -60 hingga 60 mm/tahun dan ketinggian antara -200 hingga 200 m pada IW 1 dan parameter batas *linear trend* antara -100 hingga 60 mm/tahun dan ketinggian antara -500 hingga 200 m pada IW 2. Gambar 4.11 (a) menunjukkan nilai koherensi diatas 0,8 kurang dominan dibandingkan dengan Gambar 4.11 (b).

(a)

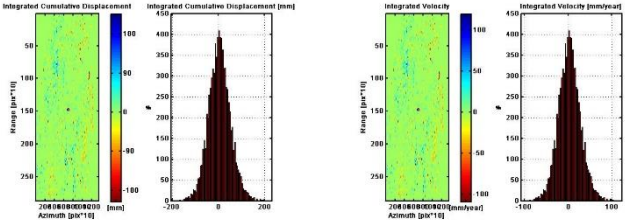


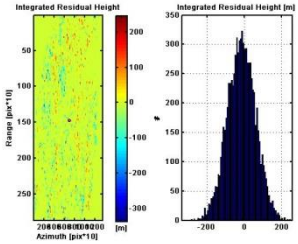
(b)



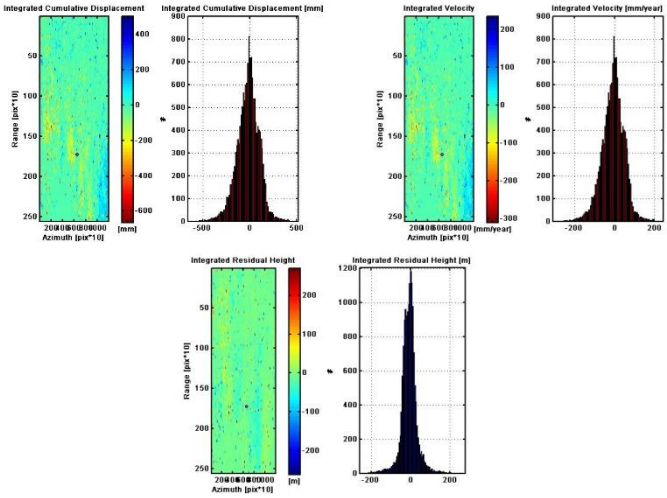
Gambar 4.23 Histogram *temporal coherence* pada proses APS Estimation Citra Sentinel 1A (a) *subswath* IW2, dan (b) *subswath* IW1

Setelah *connection processing*, selanjutnya dilakukan seleksi *sparse point* dan pemilihan titik referensi pada masing-masing pengolahan. Hasil Plotting APS Estimation Citra ALOS PALSAR berdasarkan pemilihan titik referensi dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan 4.13. *Sparse point* adalah piksel yang memenuhi syarat untuk menjadi *Permanent Scatterer*. Setelah memperkirakan kesalahan fase dan titik referensi, koherensi dan parameter lainnya dihitung berdasarkan nilai estimasi tersebut. Kemudian diplot dihasilkan titik-titik yang memenuhi kriteria dengan memiliki stabilitas temporal tertentu, reflektifitas dan trend deformasi. Titik hamburan tersebut diplot menurut lokasi geografisnya pada peta reflektifitas untuk mewakili lokasi kecepatan fitur medan.





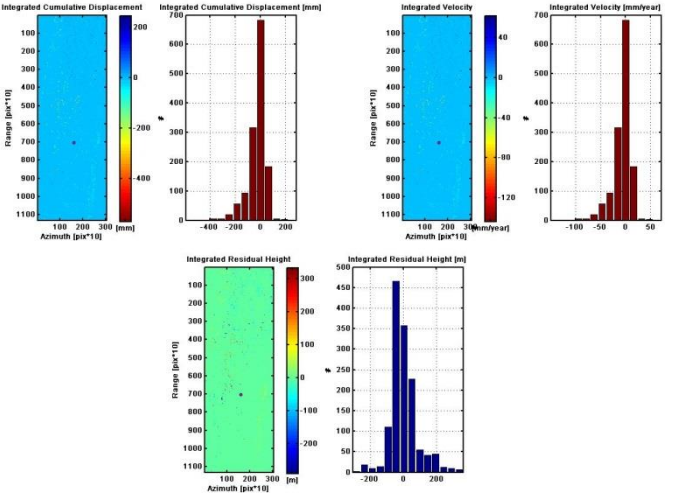
Gambar 4.24 Hasil Plot APS *Estimation* ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 berdasarkan titik referensi.



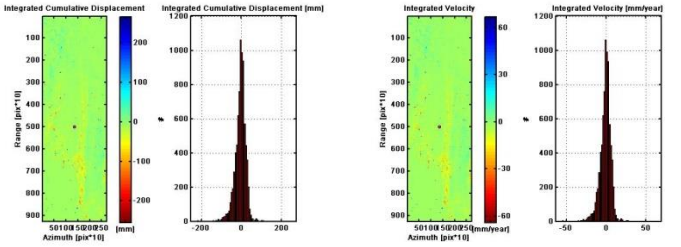
Gambar 4.25 Hasil Plot APS *Estimation* ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 berdasarkan titik referensi

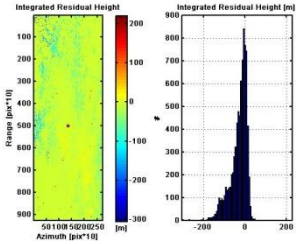
Gambar 4.12 dan 4.13 merupakan gambar hasil pengolahan APS *Estimation* pada data Citra ALOS PALSAR-1. Pada hasil histogram APS *Estimation* menunjukkan sumbu X yang merupakan banyak titik PS dan sumbu Y menunjukkan estimasi nilai parameter. Kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat hasil *sparse point* dengan hasil histogram puncak grafik *integrated velocity, residual height, dan cumulative displacement* berada di nol. Hasil plot pengolahan APS *Estimation* pada data

Citra Sentinel IA juga menghasilkan nilai puncak grafik tertinggi pada nilai nol pada Gambar 4.14 dan 4.15. Hal ini menunjukkan bahwa titik referensi yang dipilih tepat berada di tanah. Selain itu, titik referensi tertinggi berada di puncak nol pada histogram menunjukkan bahwa titik referensi tersebut relative stabil untuk wilayah AOI (*Area Of Interest*).



Gambar 4.26 Hasil Plot APS *Estimation* Sentinel 1A *subswath* IW2 berdasarkan pemilihan titik referensi



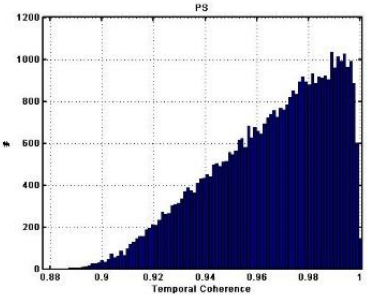


Gambar 4.27 Hasil Plotting APS *Estimation* Sentinel 1A *subswath* IW1 berdasarkan pemilihan titik referensi

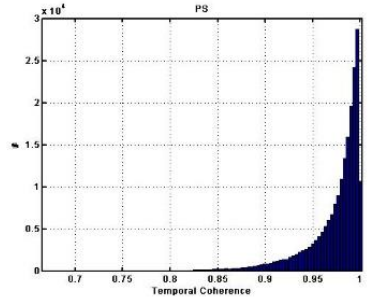
Langkah selanjutnya adalah proses *multi image sparse processing* yaitu pemilihan PS urutan kedua dengan batas ambang ASI diturunkan menjadi 0,76 untuk mendapatkan koleksi PS yang padat. Kemudian pemrosesan akhir dengan penghapusan APS dilakukan dengan menggunakan titik referensi yang sama seperti pengolahan APS sebelumnya. Estimasi parameter yang digunakan pada Sentinel-1A menggunakan batas parameter yang sama seperti pengolah PS pertama, tetapi untuk data ALOS PALSAR-1 menggunakan pengaturan parameter batas yang berbeda yaitu *linear trend* antara -200 hingga 300 mm/tahun dan ketinggian antara -200 hingga 200 m untuk *path* 426 *frame* 7040 dan parameter batas *linear trend* antara -200 hingga 300 mm/tahun dan ketinggian antara -200 hingga 200 m untuk *path* 426 *frame* 7040. Perbedaan pengaturan nilai pada kedua jenis set data tersebut menunjukkan bahwa data pengolahan ALOS PALSAR-1A memiliki titik PS yang tidak konsisten.

Setelah dilakukan *connection processing*, nilai *temporal coherence* kembali dihasilkan pada proses akhir ini. Nilai *temporal coherence* pada Citra ALOS PALSAR ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Nilai *temporal coherence* pada Citra Sentinel 1A ditunjukkan pada Gambar 4.17.

(a)

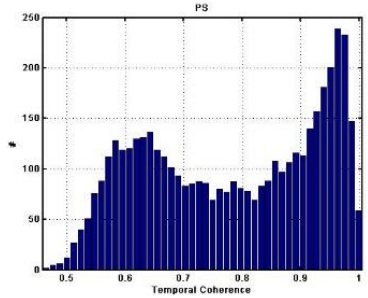


(b)

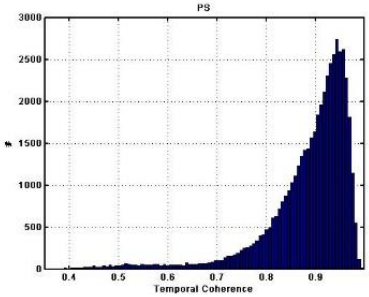


Gambar 4.28 Histogram *temporal coherence* pada *Multi Image Sparse Processing* Citra ALOS PALSAR (a) *path* 426 *frame* 7040 , dan (b) *path* 427 *frame* 7030

(a)

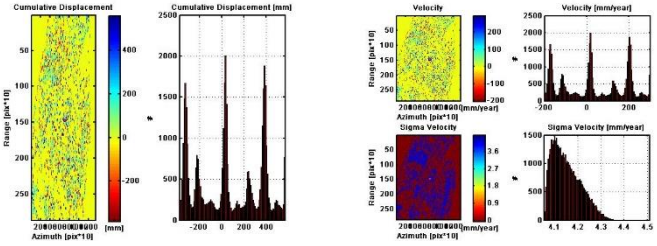


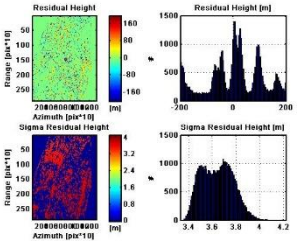
(b)



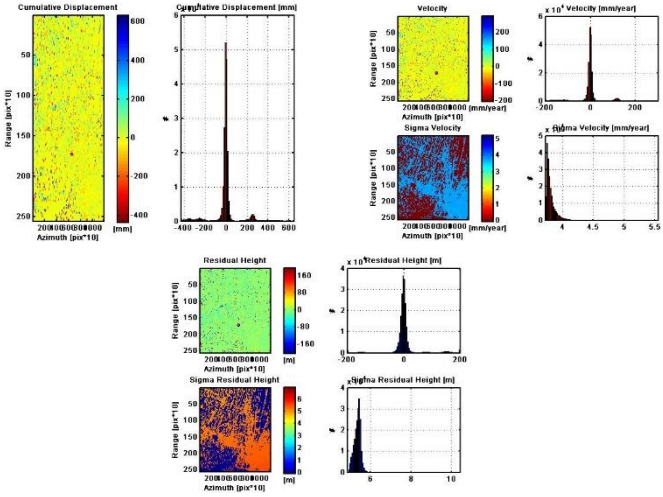
Gambar 4.29 Histogram *temporal coherence* pada *Multi Image Sparse Processing* Citra Sentinel 1A (a) *subswath* IW2, dan (b) *subswath* IW1

Kemudian akan dihasilkan kembali grafik histogram *velocity, residual height, dan cumulative displacement* pada masing-masing olahan citra. Nilai *cumulative displacement* merupakan nilai *velocity* dikali waktu dan *integrated residual height* merupakan nilai dari *integrated height* dikurang nilai ketinggian dari eksternal DEM. Gambar 4.18 dan 4.19 merupakan hasil plot *Multi Image Sparse Processing* Citra ALOS PALSAR-1 dan Gambar 4.20 dan 4.21 merupakan hasil plot *Multi Image Sparse Processing* Citra Sentinel 1A pada wilayah Pulau Madura dan Jawa Timur daratan, Provinsi Jawa Timur.

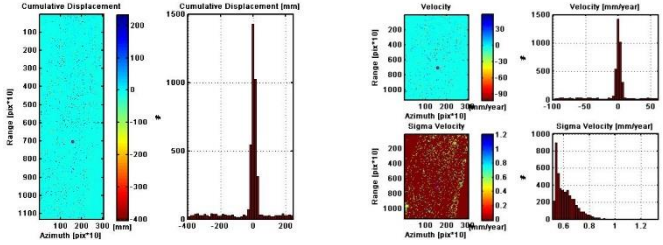


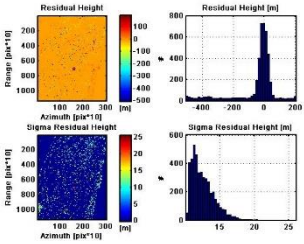


Gambar 4.30 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* Citra ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 berdasarkan titik referensi

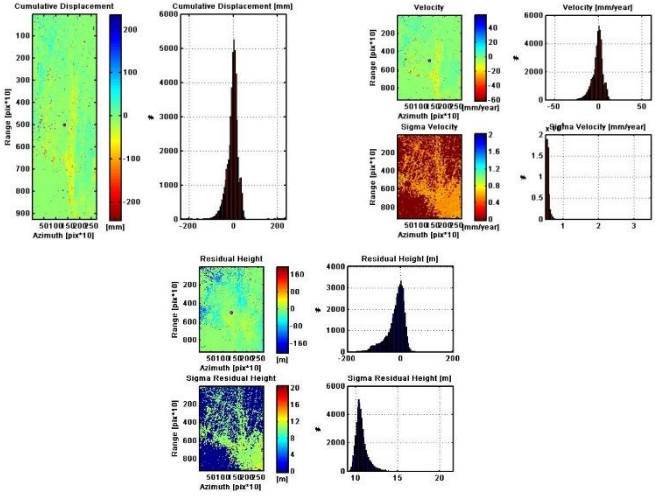


Gambar 4.31 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 berdasarkan titik referensi





Gambar 4.32 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* Sentinel 1A *subswath* IW2 berdasarkan titik referensi



Gambar 4.33 Hasil Plot *Multi Image Sparse Processing* Sentinel 1A *subswath* IW1 berdasarkan titik referensi

Set terakhir PS kemudian di-*geocode* dan diplot. Dengan demikian, hanya PS dengan koherensi tinggi dipilih, dimana ditentukan nilai ambang batas sebesar 0,8 dan digunakan dalam peta LOS (*Line-of-Sight*) deformasi. Hasil plot pengolahan PS-InSAR dapat dilihat pada Lampiran 5 hingga Lampiran 8.

Hasil plot pengolahan PS-InSAR pada Citra ALOS PALSAR-1 pada penelitian ini tidak dapat dijadikan sebagai referensi karena jumlah citra tidak sesuai dengan kriteria yang

disarankan untuk dilakukan pengolahan PS-InSAR, hal tersebut berpengaruh terhadap ketinggian hasil titik PS karena jauhnya *baseline* citra terhadap data DEM dan menyebabkan adanya *Topographic Phase Erro*r yang besar sehingga estimasi parameter titik referensi citra tidak dapat berada di permukaan tanah pada nilai ketinggian yang sebenarnya. Hasil plot ini merupakan hasil estimasi parameter *linear trend* dan ketinggian yang diatur pada nilai tertentu agar titik referensi citra tepat berada di puncak nol histogram. Sedangkan hasil plot titik PS pada Cita Sentinel 1A dapat dijadikan referensi acuan karena semua syarat untuk dilakukan pengolahan PS-InSAR telah sesuai.

