



TESIS - RM185401

**MONITORING PERUBAHAN PERMUKAAN TANAH DI
KAWASAN LUMPUR SIDOARJO DAN SEKITARNYA
MENGUNAKAN METODE PS-INSAR DENGAN DATA
SENTINEL-1 PADA TAHUN 2017 - 2019**

SAIYIDINAL FIKRI

NRP 03311850010001

Dosen Kosultasi:

Ira Mutiara Anjasmara, ST, M.Phil, Ph.D

Dr. Ir. Muhammad Taufik

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN GEOMATIKA

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SAIYIDINAL FIKRI

NRP: 03311850010001

Tanggal Ujian : 06 Juni 2020
Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh:

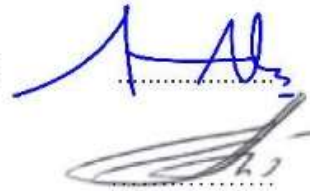
Pembimbing:

1. Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D

NIP. 197812312002122001

2. Dr. Ir. Muhammad Taufik

NIP. 195509191986031001



Penguji:

3. Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198005072003121001

4. Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.

NIP. 197407272000031001

5. Mokhammad Nur Cahyadi, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198112232005011002

6. Dr. Filsa Bioresita, S.T., M.T.

NIP. 19910719201542002

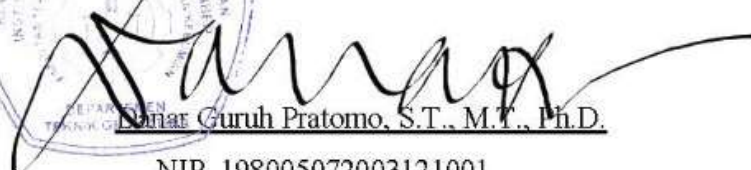


Kepala Departemen Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan



Danar Guruh Pratomo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198005072003121001



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**MONITORING PERUBAHAN PERMUKAAN TANAH DI
KAWASAN LUMPUR SIDOARJO DAN SEKITARNYA
MENGUNAKAN METODE PS-INSAR DENGAN DATA
SENTINEL-1 PADA TAHUN 2017 - 2019**

Nama Mahasiswa : Saiyidinal Fikri
NRP : 03311850010001
Dosen Konsultasi : Ira Mutiara Anjasmara, S.T, M.Phil, Ph.D.
Dr.Ir.Muhammad Taufik

ABSTRAK

Lumpur Sidoarjo merupakan peristiwa munculnya semburan lumpur dan gas dari dalam bumi menuju kepermukaan. Lokasi semburan lumpur ini terjadi di pusat pengeboran PT. Lapindo Brantas yang berada di Dusun Balongnongo, Desa Renokenogo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Tragedi Lumpur Sidoarjo dimulai pada Mei 2006, peristiwa ini menjadi penyebab terjadinya penurunan permukaan tanah disekitar pusat semburan Lumpur Sidoarjo.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besar perubahan permukaan tanah yang terjadi pada daerah di sekitar kawasan semburan Lumpur Sidoarjo, memanfaatkan data Sentinel-1 pada tahun perekaman 2017 hingga 2019. Penurunan permukaan tanah di kawasan Lumpur Sidoarjo yang cenderung mengecil setelah 10 tahun semenjak semburan pertama kali muncul. Penelitian ini menggunakan metode *Permanent Scatterer* InSAR (PS-InSAR), dengan analisis perbedaan nilai ambang batas koherensi yang mempengaruhi dalam mendapatkan besar nilai perubahan permukaan tanah.

Hasil perubahan permukaan tanah yang terjadi disekitar kawasan Lumpur Sidoarjo cenderung menurun seiring berjalannya waktu. Hal ini ditandai dengan berkurangnya *cumulative displacement* dan *velocity* rata-rata jika dibandingkan dengan awal kemunculan LUSI dan penelitian terdahulu. Dalam penelitian ini total *subsidence* pada wilayah Barat pusat semburan LUSI 40 mm dengan *velocity* penurunan rata – rata 19 mm/tahun. Untuk wilayah bagian timur LUSI terjadi total *subsidence* 60 mm dengan *velocity* penurunan rata-rata 24 mm/tahun. *Subsidence*

dan *velocity* ini adalah nilai rata-rata pada setiap ambang batas koherensi yang digunakan dalam penelitian ini.

Kata kunci: Lumpur Sidoarjo, Perubahan Permukaan Tanah, SAR, PS - InSAR

**THE PS-INSAR APPROACH FOR MONITORING OF LAND
SUBSIDENCE ON THE SIDOARJO MUD VOLCANO AREA
AND ITS VICINITY USING TIME SERIES SENTINEL-1
DATA FROM 2017 AND, 2019**

Student Name : Saiyidinal Fikri
NRP : 03311850010001
Consultation Lecturer : Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil, Ph.D.
Dr.Ir.Muhammad Taufik

ABSTRACT

Sidoarjo mud is an event where mud and gas erupts from the earth toward the surface. The location of the mudflow occurred at the drilling center of PT. Lapindo Brantas located in Balongnongo Hamlet, Renokenogo Village, Porong District, Sidoarjo Regency, East Java. The Sidoarjo Mud Tragedy began in May 2006, this event caused a decline in land surface around the Sidoarjo Mudflow center.