4.2 Hasil Nilai Dan Pola Deformasi Muka Tanah

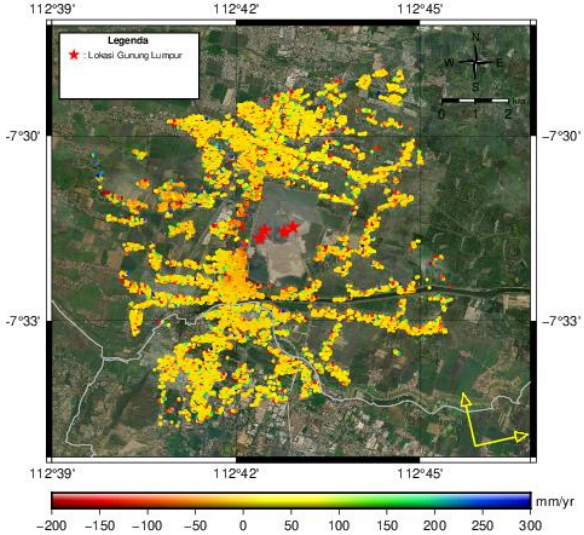
Hasil plot PS-InSAR yang ditampilkan dalam penelitian ini yaitu estimasi nilai *velocity*, standar deviasi, dan LOS *cumulative displacement*. Nilai *velocity* yaitu nilai yang dihasilkan berdasarkan kecepatan pergeseran nilai data dari posisi satu ke posisi yang lain, sedangkan simpangan baku atau standar deviasi adalah ukuran yang digunakan untuk mengukur jumlah variasi atau sebaran sejumlah set nilai data (Ulin 2012). Data simpangan baku yang dihasilkan berbeda dari tiap tahap pengolahan. Sedangkan hasil LOS *cumulative displacement* yaitu nilai selisih perpindahan dari suatu koordinat yang dihitung berdasarkan LOS satelit ke permukaan bumi.

Berikut merupakan hasil plot PS-InSAR berdasarkan estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi, standar deviasi dan LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 dan Sentinel 1A pada wilayah manifestasi gunung lumpur di Cekungan Jawa Timur yang dilakukan dengan jarak radius penelitian sebesar $\pm$ 4,5 km terhadap gunung lumpur dengan wilayah sekitarnya :

- Gunung Lumpur Sidoarjo

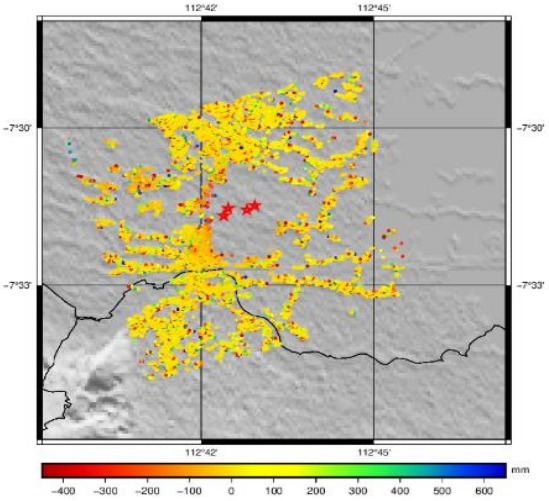
  Titik PS yang dihasilkan Citra ALOS PALSAR-1 pada tahun 2007-2009 pada wilayah manifestasi gunung lumpur sebanyak 10.657 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan

(*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 300 mm per tahun dan terendah sebesar -200 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 4,39 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.24.



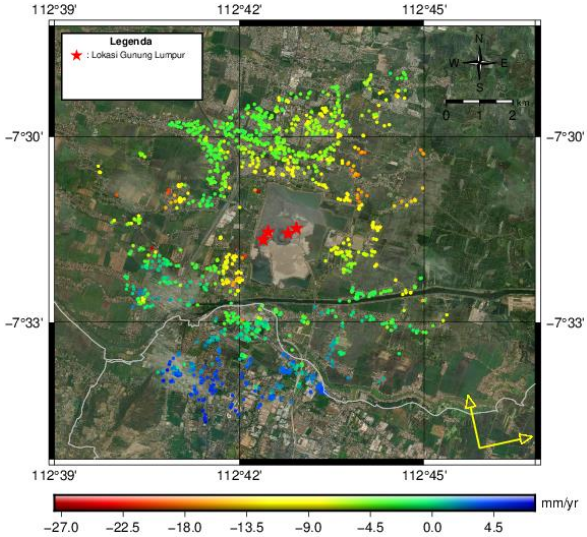
Gambar 4.24 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* ALOS PALSAR-1 yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Sidoarjo dengan nilai tertinggi sebesar 642,30 mm dan nilai terendah sebesar -428,20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.25.



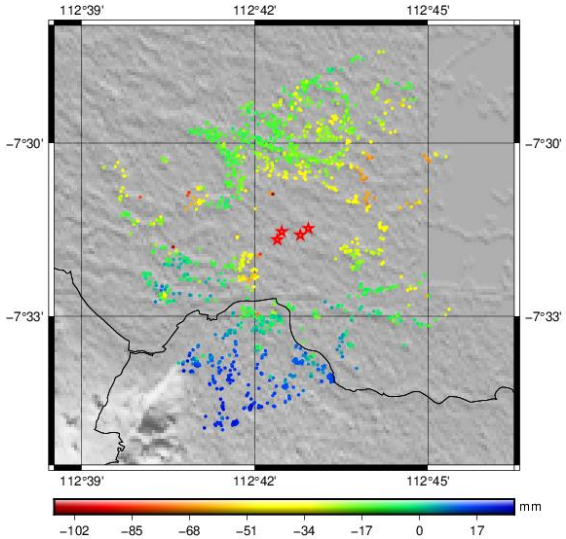
Gambar 4.25 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

Sedangkan titik PS yang dihasilkan Citra Sentinel 1A pada tahun 2015-2019 pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo yaitu 1.390 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 7,03 mm per tahun dan terendah sebesar -27,03 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 2,33 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.26.



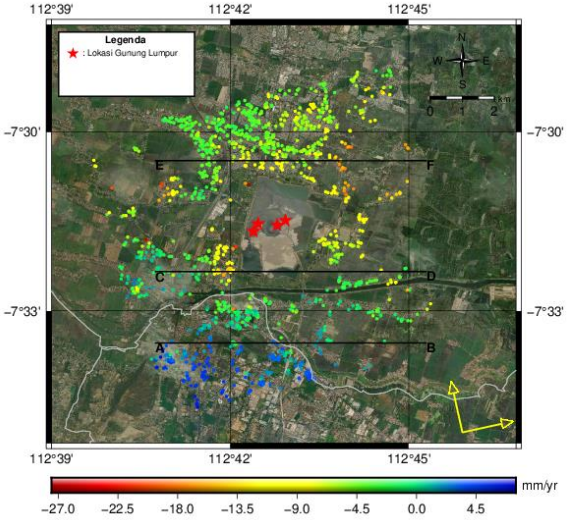
Gambar 4.26 Hasil plot *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* Sentinel 1A yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Sidoarjo dengan nilai tertinggi sebesar 27,96 mm dan nilai terendah sebesar -107,44 mm dapat dilihat pada Gambar 4.27.



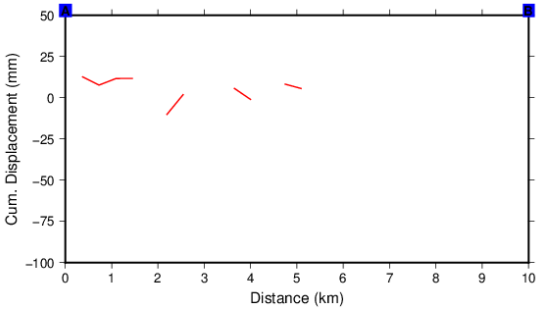
Gambar 4.27 Hasil plot LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

Hasil *plotting* tersebut dilakukan digambarkan dalam profil melintang untuk memperlihatkan pola kenaikan dan penurunan yang terjadi, hal ini dapat dilihat dalam dalam gambar berikut :



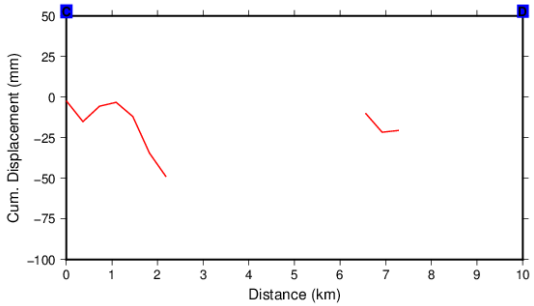
Gambar 4.28 Garis pola profil melintang dari Barat ke Timur pada Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

a. Profil Melintang A ke B (Barat-Timur)



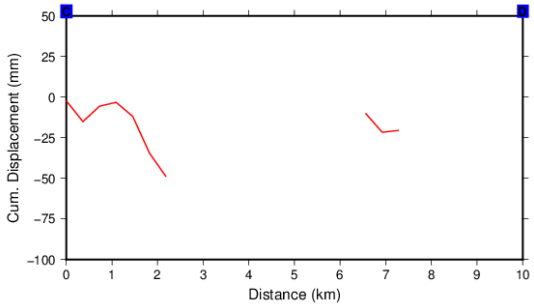
Gambar 4.29 Profil Melintang A ke B (Barat-Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

b. Profil Melintang C ke D (Barat-Timur)

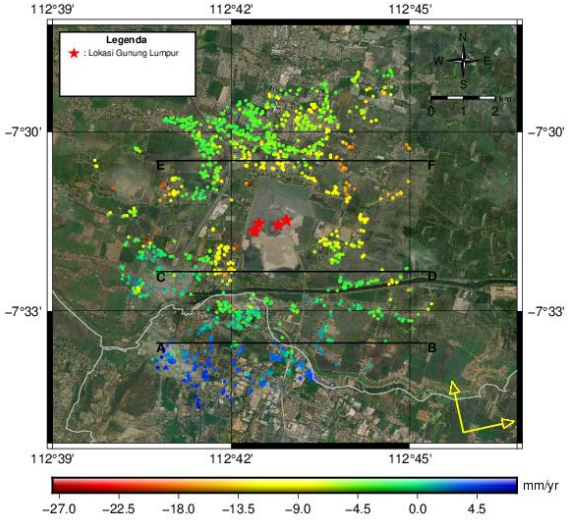


Gambar 4.30 Profil Melintang C ke D (Barat-Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

c. Profil Melintang E ke F (Barat-Timur)

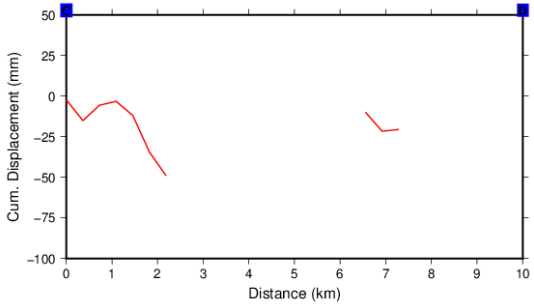


Gambar 4.31 Profil Melintang E ke F (Barat-Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur



Gambar 4.32 Garis pola profil melintang dari Barat Daya ke Timur Laut pada Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

a. Profil Melintang G ke H (Barat Daya-Timur Laut)



Gambar 4.33 Profil Melintang G ke H (Barat Daya-Timur Laut) pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo, Jawa Timur

Maka hasil pengolahan PS-InSAR pada pasangan ALOS PALSAR-1 dan Citra Sentinel 1A untuk deformasi yang terjadi di wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo

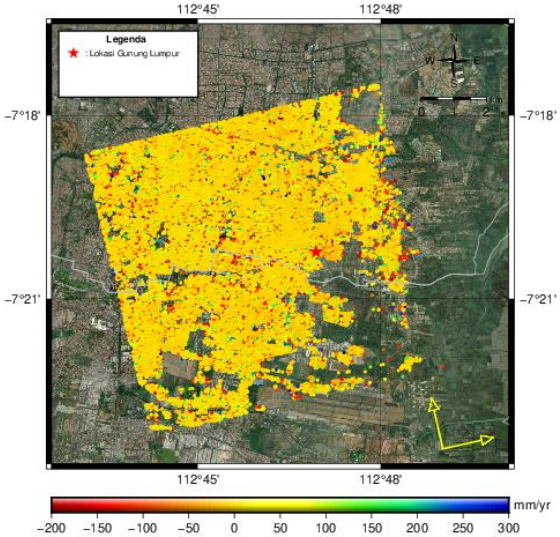
menghasilkan estimasi nilai rata-rata untuk keseluruhan wilayah dengan radius $\pm$ 4,5 km dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.4 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Sidoarjo

Estimasi Nilai Rata-rata Laju Kecepatan Deformasi (mm/thn)			**Estimasi Nilai Rata-rata LOS *cumulative displacement* (mm)**		
ALOS PALSAR-1 Tahun 2007-2009					
Uplift	:	+36,75	*Uplift*	:	+78,69
Subsidence	:	-28,48	*Subsidence*	:	-60,97
Sentinel 1A Tahun 2015-2019					
Uplift	:	+2,62	*Uplift*	:	+12,21
Subsidence	:	-5,46	*Subsidence*	:	-21,15

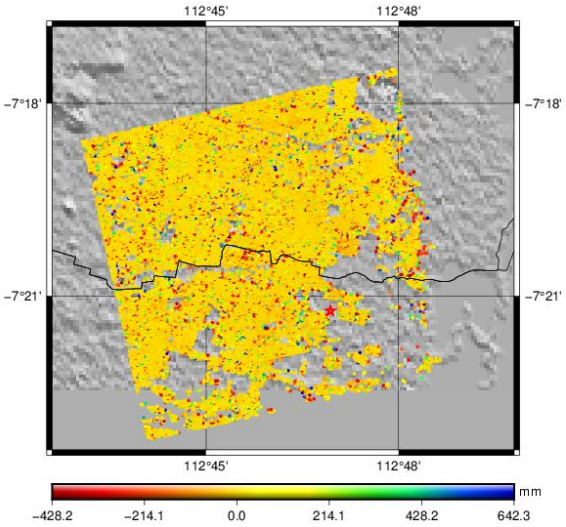
- Gunung Lumpur Gununganyar

Titik PS yang dihasilkan Citra ALOS PALSAR-1 pada tahun 2007-2009 pada wilayah manifestasi gunung Lumpur Gununganyar yaitu 33.737 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 300 mm per tahun dan terendah sebesar -200 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 3,84 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.34.



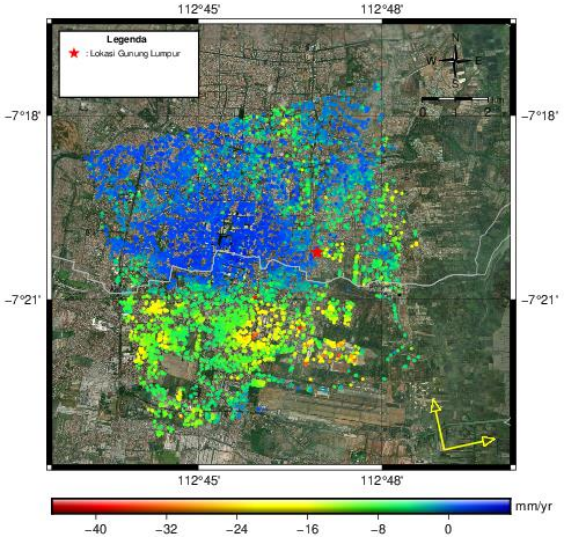
Gambar 4.34 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* ALOS PALSAR-1 yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Gunung Lumpur Gununganyar dengan nilai tertinggi sebesar 642,30 mm dan nilai terendah sebesar -428,20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.35.



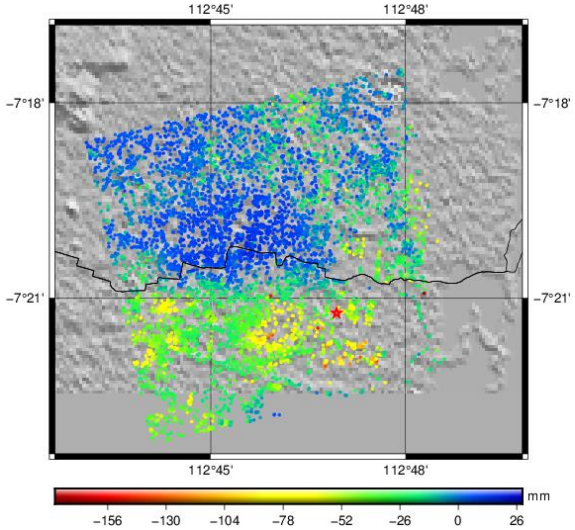
Gambar 4.35 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

Sedangkan titik PS yang dihasilkan Citra Sentinel 1A pada tahun 2015-2019 pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Gununganyar yaitu 6.704 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 7,03 mm per tahun dan terendah sebesar -27,03 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 1,66 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.36.



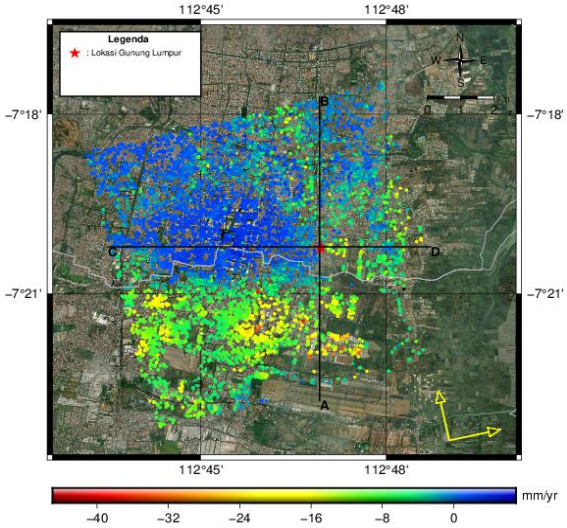
Gambar 4.36 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* Sentinel 1A yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Gununganyar dengan nilai tertinggi sebesar 28,19 mm dan nilai terendah sebesar -179 mm dapat dilihat pada Gambar 4.37.



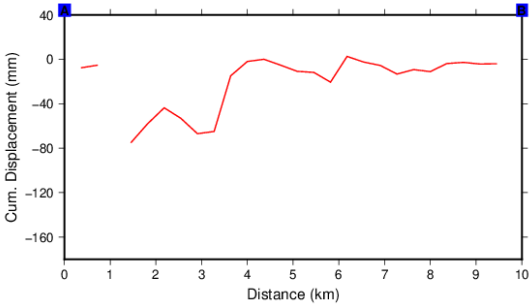
Gambar 4.37 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

Hasil *plotting* tersebut dilakukan digambarkan dalam profil melintang untuk memperlihatkan pola kenaikan dan penurunan yang terjadi, hal ini dapat dilihat dalam dalam gambar berikut :



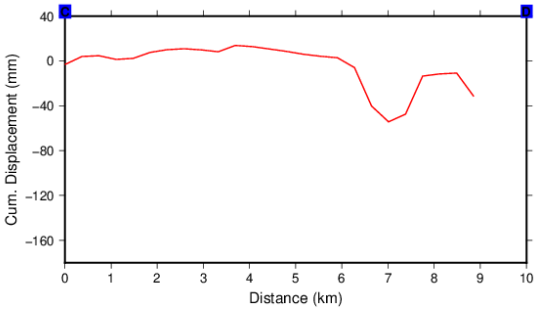
Gambar 4.38 Pola garis profil melintang dari Barat ke Timur dan Selatan ke Utara pada Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

a. Profil Melintang A ke B (Selatan ke Utara)



Gambar 4.39 Profil Melintang A ke B (Selatan ke Utara) pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

b. Profil Melintang C ke D (Barat ke Timur)



Gambar 4.40 Profil Melintang C ke D (Barat -Timur) pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar, Jawa Timur

Maka hasil pengolahan PS-InSAR pada pasangan ALOS PALSAR-1 dan Citra Sentinel 1A untuk deformasi yang terjadi di wilayah Gunung Lumpur Gununganyar menghasilkan estimasi nilai rata-rata untuk keseluruhan wilayah dengan radius ± 4,5 km dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

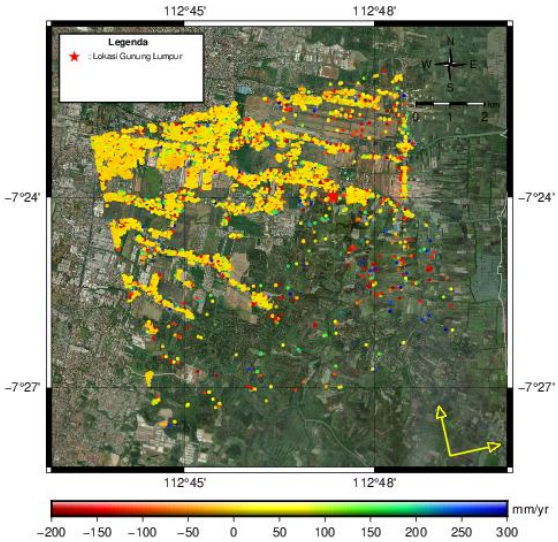
Tabel 4.5 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar

Estimasi Nilai Rata-rata Laju Kecepatan Deformasi (mm/thn)			**Estimasi Nilai Rata-rata LOS *cumulative displacement* (mm)**		
ALOS PALSAR-1 Tahun 2007-2009					
Uplift	:	+31,41	*Uplift*	:	+67,20
Subsidence	:	-16,70	*Subsidence*	:	-35,74
Sentinel 1A Tahun 2015-2019					
Uplift	:	+1,71	*Uplift*	:	+6.77
Subsidence	:	-7,08	*Subsidence*	:	-28.22

- Gunung Lumpur Kalanganyar

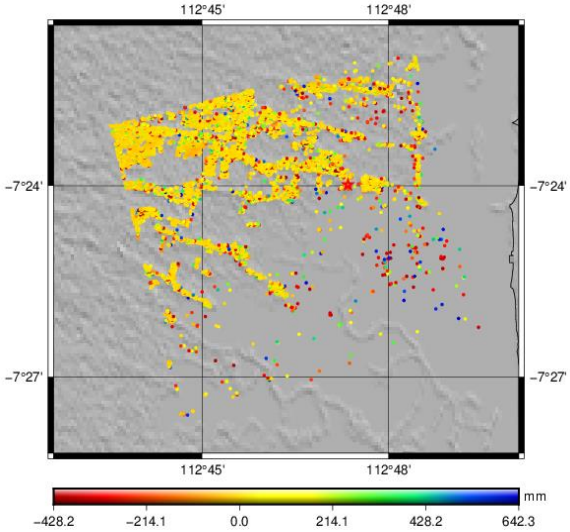
Titik PS yang dihasilkan Citra ALOS PALSAR-1 pada tahun 2007-2009 pada wilayah manifestasi gunung lumpur

yaitu 7.745 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 300 mm per tahun dan terendah sebesar -200 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 4,26 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.41.



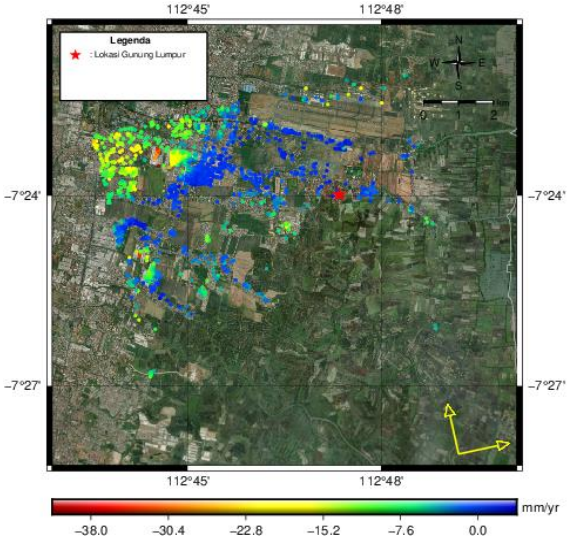
Gambar 4.41 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* ALOS PALSAR-1 yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Kalanganyar dengan nilai tertinggi sebesar 642,30 mm dan nilai terendah sebesar -428,20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.42.



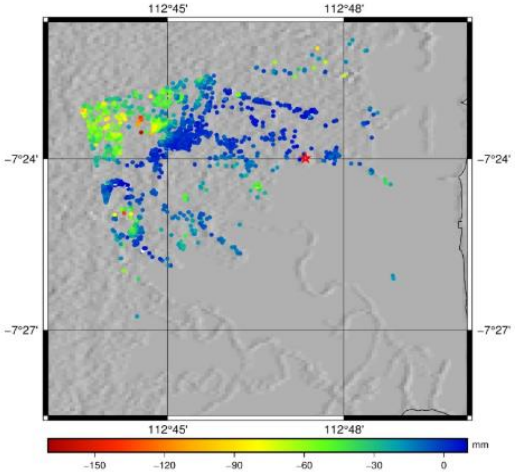
Gambar 4.42 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur

Sedangkan titik PS yang dihasilkan Citra Sentinel 1A pada tahun 2015-2019 pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Kalanganyar yaitu 2.136 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 3,52 mm per tahun dan terendah sebesar -41,73 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 1,76 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.43.



Gambar 4.43 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* Sentinel 1A yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Kalanganyar dengan nilai tertinggi sebesar 14,01 mm dan nilai terendah sebesar -165,89 mm dapat dilihat pada Gambar 4.44.



Gambar 4.44 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar, Jawa Timur

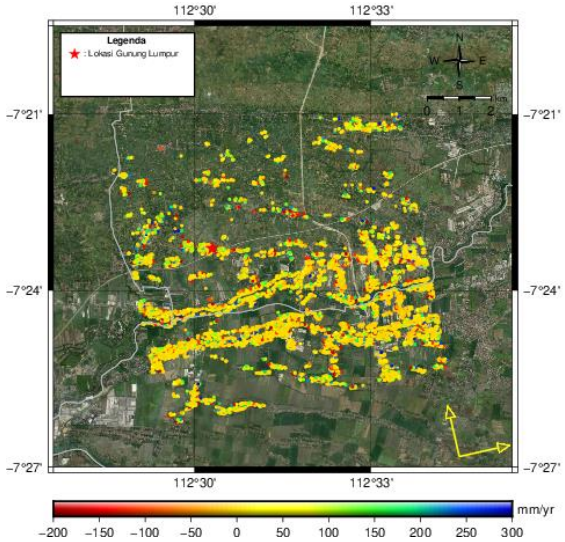
Maka hasil pengolahan PS-InSAR pada pasangan ALOS PALSAR-1 dan Citra Sentinel 1A untuk deformasi yang terjadi di wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar menghasilkan estimasi nilai rata-rata untuk keseluruhan wilayah dengan radius $\pm$ 4,5 km dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.6 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Kalanganyar

Estimasi Nilai Rata-rata Laju Kecepatan Deformasi (mm/thn)			**Estimasi Nilai Rata-rata LOS *cumulative displacement* (mm)**		
ALOS PALSAR-1 Tahun 2007-2009					
Uplift	:	+34,73	*Uplift*	:	+74,36
Subsidence	:	-27,83	*Subsidence*	:	-59,58
Sentinel 1A Tahun 2015-2019					
Uplift	:	+0,99	*Uplift*	:	+3,94
Subsidence	:	-6,81	*Subsidence*	:	-27,18

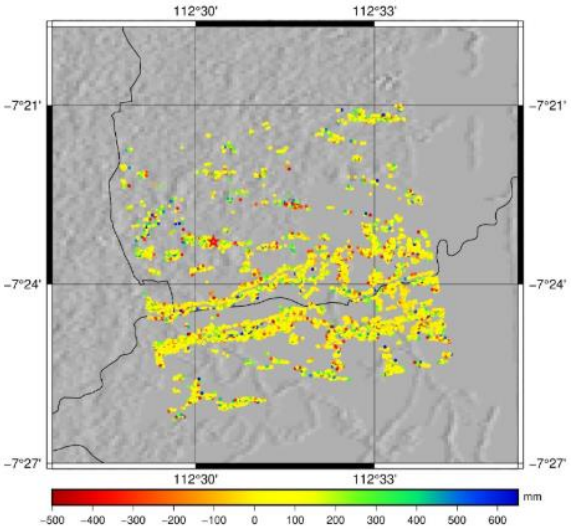
- Gunung Lumpur Wringinanom

Titik PS yang dihasilkan Citra ALOS PALSAR-1 pada tahun 2007-2009 pada wilayah manifestasi gunung lumpur yaitu 6.244 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 300 mm per tahun dan terendah sebesar -200 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 4,28 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.45.



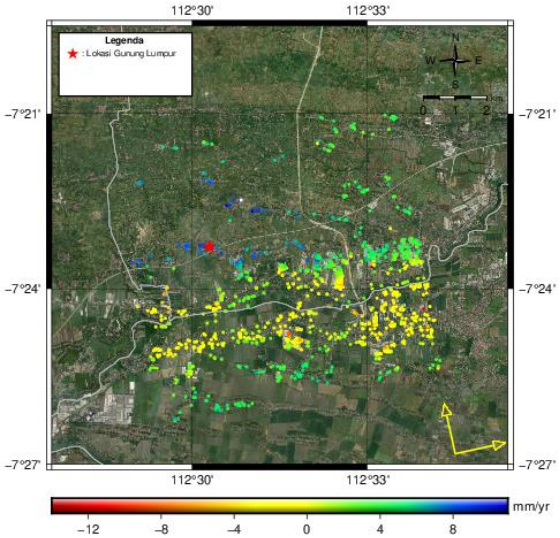
Gambar 4.45 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* ALOS PALSAR-1 yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Wringinanom dengan nilai tertinggi sebesar 642,30 mm dan nilai terendah sebesar -428,20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.46.



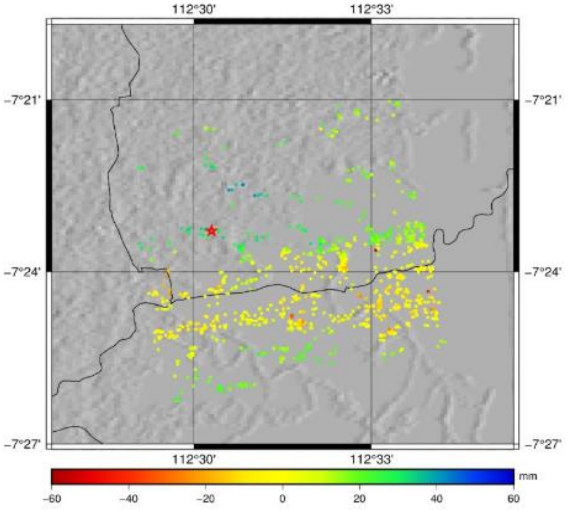
Gambar 4.46 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur

Sedangkan titik PS yang dihasilkan Citra Sentinel 1A pada tahun 2015-2019 pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Wringinanom yaitu 1.230 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 11,03 mm per tahun dan terendah sebesar -13,88 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 1,77 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.47.



Gambar 4.47 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* Sentinel 1A yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Wringinanom dengan nilai tertinggi sebesar 43,86 mm dan nilai terendah sebesar -55,16 mm dapat dilihat pada Gambar 4.48.



Gambar 4.48 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom, Jawa Timur

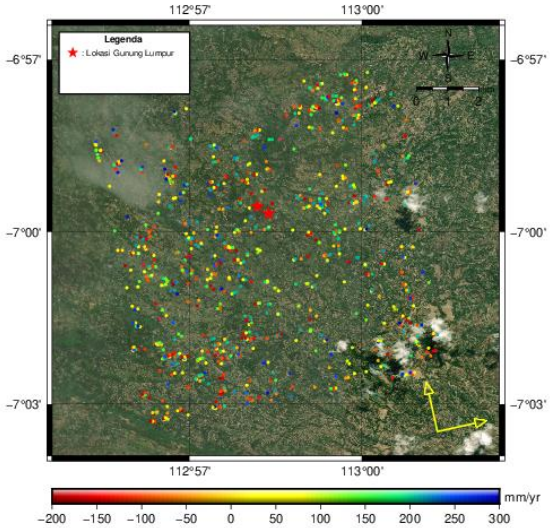
Maka hasil pengolahan PS-InSAR pada pasangan ALOS PALSAR-1 dan Citra Sentinel 1A untuk deformasi yang terjadi di wilayah Gunung Lumpur Wringinanom menghasilkan estimasi nilai rata-rata untuk keseluruhan wilayah dengan radius $\pm$ 4,5 km dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.7 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacemen*t pada wilayah Gunung Lumpur Wringinanom

Estimasi Nilai Rata-rata Laju Kecapatan Deformasi (mm/thn)			**Estimasi Nilai Rata-rata LOS *cumulative displacement* (mm)**		
ALOS PALSAR-1 Tahun 2007-2009					
Uplift	:	+46,87	*Uplift*	:	+100,35
Subsidence	:	-21,52	*Subsidence*	:	-46,08
Sentinel 1A Tahun 2015-2019					
Uplift	:	+3,36	*Uplift*	:	+13,36
Subsidence	:	-1,98	*Subsidence*	:	-7,87

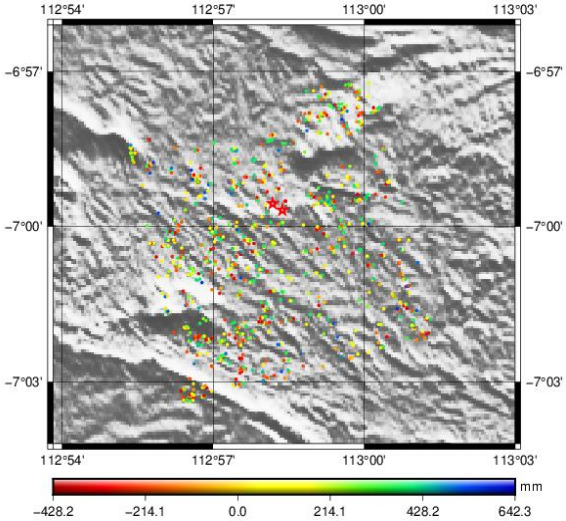
- Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki

Titik PS yang dihasilkan Citra ALOS PALSAR pada tahun 2007-2009 pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki yaitu 917 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 300 mm per tahun dan terendah sebesar -200 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 4,81 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.49.



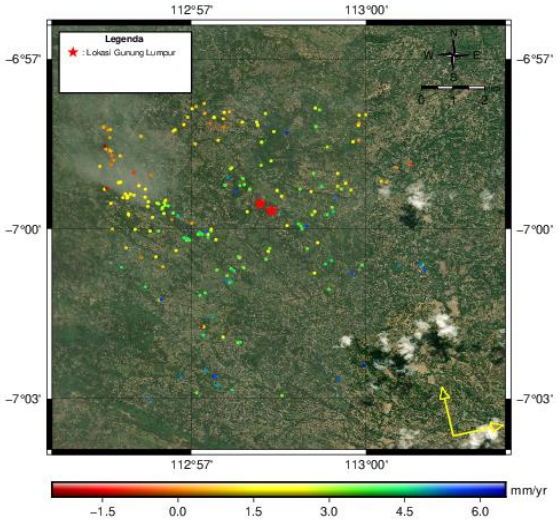
Gambar 4.49 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* ALOS PALSAR-1 yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek dengan nilai tertinggi sebesar 566,74 mm dan nilai terendah sebesar -377,82 mm dapat dilihat pada Gambar 4.50.



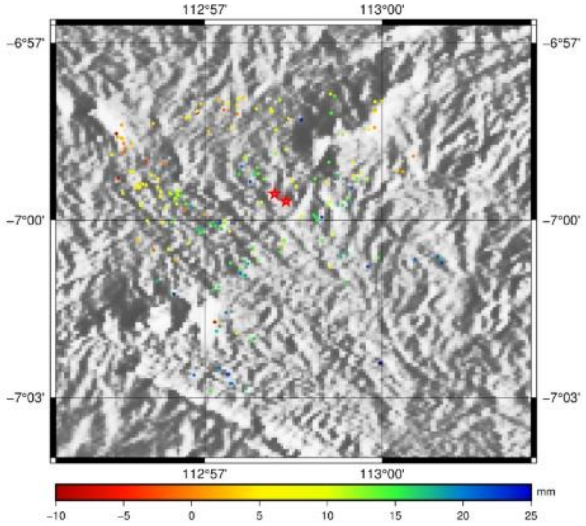
Gambar 4.50 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra ALOS PALSAR-1 pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur

Sedangkan titik PS yang dihasilkan Citra Sentinel 1A pada tahun 2015-2019 pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki yaitu 201 titik. Hasil plot estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan hampir seluruh titik PS disekitar wilayah manifestasi gunung lumpur. Nilai kecepatan deformasi tertinggi sebesar 24,95 mm per tahun dan terendah sebesar -9,72 mm per tahun dengan standar deviasi rata-rata 1,68 mm. Hal ini dapat dilihat dalam Gambar 4.51.



Gambar 4.51 Hasil plot estimasi *velocity rate* PS-InSAR Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur

Adapun hasil LOS *cumulative displacement* Sentinel 1A yang terjadi diwilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek dengan nilai tertinggi sebesar 24,95 mm dan nilai terendah sebesar –9,72 mm dapat dilihat pada Gambar 4.52.



Gambar 4.52 Hasil plot estimasi LOS *cumulative displacement* Citra Sentinel 1A pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki, Jawa Timur

Maka hasil pengolahan PS-InSAR pada pasangan ALOS PALSAR-1 dan Citra Sentinel 1A untuk deformasi yang terjadi di wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek menghasilkan estimasi nilai rata-rata untuk keseluruhan wilayah dengan radius $\pm$ 4,5 km dapat ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.8 Nilai estimasi rata-rata laju kecepatan dan LOS *cumulative displacement* pada wilayah Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki

Estimasi Nilai Rata-rata Laju Kecepatan Deformasi (mm/thn)	**Estimasi Nilai Rata-rata LOS *cumulative displacement* (mm)**
ALOS PALSAR-1 Tahun 2007-2009	
Uplift : +143,09 *Subsidence* : -109,99	*Uplift* : +270,32 *Subsidence* : -207,66
Sentinel 1A Tahun 2015-2019	
Uplift : +2,88 *Subsidence* : -0,83	*Uplift* : +11,76 *Subsidence* : -3,25

4.3 Analisis Identifikasi Deformasi Akibat Fenomena Manifestasi Gunung Lumpur Berdasarkan Hasil Pengolahan PS-InSAR

- Gunung Lumpur Sidoarjo

Menurut Rakhman (2014), semburan lumpur di Kecamatan Porong dan sekitarnya, Kabupaten Sidoarjo, Propinsi Jawa Timur tergolong besar. Sejak awal semburan lumpur pada tanggal 29 Mei 2006 di lokasi pengeboran Lapindo Brantas Inc di Dusun Balongnongo Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo dalam kurun waktu satu tahun telah menggenangi daerah di wilayah Kecamatan Porong, Kecamatan Tanggulangin dan Kecamatan Jabon, kurang lebih mencapai seluas 5 km^2 (Sudarsono dan Sujarwo, 2008B). Jarak titik semburan sekitar 150 meter arah Barat Daya sumur Banjar Panji I milik PT. Lapindo Brantas yang saat itu sedang dilakukan pemboran vertikal untuk mencapai Formasi Kujung pada kedalaman 10.300 kaki. Lubang semburan terjadi di beberapa tempat, sebelum akhirnya menjadi satu lubang yang dari waktu ke waktu menyemburkan lumpur panas dengan volume yang terus meningkat (Suprapto dkk. 2007). Dengan adanya fenomena tersebut memunculkan beberapa aspek yang mengindikasi adanya deformasi muka tanah yang diakibat manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo yang memiliki keterkaitan dengan hasil pengolahan PS-InSAR pada penelitian kali ini yaitu :

a. Aspek Volume Lumpur :

Peningkatan volume yang terjadi mendeteksi tingkat ekstrusi sekitar 50.000 m^3/hari selama beberapa bulan pertama (Istadi dkk. 2009). Meningkat menjadi 125.000 m^3/hari masuk pada September 2006, empat bulan kemudian mencapai maksimum dari 180.000 m^3/hari (Mazzini dkk. 2007; Istadi dkk 2009) dan berkurang menjadi 90.000 m^3/hari pada Agustus 2008 dan terus berkurang menjadi 10.000 m^3/hari pada pertengahan 2010 (Mazzini dkk. 2009; Rudolph dkk. 2013). Peningkatan volume tersebut terus meningkatkan hingga Tahun 2007

kemudian mengalami penurunan di Tahun 2008 hingga 2010. Adanya peningkatan dan penurunan volume ektrusi lumpur ini selaras dengan hasil pengolahan InSAR dengan menggunakan data ALOS, seperti tabel berikut:

- Penelitian yang dilakukan oleh Shirzaei dkk. (2015)

Tabel 4.9 Hasil pengolahan InSAR pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Shirzaei dkk. (2015)

Spesifikasi	**Tanggal akuisisi**	**Nilai deformasi**
Ascending (3 Citra) - *Frame* 430 - *Frame* 21 - *Frame* 23 *Descending* (2 Citra) - *Frame* 21 *Frame* 25	19 Mei 2006 - 17 Februari 2007	80 cm/th dengan hasil LOS *subsidence*
	8 Oktober 2006 hingga 21 April 2011	~10 cm/th pada dua lokasi : - Bagian Timur gunung lumpur - Bagian Barat yang terhubung dengan Lahan Gas Wunut

- Penelitian yang dilakukan oleh Yulyta dkk. (2015)

Tabel 4.10 Hasil pengolahan InSAR pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Yulyta dkk. (2015)

Spesifikasi	**Tanggal akuisisi**	**Nilai deformasi**
Ascending *Frame* 7030 *Path* 427	- 17 Februari 2008 - 4 Januari 2009 - 22 Februari 2010 10 Januari 2011	0 - -20 cm/th untuk *subsidence* dan 0 – 10 cm/th untuk *uplift*, dimana : - bagian Selatan dan Barat tanggul cenderung mengalami penurunan tanah - dibagian Utara cenderung mengalami uplift - bagian Timur terjadi penurunan tanah namun di beberapa titik ditemukan *uplift*

- Penelitian yang dilakukan oleh Fukushima dkk. (2009)

Tabel 4.11 Hasil pengolahan InSAR pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Fukushima dkk. (2009)

Spesifikasi	Tanggal akuisisi	Nilai deformasi
Ascending	*(path, frame)* = (430, 7020) - 19/05/2006-04/10/2006 - 04/10/2006–19/11/2006 - 19/11/2006–19/02/2006 - 04/01/2006–19/02/2007 *(path, frame)* = (427, 7030) - 30/12/2006–14/02/2007 *(path, frame)* = (89, 3780). - 03/01/2007–18/02/2007 - 18/02/2007–05/04/2007 - 05/04/2007–21/05/2007	LOS *Displacement subsidence* 70 cm and 80 cm secara keseluruhan dan LOS *displacement* sebesar 29,0 cm untuk R $\geq$ 1 km dan 150 cm LOS *displacements* pada 174 hari pertaman erupsi.

Dari hasil tabel diatas menunjukkan bahwa kenaikan dan penurunan ektruksi gunung lumpur mempengaruhi deformasi muka tanah sekitar wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada Tahun 2006 hingga 2011. Hasil pengolahan ALOS PALSAR-1 dengan metode PS-InSAR dengan akuisisi data di Tahun 2007-2009 pada penelitian kali ini tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya, karena hasil pada penelitian dengan menggunakan data ALOS PALSAR tidak memenuhi syarat pengolahan metode PS-InSAR sehingga terjadi banyak *noise* dan hasil pengolahan yang dihasilkan tidak sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Untuk laju volume ekstrusi di Tahun 2014 hingga 2015 di Gunung Lumpur Sidoarjo menunjukkan bahwa Volume total tutupan lumpur bulan Maret 2014 dan Juli 2015 adalah 44.039.123,365 m^3 dan 47.646.879,058 m^3, dimana terdapat selisih sebesar 3.607.755,693 m^3 (Widodo dan Hariyanto 2016). Diperkirakan volume ini akan terus naik, hal ini terlihat pada Gambar 4.51. Terdapat perubahan luasan sebaran lumpur dari 2006 hingga 2019 akibat kenaikan volume ekstrusi gunung lumpur.

(a) (b)

Gambar 4.53 Penampakan Gunung Lumpur Sidoarjo melalui Google Earth pada tahun (a) 2006, dan (b) 2019

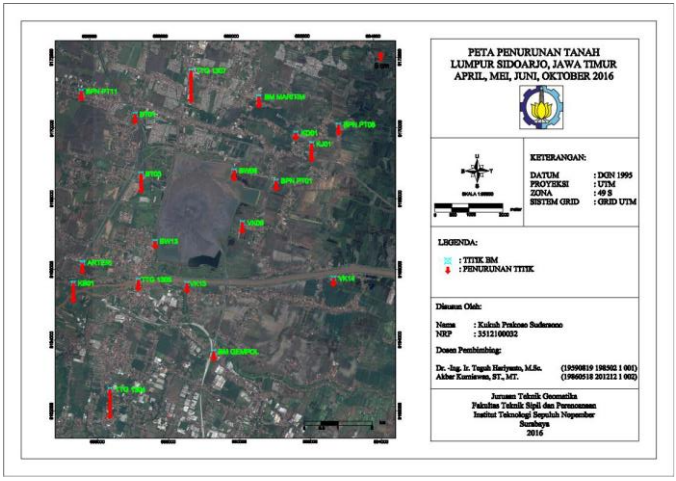
Hal ini juga dibuktikan dengan luberan air beserta lumpur yang keluar dari bawah tanggul dan tak jauh dari lokasi luberan, warga di Dusun Pologunting, Kecamatan Tanggulangin, Sidoarjo, menemukan tanggul sepanjang 100 meter ambles sedalam 5 meter (Wismabrata dan Susanti 2018). Dengan adanya kenaikan jumlah volume pada Tahun 2014-2015 dan kejadian amblesnya tanggul Lumpur Sidoarjo, hal ini menunjukkan adanya keterkaitan antara kenaikan jumlah volume dengan deformasi di wilayah manifestasi gunung lumpur tersebut. Dari hasil pengolahan PS-InSAR dengan menggunakan Citra Sentinel 1A dengan akuisisi data di Tahun 2015-2019 menunjukkan bahwa terdapat penurunan muka tanah di area manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo dengan radius ± 2 km dengan rentang -20 mm/th hingga -4,50 mm/th. Penurunan muka tanah terbesar berada pada arah Timur Laut gunung lumpur yang berlokasi di sekitar wilayah Desa Kedung Banteng dan Banjar Panji serta di wilayah Barat gunung lumpur yang berlokasi di Desa Candi Pari.

Hasil penelitian dengan menggunakan data SAR diwilayah Lumpur Sidoarjo dengan rentang Tahun 2015-2019 masih belum banyak dilakukan, akan tetapi untuk pengukuran GPS di Tahun 2016 telah dilakukan oleh Sudarsono, Hariyanto dan Kurniawan (2017). Adapun hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.12 Hasil pengolahan GPS pada wilayah manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo pada penelitian Sudarsono, Hariyanto dan Kurniawan (2017)

Spesifikasi	Tanggal akuisisi	Nilai deformasi
Jaring radial dengan dilakukan sebanyak 4 kala	April, Mei, Juni, dan Oktober 2016	Nilai penurunan terendah adalah -0,26709 m pada titik TTG 1307 dan penaikan tertinggi adalah 0,08758 m pada titik VK14. Namun, apabila dilihat secara keseluruhan, titik pada penelitian 2016 ini cenderung untuk mengalami penurunan tanah, dimana penaikan tanah hanya terjadi antara kala pertama dengan kala kedua saja.

Berikut merupakan peta penurunan tanah di wilayah Lumpur Sidoarjo yang dibuat oleh Sudarsono, Hariyanto dan Kurniawan (2017) :



Gambar 4.54 Peta penurunan tanah kawasan lumpur Sidoarjo dengan pengukuran GPS pada Tahun 2016

(Sudarsono dkk. 2017)

Berdasarkan hasil penelitian milik Sudarsono, Hariyanto dan Kurniawan. (2007), nilai deformasi yang dihasilkan dari 4 kala tersebut mayoritas berbeda dengan hasil penelitian kali ini, dikarenakan perbedaan rentang waktu pengukuran serta perbedaan metode penelitian yang digunakan.

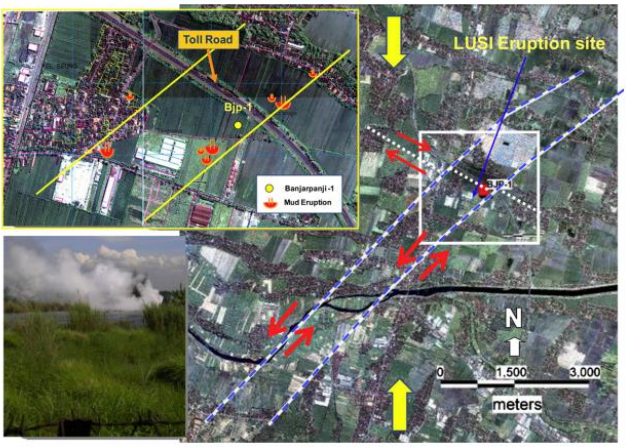
b. Aspek Geologi dan Geografis

Pada aspek ini dibagi berdasarkan beberapa cabang yaitu :

- Secara fisiografis

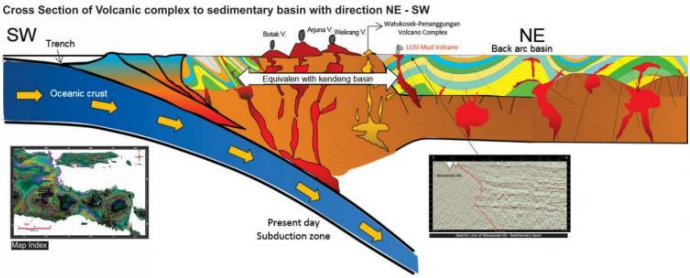
Daerah Lumpur Sidoarjo termasuk ke dalam Zona Randublatung yang merupakan zona sempit memanjang sekitar 250 km dan lebar 10 km dari Semarang sampai Surabaya. Secara struktur bawah permukaan Zona Randublatung diindikasikan sebagai triangle zone, sebuah zona segitiga yang diapit zona-zona sesar yang saling berlawanan kemiringan dan arahnya. Di Jawa Tengah dan Jawa Timur, Zona Randublatung merupakan wilayah pertemuan dua buah zona besar yakni Zona Rembang dan Zona Kendeng (Suprapto dkk. 2007).

Di bagian timur Jawa, di Timur Zona Kendeng, sejumlah gunung lumpur ini diperlihatkan pada sebuah pola yang mengikuti Patahan Watukosek. Patahan besar ini berawal dari kompleks gunung berapi Arjuno - Welirang di sepanjang Gunung Merapi Arah SSW / NNE dan juga patahan antitetic yaitu patahan siring yang melintasi patahan watukosek dengan arah NW-SE (Sawolo dkk. 2009).



Gambar 4.55 Letusan LUSI awal di lima lokasi berbeda diselaraskan di sepanjang garis patahan Watukosek. Tekuk dan tebing sungai disejajarkan dengan Sistem Sesar Watukosek
Sawolo dkk. 2009

Kondisi geologis yang dinamis di daerah ini dibuktikan dengan perubahan topografi yang terus menerus pada zona patahan aktif, khususnya zona patahan Watukosek dan Siring. Contoh topografi fitur adalah drainase yang dipindahkan di sungai Porong dan Alo, dinding penahan lumpur (tanggul) yang ambles, *slickenside* pada sedimen baru, blok terangkat di daerah NE LUSI, tingkat subsidensi yang lebih tinggi di LUSI bagian barat, lipatan yang terlihat di sisi utara kawah. Semua fitur geologis ini terjadi sebagai akibat dari letusan lumpur LUSI.



Gambar 4.56 Penampang geologi yang sejalan dengan Patahan Watukosek yang melintasi kompleks cekungan busur depan dan cekungan busur belakang
Wibowo dkk. 2018

c. Secara Stratigrafi

LUSI terdiri dari (1) sedimen aluvial, (2) Pleistosen bergantian batupasir dan serpih Formasi Pucangan (hingga sekitar 500 m), (3) lempung pleistosen dari Formasi Pucangan (hingga kedalaman sekitar 1000 m), (4) Tanah liat kelabu kebiruan Pleistosen dari Kalibeng Atas Formasi (hingga kedalaman 1871 m), dan (5) Pasir vulkaniklastik Pliosen Akhir setebal sedikitnya 962 m. Strontium isotop (Sr) dari karbonat menunjukkan usia absolut 16-18 ma Miosen Awal, dan oleh karena itu karbonat berkorelasi dengan singkapan Formasi Tuban yang banyak ditemukan di Kalimantan bagian barat cekungan Jawa Timur yang menunjukkan rentang usia dari 15,2 ma hingga 20,8 ma berdasarkan analisis isotop strontium (Wibowo dkk. 2018). Adapun penjelasan struktur geologi dapat dilihat pada Gambar 4.64.

d. Aspek *Geothermal*

Semburan lumpur dengan suhu yang cukup tinggi yaitu sekitar 100°C telah menimbulkan dugaan atau hipotesis akan adanya sistim geotermal hasil proses magmatik yang ikut mempengaruhi suhu lumpur yang keluar yang menghasilkan larutan hidrotermal yang umumnya mengandung unsur-unsur logam antara lain Cu, Pb, Zn, Mn, Fe, Cd, As, Sb, Au, Ag, Hg,

dan Se. Lokasi geografis semburan lumpur yang terletak sekitar 12 km di sebelah timur laut Gunung Penanggungan membuat dugaan akan adanya keterlibatan sistem geotermal yang memberikan pengaruh tidak hanya pada efek naiknya suhu, akan tetapi fluida yang dihasilkan mempunyai sifat melarutkan unsur-unsur logam, sehingga apabila ikut terbawa keluar bersama lumpur akan mempengaruhi kandungan unsur logam pada endapan lumpur.

Hasil penyelidikan geokimia yang dilakukan oleh Suprapto dkk. (2007) menunjukkan bahwa pola sebaran beberapa unsur logam yang relatif beragam. Pola sebaran beberapa unsur mempunyai nilai yang tinggi pada daerah jauh dari pusat semburan dan cenderung redah pada sekitar pusat semburan. Akan tetapi beberapa unsur mempunyai pola yang jelas menunjukkan peninggian pada arah mendekati pusat semburan. Peninggian nilai beberapa unsur dibandingkan dengan rata-rata yang umum terdapat pada batu lempung memberikan kemungkinan bahwa ada pengaruh larutan hidrotermal dari aktivitas magmatik pada zona kedalaman yang mempengaruhi kandungan semburan lumpur. Proses peninggian beberapa kandungan unsur pada lumpur dapat terjadi saat masih insitu berada pada kedalaman semula, atau akibat setelah tersemburkan keluar ada imbuhan kandungan unsur yang terakumulasi dan terdispersi kemudian. Keterdapatan peninggian sebagian unsur logam dasar yang merupakan penciri suhu tinggi dimungkinkan sebagai akibat kecepatan keluarnya fluida yang relatif tinggi sehingga membawa serta unsur-unsur yang umumnya terbentuk pada zona dalam dan suhu tinggi (Suprapto dkk. 2007).

Gambar 4.57 Endapan lumpur Sidoarjo dengan latar belakang pusat semburan, Gunung Penanggungan dan Gunung Arjuno (Suprapto dkk 2007)

- Gunung Lumpur Gununganyar

Gunung Lumpur Gununganyar sudah ada sejak ratusan tahun yang lalu (LIPI 2012). Gunung lumpur ini memiliki morfologi kubah landai berukuran 20×30 m^2 dengan permukaan tidak beraturan yang didominasi kolam, gas venting (pelepasan secara langsung ke atmosfer yang dikarenakan kelebihan produksi gas), salsa, dan travertine (bentuk batu kapur yang didepositkan oleh mata air mineral yang berserat atau konsentris). Lumpur Gununganyar diperkirakan berumur Miosen-Tengah (N9-N13), Miosen akhir - Pliosen (N18) (Burhannudinnur dkk. 2012). Struktur geologi pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar didominasi oleh tanah alluvium, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.64.

(a) (b)

Gambar 4.58 Penampakan Gunung Lumpur Gununganyar melalui Google Earth pada tahun (a) 2006, dan (b) 2019

Gunung Lumpur Gununganyar memiliki material gas dan air lebih dominan daripada lumpur. Pada bagian puncak kubah terdapat selaput minyak. Gunung lumpur ini memiliki kandungan fluida yang ada didalamnya berupa air dengan kadar garam tinggi, gas karbondioksida dan metana dengan pH 6,5-6,2 pada suhu 45-54℃. Maka dari itu, Pada hasil PS-InSAR Gambar 4.34 (b) menunjukkan wilayah gunung lumpur tidak menghasilkan titik PS, sedangkan pada Gambar 4.59 (a) terdapat dua titik PS yang dihasilkan.

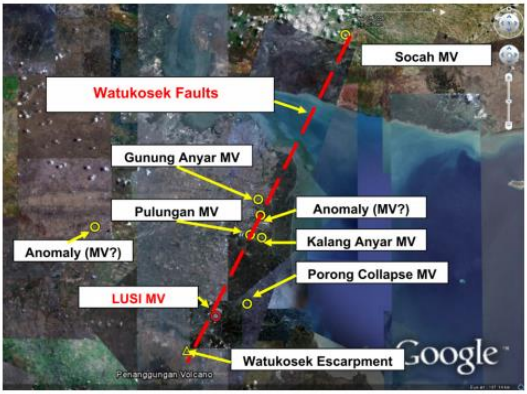
(a) (b)

Gambar 4.59 Titik PS pada wilayah Gunung Lumpur Gununganyar pada olahan (a) Citra ALOS PALSAR-1, dan (b) Citra Sentinel 1A

Menurut S. Amelinda dan Santosa (2016), berdasarkan nilai resistansi dari pengolahahan data geolistrik diidentifikasi bahwa arah persebaran lumpur semakin meluas yakni menuju ke arah tenggara, hal ini selaras dengan hasil pengolahan PS-InSAR pada

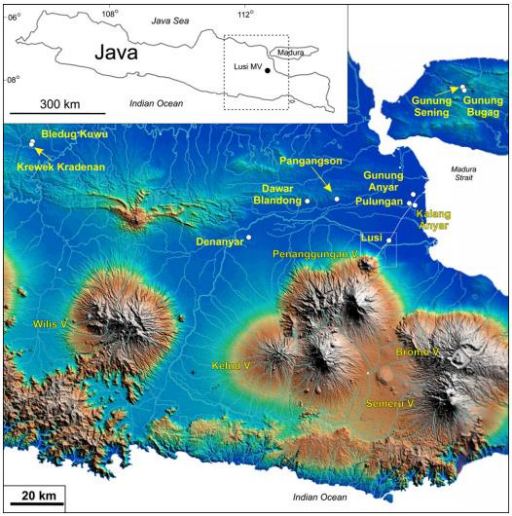
wilayah manifestasi Gunung Lumpur Gununganyar yang mengalami penurunan muka tanah (*subsidence*) di bagian Timur hingga Tenggara wilayah gunung lumpur dengan rentang -27 mm/th hingga -4 mm/th. Selain itu, terdapat pula penelitian yang dilakukan oleh Anjasmara, Mauradhia, dan Susilo (2019) dengan menggunakan metode pengukuran GPS di wilayah Kota Surabaya pada Tahun 2017-2018. Pada pengukuran GPS stasiun SB03 dihasilkan kecepatan deformasi vertikal sebesar -0.920 mm/tahun dari pengukuran 2 kala per tahun, wilayah SB03 berada di arah Barat Daya pusat manifestasi Gunung Lumpur Gununganyar sejauh 780,65 m. Hal ini memiliki perbedaan dengan hasil penelitian kali ini dimana pada wilayah stasiun SB03, hasil pengolahan PS-InSAR menunjukkan kecepatan deformasi dengan rentang -4,70 hingga 8,80 mm dalam LOS. Perbedaan nilai yang terjadi dikarenakan pada penelitian Anjasmara, Mauradhia, dan Susilo (2019) menggunakan rentang tahun pengamatan yang berbeda dengan penelitian kali ini sehingga data yang digunakan atau dihasilkan juga berbeda, serta perbedaan hasil akhir pengolahan. Pada pengolahan Anjasmara, Mauradhia, dan Susilo (2019) dihasilkan nilai deformasi dalam arah vertikal dan horizontal sedangkan pada penelitian kali ini dihasilkan nilai deformasi dalam LOS (*Line-of-Sight).*

Adanya deformasi pada wilayah gunung lumpur ini diindikasi adanya pergerakan dari patahan watukosek yang memanjang melewati lokasi beberapa gunung lumpur, salah satunya yaitu Gunung Lumpur Gununganyar.



Gambar 4.60 Gunung lumpur LUSI dan lima gunung lumpur lainnya yang diketahui berlokasi di sepanjang zona Sesar Watukosek.
(Sawolo dkk. 2009)

Zona Sesar Watukosek memotong Lusi dan bagian timur laut Jawa dengan orientasi SW-NE. Patahan tersebut menjalar dari gunung berapi Penanggungan, singkapan di sepanjang Watukosek lereng curam dan mengarah ke Timur Laut, mengubah jalannya Sungai Porong sehingga menciptakan tikungan tajam ke arah utara. Patahan ini terus berlanjut menuju Pulau Madura yang menampung Lumpur Sidoarjo, Gununganyar, Pulungan, dan Kalanganyar. Di Jawa, gunung lumpur tambahan telah disimpulkan dari gambar satelit sepanjang garis kelurusan ini. Bukti lebih lanjut dari patahan yaitu muncul dekat dengan delta Sungai Surabaya, dimana sungai memiliki belokan tajam dan mengarah ke timur sehingga membentuk tanggul sepanjang pantai (Mazzini dkk. 2009).



Gambar 4.61 Patahan Watukosek menjalar dari kompleks gunung berapi Arjuno, melintasi gunung lumpur Lusi dan memanjang ke arah Timur Laut yang ditandai dengan garis putus-putus putih (Mazzini dkk. 2009).

Sesar Watukosek berada pada stratigrafi Mandala Kendeng, berarah timur laut - barat daya yang melewati Pulungan - Sidoarjo dan Bangkalan, Madura (Van Bemmelen 1949). Adanya kelurusan sebaran mud volcano menunjukkan kontrol tektonik berupa kelurusan struktur sesar permukaan dan bawah permukaan, sebagai hasil reaktivasi sesar pada zona cekungan Kendeng.

- Gunung Lumpur Kalanganyar

Gunung lumpur Kalanganyar memiliki usia lebih dari puluhan tahun (LIPI 2012). Gunung Lumpur ini berlokasi di perbatasan antara permukiman padat dan area pertambakan, dapat dilihat pada Gambar 4.62. Berada di Formasi Lidah, Gunung Lumpur Kalanganyar tersusun oleh batulempung yang berwarna kebiruan dan napal berlapis yang diselingi oleh batupasir dan lensa-lensa fossiliferous grainstone/rudstone

(coquina). Pada bagian bawah masih merupakan endapan laut, tercirikan akan kandungan Pseudorotalia sp. dan Asterorotalia sp. yang melimpah. Kumpulan fosil ini mencirikan pengendapan di dasar laut pada paparan tengah hingga luar. Di atas satuan ini batuannya menunjukkan produk pengendapan dari lingkungan yang semakin mendangkal. Bagian teratas membentuk lempung hasil pengendapan air tawar, hal ini mengakibatkan hasil titik PS yang terdeteksi pada wilayah manifestasi gunung lumpur tidak rapat dan hanya wilayah permukiman padat saja yang dapat dipantulkan oleh radar.

(a) (b)

Gambar 4.62 Penampakan Gunung Lumpur Kalanganyar melalui Google Earth pada tahun (a) 2006, dan (b) 2019

Dengan area luas gunung lumpur 20×30 m^2, gunung lumpur ini memiliki morfologi kubah tidak teratur yang tersusun dari kubah-kubah kecil hasil erosi gryphon yang bertumpukan. Gunung lumpur ini memiliki kandungan gelembung gas kental dengan lapisan garam di *pools* atau salsa yang mengering dengan pH 6,8-7,4 pada suhu 34℃. Lumpur Gununganyar diperkirakan berumur Miosen-Tengah (N9-N15), Miosen akhir - Pliosen (N18-N20), Neritik Tengah-Luar (Burhannudinnur dkk. 2012).

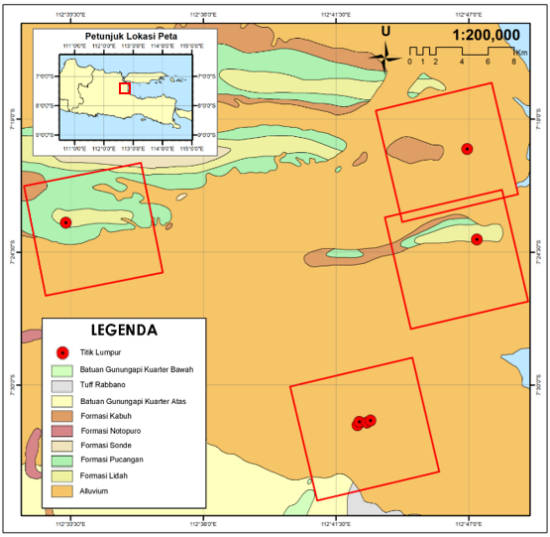
- Gunung Lumpur Wringinanom

Gunung lumpur Wringinanom diperkirakan berumur sama dengan Gunung Lumpur Sidoarjo. Gunung lumpur dengan berstatus istirahat (*dormant*) ini berlokasi di daerah persawahan dapat dilihat pada Gambar 4.45 dan 4.47, dimana titik PS tidak

terlihat rapat di daerah tersebut. Hal ini diindikasikan bahwa citra radar tidak memiliki energi pantulan yang baik Mayoritas titik PS muncul di wilayah permukiman dan dimungkinkan wilayah permukiman tersebut mengalami pemadatan dari Tahun 2007-2009 dan Tahun 2015-2019, sehingga wilayah sekitar manifestasi gunung lumpur mengalami kenaikan muka tanah (*uplift*). Apabila wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Wringinanom mengalami penurunan muka tanah (*subsidence*), maka hal tersebut dikarenakan kondisi geologi pada gunung lumpur tersebut serupa dengan kondisi geologi di Kalanganyar yaitu berada pada formasi lidah. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.64.

(a) (b)

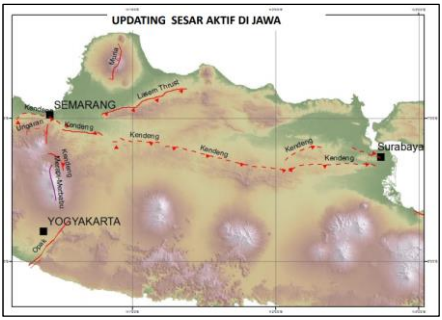
Gambar 4.63 Penampakan Gunung Lumpur Wringinanom melalui Google Earth pada tahun (a) 2005, dan (b) 2019



Gambar 4.64 Peta Geologi wilayah manifestasi Gunung Lumpur Pulau Jawa, Jawa Timur
(Modifikasi dari Supandjono dkk. 1992 dan Santosa dan Suwarti 1992)

Gunung lumpur Wringinanom memiliki morfologi kubah-kubah kecil hasil dari pengendapan lumpur. Dengan luas area 200×300 m^2, gunung lumpur ini memiliki material air, lumpur, dan selaput minyak, serta mengeluarkan gas. Pada bagian puncak kubah terdapat selaput minyak. Gunung lumpur ini memiliki kandungan fluida yang ada didalamnya berupa air 70-80% dan lumpur 20-30% dengan kadar pH 6-7 pada suhu 34℃ (Burhannudinnur dkk. 2012).

Wilayah Wringinanom dilalui sesar aktif yaitu Sesar Kendeng yang menyebabkan adanya pergeseran tanah. Sesar Kendeng disebutkan memanjang mulai dari bagian timur Jawa Timur hingga bagian barat Jawa Barat, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.65.



Gambar 4.65 *Updating* sesar aktif di Pulau Jawa bagian tengah-timur (Natawidjaja 2019)

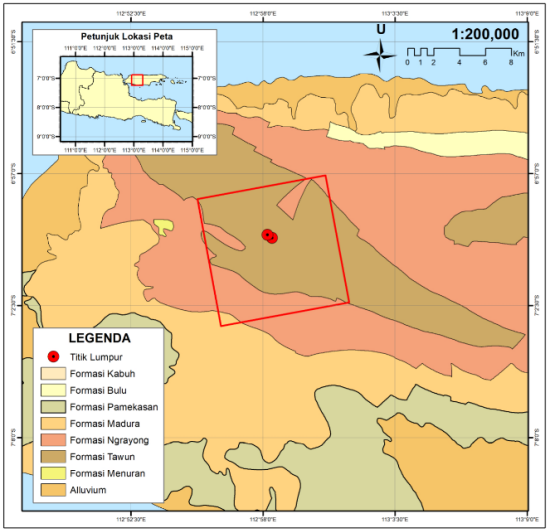
- Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Bujhel Tasek Laki

Menurut Satyana, Erwanto, dan Prasetyadi (2004), Jawa Timur dibentuk oleh subduksi benua mikro Sundaland dan benua mikro Australia Barat, juga dipengaruhi oleh Indian colliosin yang memutar bagian barat dan membentuk patahan RMKS (Rembang-Madura-Kangean-Sakala). Hal ini terbukti bahwa Gunung Lumpur Bujhel Tasek terletak pada Jalur Rembang-Madura yang merupakan sedimentasi dari Cekungan Jawa Timur bagian Utara. Jalur ini terdiri dari pegunungan lipatan berbentuk Antiklinorium yang memanjang ke arah Barat Timur dari kota Purwodadi melalui Blora, Jatirogo, Tuban hingga Pulau Madura. Daerah penelitian ini memiliki morfologi permukaan berupa perbukitan bergelombang dengan struktur tanah yang didominasi oleh batu kapur dan struktur bawah permukaan berupa lempung dan batu kapur (gamping) (Hurun 2016).

Secara geologi daerah penelitian termasuk dalam Formasi Tawun dengan bagian atas tersusun atas napal pasiran bersisipan dengan batu gamping dan batu pasir gampingan. Bagian bawah tersusun atas batu lempung gampingan berbintal gampingan (*calcareous nodules*) dan tanah lapukannya berwarna cokelat muda-kekuningan serta berkarbon. Formasi tersebut dapat dilihat dalam Gambar 4.67.

(a) (b)

Gambar 4.66 Penampakan Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Bujhel Tasek Laki melalui Google Earth pada tahun (a) 2011, dan (b) 2019



Gambar 4.67 Peta Geologi wilayah manifestasi Gunung Lumpur Pulau Madura, Jawa Timur
(Modifikasi dari Supandjono dkk. 1992)

Material semburan Bujhel Tasek Bini mengandung banyak air, hal ini terlihat dari konsistensi lumpur yang encer. Hal itu menjadikan titik semburan Bujhel Tasek Bini memiliki morfologi luar berupa kubangan lumpur (*Swamplike area*), dengan diameter 10-15 m. Berdasarkan tipe gunung lumpur yang digagas oleh

Dimitrov (2002), Bujhel Tasek Bini termasuk dalam tipe kelas II yaitu *Chikishlyar Type*. Karena Bujhel Tasek Bini memiliki karakter semburan yang tenang dan terus menerus. Lumpur yang disemburkan mengandung banyak air dan gas. Gas dipancarkan secara terus menerus sehingga banyak timbul gelembung-gelembung gas di permukaan kubangan lumpur ini. Menurut Hurun (2016), arah sebaran Lumpur Bujel Tasek Bini adalah utara-selatan dengan lebar dari kandungan lumpur yang berada di bawah permukaan sekitar 65 meter.

Sedangkan Gunung Lumpur Bujhel Tasek Laki memiliki ekspresi eksternal berbentuk kerucut dengan tinggi ± 15 meter, yang termasuk dalam tipe kelas I yakni *Lokbatan Type*. Tipe ini merupakan tipe gunung lumpur dengan letusan eksplosif serta material letusan berupa lumpur rendah viskositas. Material letusan Bujhel Tasek Laki berupa lumpur hitam kental (rendah viskositas) disertai pancaran gas. Pusat semburan Bujhel Tasek Laki berada pada puncak kerucut (Zulfaa 2018).

Pada Gambar 4.65 menunjukkan Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki berada di tengah area vegetasi dengan jumlah sedikit jumlah permukiman, sehingga titik PS yang terdeteksi pada wilayah tersebut jarang, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.49 dan 4.51. Adanya deformasi di wilayah tersebut dimungkinkan karena pergerakan lempeng akibat patahan dan fenomena tektonik lainnya.

BAB V
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis penelitian dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagi berikut :

a. Citra Sentinel 1A memiliki hasil yang sesuai dengan kondisi sebenarnya dibandingkan dengan Citra ALOS PALSAR-1, karena memiliki *raw data* yang dapat digunakan untuk pengamatan *time series* dengan menggunakan metode PS-InSAR dan *temporal baseline* dan *perpendicular baseline* pada masing-masing data yang tidak berjauhan.
b. Pada metode PS-InSAR didapatkan nilai estimasi kecepatan (*velocity rate*) untuk setiap citra pada daerah manifestasi gunung lumpur Jawa Timur yaitu sebagai berikut:
   - Hasil pengolahan PS-InSAR pada Citra ALOS PALSAR-1 diseluruh daerah penelitian tidak dapat dijadikan sebagai referensi informasi deformasi karena hasil pengolahan tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya akibat syarat-syarat pengolahan PS-InSAR yang tidak terpenuhi.
   - Hasil pengolahan PS-InSAR Citra Sentinel 1A dengan radius $\pm$ 4,5 km pada daerah manifestasi gunung lumpur dan sekitarnya menunjukkan bahwa :
     - Estimasi kecepatan rata-rata pada wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo mengalami kenaikan muka tanah 2,62 mm per tahun dan penurunan tanah sebesar -5,46 mm per tahun.
     - Estimasi kecepatan rata-rata pada wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Gununganyar mengalami kenaikan muka tanah sebesar 1,71 mm per tahun dan penurunan tanah sebesar -7,08 mm per tahun.
     - Estimasi kecepatan rata-rata pada wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Kalanganyar mengalami

kenaikan muka tanah sebesar 0,99 mm per tahun dan penurunan tanah sebesar -6,81 mm per tahun.

- Estimasi kecepatan rata-rata pada wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Wringinanom mengalami kenaikan muka tanah sebesar 3,37 mm per tahun dan penurunan tanah sebesar -1,98 mm per tahun.
- Estimasi laju kecepatan (*velocity rate*) deformasi tanah menunjukkan kecepatan rata-rata pada wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Bujhel Tasek mengalami kenaikan muka tanah sebesar 2,88 mm per tahun dan penurunan tanah sebesar -0,83 mm per tahun.

c. Hasil identifikasi deformasi muka tanah yang dihasilkan memiliki nilai dan pola beragam sesuai dengan morfologi manifestasi gunung lumpur, kondisi geologi dan lingkungan sekitar gunung lumpur, dimana :

- Wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Sidoarjo didominasi oleh permukiman dan jalan raya, sehingga titik PS cukup padat dalam mendeteksi wilayah tersebut. Selain itu, nilai dan pola deformasi pada wilayah tersebut diindikasi adanya pengaruh dari aktivitas volume ekstrusi lumpur, sesar watukosek dan siring, serta struktur geologi berupa tanah alluvial.
- Wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Gununganyar didominasi oleh permukiman padat penduduk, sehingga titik PS terdeteksi padat di wilayah tersebut. Selain itu, nilai dan pola deformasi pada wilayah tersebut diindikasi adanya pengaruh dari beban bangunan diatasnya dan aktifitas manusia, sesar watukosek, serta struktur geologi berupa tanah alluvial.
- Wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Kalanganyar berada diantara wilayah permukiman dan pertambakan, sehingga titik PS lebih didominasi pada wilayah permukiman di wilayah tersebut. Selain itu, nilai dan pola deformasi pada wilayah tersebut diindikasi adanya pengaruh dari beban bangunan diatasnya dan

aktifitas manusia, sesar watukosek, serta struktur geologi berada di Formasi Lidah.

- Wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Wringinanom berada di antara permukiman dan persawahan, sehingga titik PS lebih didominasi pada wilayah permukiman di wilayah tersebut. Selain itu, nilai dan pola deformasi pada wilayah tersebut diindikasi adanya pengaruh dari aktifitas manusia, sesar kendeng, serta struktur geologi berada di Formasi Lidah.
- Wilayah sekitar manifestasi Gunung Lumpur Bujhel Tasek Bini dan Laki berada pada wilayah yang didominasi oleh ladang dan persawahan, sehingga titik PS yang terdeteksi cukup sedikit pada wilayah tersebut. Selain itu, nilai dan pola deformasi pada wilayah tersebut diindikasi adanya pengaruh dari Jalur Rembang-Madura, serta struktur geologi yang berada di Formasi Tawun.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya dapat diperoleh beberapa saran, antara lain:

a. Dalam pengolahan SarProZ© sebaiknya menggunakan laptop/PC dengan kapasitas RAM minimal 8 Gb dan memori penyimpanan yang besar untuk dapat mengolah dengan cepat dan optimal.
b. Dalam pengolahan PS-InSAR sebaiknya digunakan lebih banyak citra SAR (> 20) dengan *temporal baseline* dan *perpendicular baseline* yang rapat untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.
c. Untuk uji validasi terhadap kondisi sebenarnya di lapangan, maka diperlukan adanya perbandingan data dengan pengukuran menggunakan GPS untuk mengetahui perbandingan hasil pengukuran *vertical displacement* baik dari PS-InSAR maupun GPS.
d. Dalam pengolahan PS-InSAR sebaiknya menggunakan citra SAR resolusi tinggi, untuk mendapatkan hasil LOS

displacement dan *velocity rate* yang lebih teliti.

e. Untuk penelitian selanjutnya dapat digunakan metode SBAS dimana hasil dari metode tersebut divalidasi dengan data GPS, agar dapat mengetahui perbedaan antara penggunaan metode SBAS dan PS-InSAR pada wilayah manifestasi gunung lumpur.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H.Z., M.A. Kusuma, H. Andreas, M. Gamal dan P. Sumintadireja. 2008. GPS-Based Monitoring of Surface Displacements in the Mud Volcano Area, Sidoarjo, East Java. Observing our Changing Earth: International Association of Geodesy Symposia. Vol. 133(4): 595-603, DOI: 10.1007/978-3-540-85426-5_69.

Agustan, dan Kimata, F. 2011. Analisis Deformasi Daerah Porong – Sidoarjo Terkait Semburan Lumpur Dengan Teknik Interferometri. 1–7.

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.

Aoki Y, dan Sidiq TP. 2014. Ground deformation associated with the eruption of Lumpur Sidoarjo mud volcano, East Java, Indonesia. J Volcanol Geotherm Res 278-279:96–102. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.012.

Arifin, L., dan Kusnida, D. 2016. Mud Diapir Di Perairan Selatan Pulau Madura. *Jurnal Geologi Kelautan*, *7*(3). https://doi.org/10.32693/jgk.7.3.2009.178.

Asopa, U., S. Kumar, dan P. K. Thakur. 2018. PSInSAR Study of Lyngenfjord Norway, Using TerraSAR-X Data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 4(5): 245–51.

Augustan. 2010. Mengamati Perubahan Gunung Api di Indonesia dengan Metode InSAR. Indonesia: INOVASI Online, Catatan Riset.

Aulard-Macler, M. 2012. Sentinel-1 Product Definition; MDA Technical Note Ref. S1-RS-MDA-52-7440; MacDonald, Dettwiler and Associates (MDA): Richmond, BC, Canada.

Baumann, P. 1982. Depositional Cycles on Magmatic and Back Arcs: An Example from Western Indonesia. Revue de I'Institut Francois Du Petrole, v. 37, no. 1, p.

Ben-Avraham, Z. dan Emery, K.O. 1973. Structural Framework of Sunda Shelf. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 57, no. 12, p. 2323-23.

Bishop, W.F. 1980. Structure, Stratigraphy and Hydrocarbons Offshore Southern Kalimantan, Indonesia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 64, no 1, p.

Burhannudinnur, M., Noeradi, D. Sapiie, B., dan Abdassah, D. 2012. Karakter Mud Volcano Di Jawa Timur. Proceedings PIT IAGI Yogyakarta 2012.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., dan Crippa, B. 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011

Davies, R.J., Swarbrick, R.E., Evans, R.J., dan Huuse, M. 2007. Birth of a Mud Volcano: East Java, 29 May 2006. GSA Today 17(2): 4–9.

Dimitrov, L.I. 2002. Mud Volcanoes-the Most Important Pathway for Degassing Deeply Buried Sediments. Earth-Science Reviews, vol.59, p.49-76.

Duyfjes, J. 1936. The geology and stratigraphy of the Kendeng area between Trinil and Surabaya (Java) (in German), De Mijningenieur, vol. 3, no. 8, August 1936, p. 136-149.

Engdahl, Marcus E., dan Juha M. Hyyppä. 2003. Land-Cover Classification Using Multitemporal ERS-1/2 InSAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41(7 PART I): 1620–28.

European Space Agency. 2007. Information on ALOS PALSAR Products for ADEN Users. Technical Note : ALOS-GSEG-EOPG-TN-07-0001.

ESA. 2012. 1 ESA Special Publication ESA’s Radar Observatory

Mission for GMES Operational Services. https://sentinel.esa.int/documents/247904/349449/S1_SP-1322_1.pdf.

Fárová, K, J Jelének, V Kopačková-Strnadová, dan P Kycl. 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, MDPI 11(22): 1–23.

Febriyanti, R. F, dan Anjasmara, I. M. 2017. Analisis Deformasi Gunung Raung Menggunakan Teknologi Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR). Jurnal Teknik ITS 6(2).

Ferretti, A., Prati, C., dan Rocca, F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39, 8–20.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., dan Rocca, F. 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007).

Fukushima, Y. Mori, J. Hashimoto, M. dan Kano, Y. 2009. Subsidence Associated with the LUSI Mud Eruption, East Java, Investigated by SAR Interferometry, Marine and Petroleum Geology, Vol. 26(9): 1740-1750.

Hedberg, H.D. 1974, Relation of methane generation to undercompacted shales, shale diapirs, and mud volcanoes, AAPG Bulletin, 58, p. 661– 673.

Hurun, N. 2016. Analisis Data Geolistrik Resistivitas untuk Pemodelan Struktur Geologi Bawah Permukaan Gunung Lumpur Bangkalan. Skripsi. Malang: Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknolohi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Ichitsubo, A., Hamazaki T., Osawa Y. dan Matsumoto A. 2003. Development Status for the Advanced Earth Observing

Satellite, Proc. ISPRS Commission VII WG6, Kyoto, Japan. October 2003.

Iodice, A., Elettronica, I., dan Federico, N. 2009. A Survey of Differential SAR Interferometry for Surface Displacement Monitoring, (October), 212–214.

Islami, N. 2017. Deformasi Dan Struktur Batuan. Fisika Bumi: 183–200.

Istadi, B.P., Pramono, G.H., Sumintadireja, dan P., Alam, S. 2009. Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia. Mar. Pet. Geol. 26,1724–1739. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.03.006.

Kholodov, V.N. 1983. Postsedimentary Transformations in Elisional Basins (example from Eastern Pre-Caucasus) (in Russian), 150 ps.

Koesoemadinata, R.P., dan Pulunggono, A. 1971. Offshore Tertiary Sedimentary Basins in Indonesia. Paper Presented at 12th Pacific Science Congress, Canberra, August 1971, unpublished.

Kurniawan, R., dan Anjasmara, I. M. 2016. Pemanfaatan Metode Differential Intermerometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) Untuk Pemantauan Deformasi Akibat Aktivitas Eksploitasi Panasbumi. *Jurnal Teknik ITS* 5(2): 6.

Kusma, A. 2008. Pengolahan Data SAR dengan ROI_PAC. Bandung: ITB.

Lin, H., Ma, P., Xia, Y., Chai, D., dan Zhou, L. 2018. Interferometric synthetic aperture radar phase unwrapping based on sparse Markov random fields by graph cuts. Journal of Applied Remote Sensing, 12(01). doi:10.1117/1.Jrs.12.015006

LIPI. 2012. Bersatu Singkap Gunung Lumpur. Retrieved from http://lipi.go.id/berita/bersatu-singkap-gunung-lumpur/2012. Diakses pada tanggal 27 Mei 2020 pukul 12.19 WIB.

Lunt, P., Schiller, D., dan Kalan, T. 1996, East Java Geological Field Trip, Indonesian Petroleum Association, Post-Convention Field Trip, 1996.

Mazzini, A., H. Svensen, G. G. Akhmanov, G. Aloisi, S. Planke, A. Malthe-Sørenssen, dan B. Istadi. 2007. Triggering and dynamic evolution ofthe LUSI mud volcano, Indonesia, Earth Planet. Sci. Lett., 261(3–4), 375–388, doi:10.1016/j.epsl.2007.07.001.

Mazzini, A., Nermoen, A., Krotkiewski, M., Podladchikov, Y., Planke, S., dan Svensen, H. 2009. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia. Marine and Petroleum Geology 26 (2009) 1751–1765.

Milkov, A.V. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. Marine Geology. 167, p. 29–42.

Milkov, A.V. 2003. Global Distribution Of Mud Volcanoes And Their Significance As An Indicator Of Active Petroleum Systems, A Source Of Methane In The Atmosphere And Ocean, And A Geohazard. Advanced Research Workshop Mud Volcanism, Geodynamics, and Seismicity, May 20-22, 2003, Baku, Azerbaijan.

Natawidjaja, D. H. 2019. Rencana Pindah Ibukota Ditinjau Dari Aspek Potensi Bencana Alam. p. 23. Bandung.

Ngadenin, Subiantoro, L.,dan Widana, K.S . 2014. Studi Awal Geologi Di Wilayah Kabupaten Pamekasan Untuk Mendukung Pemilihan Calon Tapak Instalasi Desalinasi Nuklir. Eksplorium 35(1): 29–42.

Perissin, D., Wang, Z., dan Wang, T. 2011. SARPROZ InSAR Tool for Urban Subsidence/manmade Structure Stability Monitoring in China. Proc. of ISRSE, Sydney (Australia). AvailableOnline:http://www.isprs:proceedings/2011/ISRSE34/211104015Final00632.pdf (diakses pada tanggal 20 Maret 2020).

Perrisin D. 2016. SARPROZ software manual. Official Product Web Page : http://www.sarproz.com

Prasetyo, Y. 2010. Pemanfaatan Teknologi Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) dalam Studi Penurunan Muka Tanah (Land Subsidence). Semarang: Jurusan Teknik Geodesi, UNDIP.

Pringgoprawiro, H. 1983. Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara: Suatu Pendekatan Baru. PhD thesis, unpublished, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 239 p.

Qin, Y., dan Perissin, D. 2015. Monitoring Ground Subsidence in Hong Kong via Spaceborne Radar: Experiments and Validation. Remote Sens. 7, 10715–10736.

Rakhman, A. N. 2014. Karakteristik Sifat Fisik Kembang Susut Lumpur Sidoarjo Dan Implikasinya Terhadap Potensi Bencana Amblesan Berikut Mitigasinya Di Kecamatan Porong Dan Sekitarnya, Kabupaten Sidoarjo, Propinsi Jawa Timur. Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST).

Rudolph, M.L., Shirzaei, M., Manga, M. dan Fukushima, Y. 2013. Evolution and future of the Lusi mud eruption inferred from ground deformation. Geophys. Res. Lett. 40, 1089–1092. http://dx.doi.org/10.1002/grl.50189.

S. Amelinda, K., dan Santosa, B. J. 2016. Identifikasi Pola Persebaran Sumber Lumpur Bawah Tanah Pada Mud Volcano Gunung Anyar Rungkut Surabaya Menggunakan Metode Geolistrik. Jurnal Sains Dan Seni ITS, 5(1).

Santoso, S., dan Suwarti, T. 1992. Peta Geologi Lembar Malang, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Satyana, A.H., dan Armandita, C. 2004. Deep-Water play of Java, Indonesia : regional evaluation on opportunities and risks, Proccedings International Geoscience Conference of Deepwater and Frontier Exploration in Asia and Australasia, Indonesian Petroleum Association (IPA) and

American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Jakarta, p. 293-320.

Satyana, A. H, dan Asnidar. 2008. Mud Diapirs And Mud Volcanoes In Depressions Of Java To Madura : Origins, Natures, And Implications To Petroleum System. Proceedings, Indonesian Petroleum Association ThirtySecond Annual Convention & Exhibition 2: 1–34.

Satyana, A. H., Erwanto, E., dan Prasetyadi, C. 2004. Rembang-Madura-Kangean-Sakala (RMKS) Fault Zone, East Java Basin: The Origin and Nature of a Geologic Border. Indonesian Association Of Geologists 33rd Annual Convention, (December), 1–23.

Sawolo, N., Sutriono, E., Istadi, B. P., dan Darmoyo, A. B. 2009. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling? Marine and Petroleum Geology, 26(9), 1766-1784. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.04.002.

Shirzaei, M., Rudolph, M. L., dan Manga, M. 2015. Deep and shallow sources for the Lusi mud eruption revealed by surface deformation. Geophysical Research Letters, 42(13), 5274-5281. doi:10.1002/2015gl064576.

Simons, M., dan Rosen, P.A. 2015. Interferometric synthetic aperture radar geodesy, in Schubert G (editor-in-chief): treatise in geophysics, vol 3, 2nd edn. Elsevier, Oxford, pp 339–385.

Situmorang, B., Siswoyo, Thajib, E. dan Paltrinieri, F., 1976. Wrench Fault Tectonics and Aspects of Hydrocarbon Accumulation in Java. Proceeding of the Indonesian Petroleum Association, 4th Annual Convention June 1976. p. 53-6.

Sofiadin, I. T. 2019. Pemetaan Dan Analisis Penurunan Permukaan Tanah Dengan Interferometry Synthetic Aperture Radar Time Series Di Lapangan Panasbumi Ulubelu.

Sudarsono, K. P., Hariyanto, T. H., dan Kurniawan, A. 2017. Evaluasi Penurunan Tanah Kawasan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Data Pengamatan GPS April, Mei, Juni, dan

Oktober 2016. *Jurnal Teknik ITS* 5(1): 6.

Sudarsono. U dan Sujarwo. I.B., 2008B. Aspek Geologi Teknik Lumur Sidoarjo Jawa Timur. diunduh pada tanggal 27 Juni2020darisitushttp://pag.bgl.esdm.go.id/?q=content/aspekgeologiteknik-lumur-sidoarjo-jawa-timur pada Buletin Badan Geologi, Vol. 18. No.1. April 2008. Hal 1 – 14. Bandung: Badan Geologi Kementerian ESDM.

Sudiro, T.W., Nayoan, G.A.S., Yasid, A., Latreille, M., Osterle, H., Pekar, L., Wiel, F., Ailloud, P., Kasman, dan Gunarto. 1973. The Structural Units of The Jawa Sea. Proceeding of the Indonesian Petroleum Association, 2nd Annual Convention June 1973.

Supandjono, J. B., Hasan, K., Panggabean, H., Satria, D., dan Sukardi. 1992. Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Suprapto, S. J., Gunradi, R., dan Ramli, Y. R. 2007. Geokimia Sebaran unsur logam pada endapan Lumpur Sidoarjo. Buletin Sumber Daya Geologi, 2(2), 4-13..

Susilohadi. 1995. Late Tertiary and Quaternary Geology of the East Java Basin, Indonesia. University of Wollongong Thesis Collection: 169.

Ulin, F. R. 2012. Application Of PS-InSAR Method (Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar) For Land Subsidence Analysis In Gresik City East Java. Jurnal Teknik ITS : 66.

Van Bemmelen, R.W. 1949. The Geology of Indonesia, Vol. 1A, Gov. Printing Office, The Hague, 732 ps.

Virk, A. S., Singh, A., dan Mittal, S. K. 2019. Monitoring And Analysis Of Displacement Using Insar Techniques For Gulaba Landslide Site. Journal of Engineering Science and Technology, 14(3), 1558–1571.

Wessel, P., Smith, W H F, Scharroo R, Luis J F and Wobbe F. 2013. EOS Trans. AGU 94 409–410

Wibowo, H. T., Prastisho, B., Prasetyadi, C., dan Yudiantoro, D. F. 2018. The evolution of Sidoarjo hot mudflow (Lusi),

Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 212. doi:10.1088/1755-1315/212/1/012050 .

Widodo, B. T., dan Hariyanto, T. 2016. Visualisasi Perubahan Volume Dan Elevasi Permukaan Lumpur Dengan Citra Satelit Resolusi Tinggi Temporal Untuk Monitoring Lumpur Sidoarjo. JURNAL TEKNIK ITS, 5.

Wismabrata, Michael Hangga dan Susanti, Reni. 2018. 4 Fakta Tanggul Lumpur Lapindo Ambles, Terkendala Volume Air dan Ketakutan Warga. https://regional.kompas.com/read/2018/10/11/18491531/4-fakta-tanggul-lumpur-lapindo-ambles-terkendala-volume-air-dan-ketakutan?page=all. Diakses pada Tanggal 28 Juni 2020 Pukul 13.42 WIB.

Yulyta, S. A., Taufik, M., dan Hayati, N. 2015. Studi Pengamatan Penurunan Dan Kenaikan Muka Tanah Menggunakan Metode Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) (Studi Kasus : Lumpur Lapindo, Sidoarjo). Geoid, 11(1), 62. https://doi.org/10.12962/j24423998.v11i1.1100.

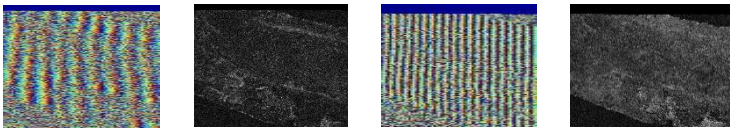
Zalite, K., dan Voormansik, K. 2016. Differential and Persistent Scatterer SAR Interferometry. Tartu Observatory, Space Research Center.

Zulfaa, A. 2018. Aplikasi Metode Self Potensial Untuk Interpretasi Bawah Permukaan Lokasi Semburan Lumpur Bujhel Tasek, Kabupaten Bangkalan. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.

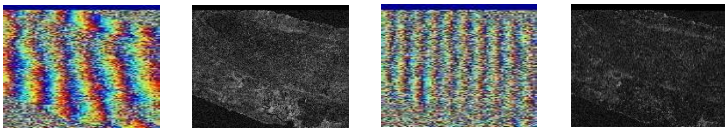
"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

LAMPIRAN

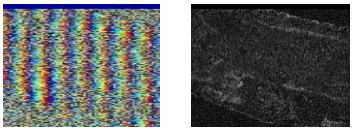
Lampiran 1. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040



15/09/2007 – 17/06/2008 02/05/2008 – 17/06/2008

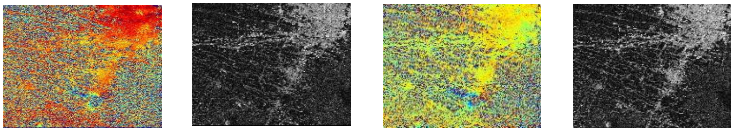


17/09/2008 – 17/06/2008 20/06/2009 – 17/06/2008

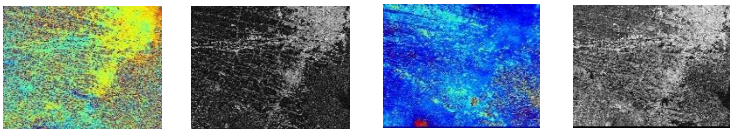


05/08/2009 – 17/06/2008

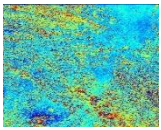
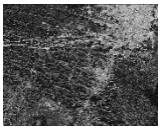
Lampiran 2. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030



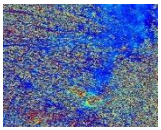
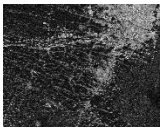
02/07/2007 – 04/07/2008 17/08/2007 – 04/07/2008



02/10/2007 – 04/07/2008 19/08/2008 – 04/07/2008

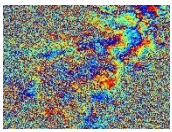
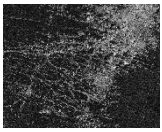



04/10/2008 – 04/07/2008

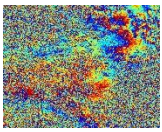
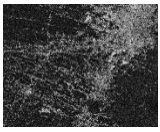



22/08/2009 – 04/07/2008

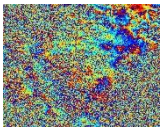
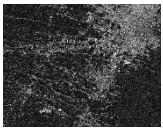
Lampiran 3. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan Sentinel 1A *subswath* IW 1

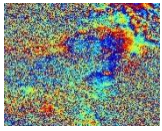
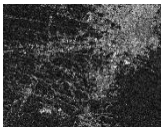
27/12/2015 – 10/10/2016

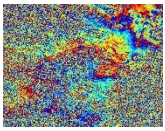
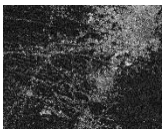
13/02/2016 – 10/10/2016

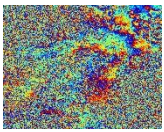
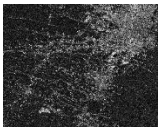
19/05/2016 – 10/10/2016

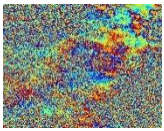
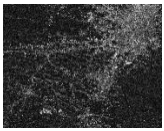
23/08/2016 – 10/10/2016

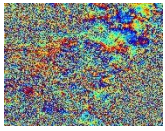
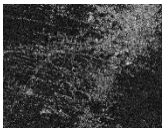
15/03/2017 – 10/10/2016

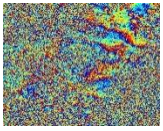
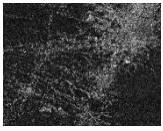
14/05/2017 – 10/10/2016

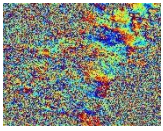
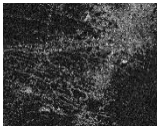
18/08/2017 – 10/10/2016

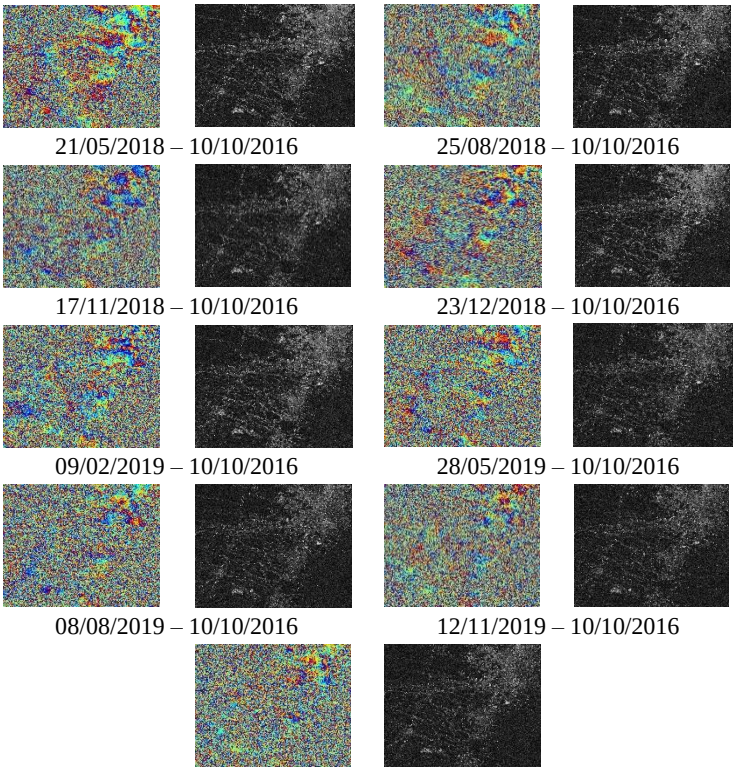
22/11/2017 – 10/10/2016

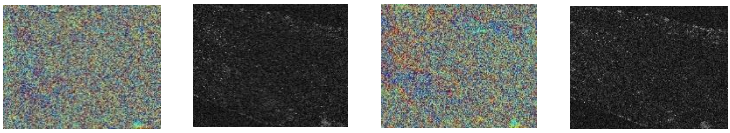
16/12/2017 – 10/10/2016

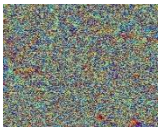



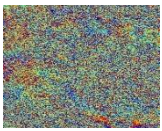
02/02/2018 – 10/10/2016

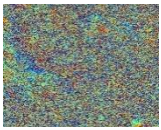


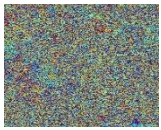
Lampiran 4. Hasil pengolahan interferogram pada pengolahan Sentinel 1A *subswath* IW 2

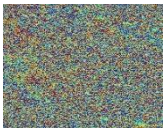



19/05/2016 – 10/10/2016


23/08/2016 – 10/10/2016

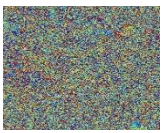

15/03/2017 – 10/10/2016

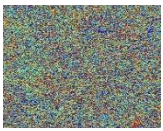

14/05/2017 – 10/10/2016

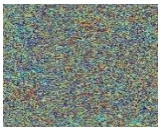

18/08/2017 – 10/10/2016

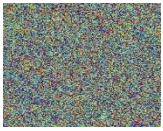
22/11/2017 – 10/10/2016

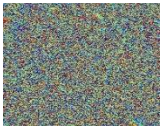
16/12/2017 – 10/10/2016

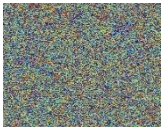

02/02/2018 – 10/10/2016

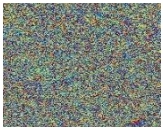

21/05/2018 – 10/10/2016

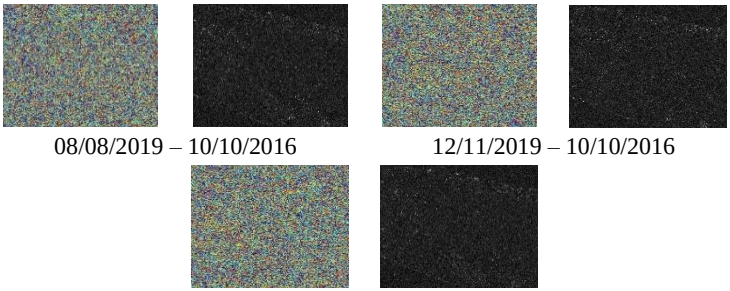

25/08/2018 – 10/10/2016


17/11/2018 – 10/10/2016

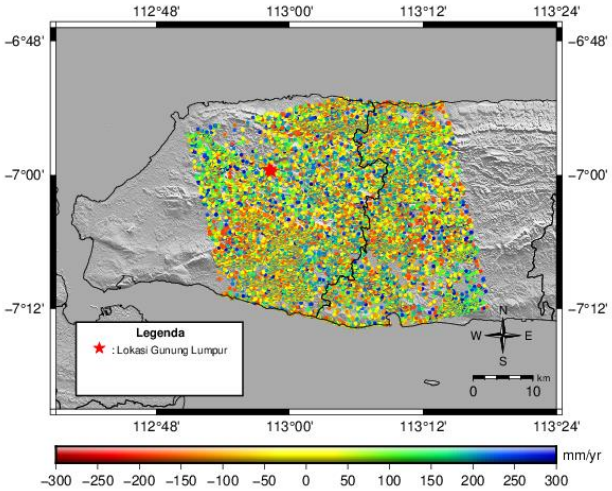

23/12/2018 – 10/10/2016


09/02/2019 – 10/10/2016

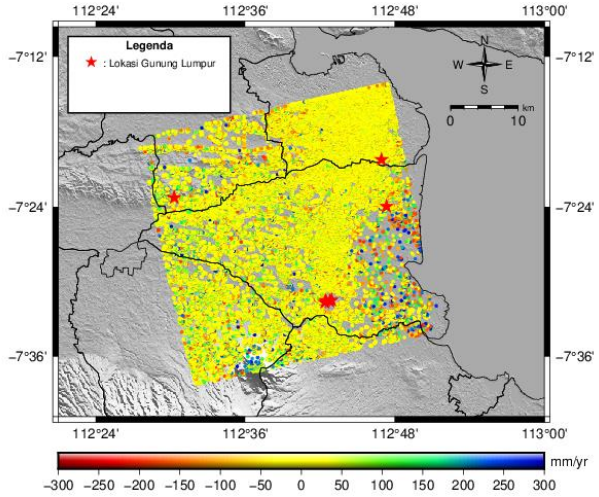

28/05/2019 – 10/10/2016



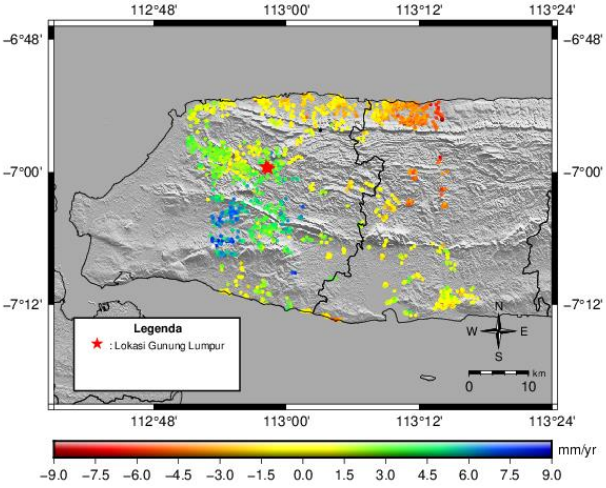
Lampiran 5. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi ALOS PALSAR-1 *path* 426 *frame* 7040 pada wilayah Pulau Madura, Jawa Timur



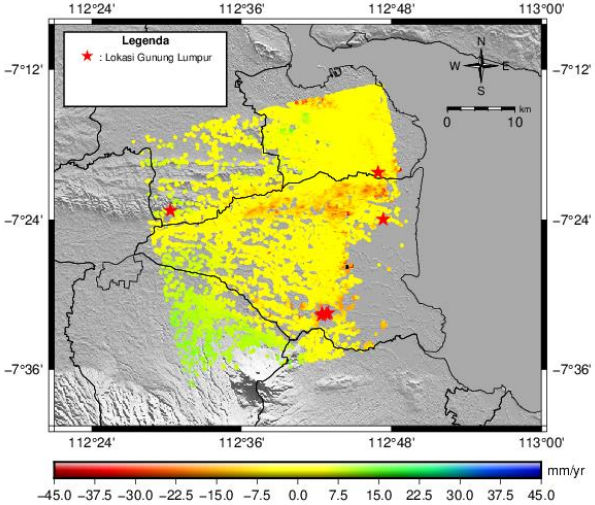
Lampiran 6. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi ALOS PALSAR-1 *path* 427 *frame* 7030 pada wilayah Pulau Jawa, Jawa Timur



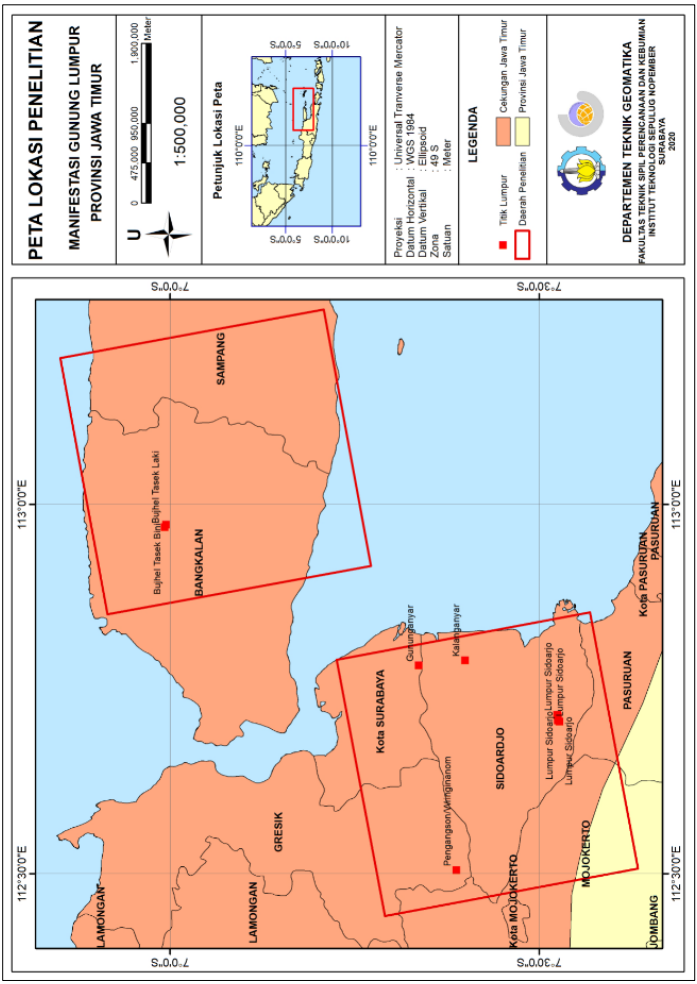
Lampiran 7. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi Sentinel 1A *subswath* IW 1 pada wilayah Pulau Jawa, Jawa Timur



Lampiran 8. Hasil *plotting* estimasi laju kecepatan deformasi Sentinel 1A *subswath* IW 2 pada wilayah Pulau Madura, Jawa Timur



Lampiran 9 Peta lokasi penelitian



BIODATA PENULIS

Bella Esti Ajeng Syahputri lahir di Surabaya pada tanggal 24 Mei 1998 dan merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang ditempuh penulis antara lain SD Negeri Kandangan 1 Surabaya, SMP Negeri 14 Surabaya, dan SMA Negeri 6 Surabaya. Tahun 2016, penulis yang biasa dipanggil Bella ini diterima di Program Studi Teknik Geomatika FTSP-ITS. Selama menjalani perkuliahan, penulis cukup aktif di organisasi. Penulis pernah menjadi staff dalam berbagai acara himpunan, salah satunya yaitu Staff Divisi *Big Event* Himpunan Mahasiswa Geomatika ITS periode 2018/2019. Selain itu, Penulis juga pernah mengikuti Program Kreativitas Mahasiswa dan terdanai Dikti pada Tahun 2007 dengan judul karya tulis "Bola Penyimpan Daya dengan Memanfaatkan Gerak Rotasi Bola yang Diubah Menjadi Energi Listrik Sebagai Alternatif Penghasil Energi Listrik". Pada Tahun 2019, penulis menjalani kegiatan Kerja Praktik di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung, dengan mengangkat penelitian berjudul "Analisis Deformasi Gunung Anak Krakatau Pasca Erupsi Bulan Desember 2018 Menggunakan Citra Satelit Sentinel-1A". Melalui kegiatan tersebut, sehingga penulis tertarik dengan Bidang Geodinamika dan Lingkungan dan kemudian mengambil penelitian tugas akhir berjudul "Analisis Deformasi Muka Tanah Akibat Manifestasi Gunung Lumpur Di Wilayah Cekungan Jawa Timur Dengan Metode PS-InSAR".