The purpose of this study was to determine the level of land surface changes that occurred in the area around the Sidoarjo mudflow area, utilizing Sentinel-1 data in the recording year 2017 to 2019. Land subsidence in the Sidoarjo mud area which tends to decrease after 10 years since the first burst times appear. This study uses the Permanent Scatterer InSAR (PS-InSAR) method, with analysis of differences in the value of the coherence threshold that affects in obtaining a large value of land surface changes.

The results of land surface changes that occur around the Sidoarjo mudflow area tend to decrease over time. This is marked by the reduction in cumulative displacement and average velocity when compared to the initial appearance of LUSI and previous studies. In this study, total subsidence in the central west area of LUSI bursts 40 mm with an average velocity decrease of 19 mm/year. For the eastern part of LUSI, total subsidence of 60 mm occurred with an average velocity of 24 mm/year. This subsidence and velocity are the average values at each coherence threshold used in this study.

Keywords: Sidoarjo Mud Volcano, Land Surface Change, SAR, PS - InSAR

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya yang melimpahkan kepada penulis, sehingga penulis akhirnya dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “Monitoring Perubahan Permukaan Tanah Di Kawasan Lumpur Sidoarjo dan Sekitarnya Menggunakan Metode Ps-Insar Sentinel-1 Pada Tahun 2017 - 2019”.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan moril, materil dan do'a kepada penulis. Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Yth. Ibu Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil, Ph.D dan Bapak Dr. Ir. Muhammad Taufik, selaku pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu dalam mengarahkan dan membimbing penulis menyelesaikan penelitian ini. Disadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan dari berbagai pihak, penelitian ini tidak akan terselesaikan. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya, kepada:

1. Bapak Danar Guruh Pratomo, S.T, M.T, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Geomatika ITS Surabaya.
2. Seluruh staf dosen pengajar, staf dan karyawan Jurusan Teknik Geomatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu per satu.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang telah diberikan. Penulis menyadari bahwa laporan penelitian ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan. Oleh sebab itu, saran dan kritik sangat diharapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang. Semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca pada umumnya.

Surabaya, 2020

Saiyidinal Fikri

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Penurunan Permukaan Tanah.....	5
2.2 Karakteristik Daerah Studi	5
2.3 <i>Syntetic Aperture Radar</i> (SAR).....	7
2.3.1 Sentinel-1.....	10
2.3.2 <i>Interferometry Syntetic Aperture Radar</i> (InSAR).....	14
2.3.3 <i>Differential Interferometry Syntetic Aperture Radar</i> (DInSAR)	16
2.3.4 <i>Filtering and Coherence</i>	18
2.3.5 <i>Permanent Scatter InSAR</i> (PS-InSAR)	19
2.4 Uji Statistik Distribusi Tabel F (<i>Fisher</i>).....	21
2.5 Penelitian Terdahulu.....	22
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi Penelitian	29
3.2 Data dan Peralatan.....	29
3.2.1 Data.....	29
3.2.2 Peralatan.....	29
3.3 Metodologi Pekerjaan.....	29

3.3.1 Tahapan Penelitian.....	29
3.3.2 Tahapan Pengolahan Data	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Data.....	37
4.1.1 Data Sentinel-1	37
4.1.2 Data <i>Digital Elevation Model</i> (DEM)	39
4.2 Co-Registration	40
4.3 Interferogram, Filtering, dan Unwrap	40
4.4 PS-InSAR	43
4.4.1 Amplitude Phase Screen (APS) Estimation	43
4.4.2 Multi Image Sparse Point Processing (MISP).....	48
4.4.3 Scatter Plots	50
4.4.4 Time Series Module	52
4.5 Uji Statistik F (distribusi <i>Fisher</i>).....	58
4.6 Analisa Hasil Uji Statistik dan Penurunan Permukaan Tanah	59
4.6.1 Analisa Perbandingan Antar Coherence Threshold	59
4.6.2 Analisa Dengan Penelitian Sebelumnya.....	60
4.6.3 Analisa Hasil PS-InSAR.....	62
4.6.4 Analisa Terhadap Faktor Perubahan Permukaan Tanah.....	68
BAB 5 KESIMPULAN.....	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran	76
LAMPIRAN.....	87
DAFTAR PUSTAKA	77
BIOGRAFI PENULIS	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lokasi semburan Lumpur Lapindo Sidoarjo.....	6
Gambar 2. 2 Geometri Pencitraan SAR. Seringkali menggunakan istilah ‘ <i>along track</i> ’ atau ‘ <i>azimuth</i> ’ untuk x , ‘ <i>ground range</i> ’ untuk y , ‘ <i>slant range</i> ’ untuk jarak suatu titik terhadap sensor SAR, dan v adalah jalur terbang satelit (Rosen dkk, 2000)	9
Gambar 2. 3 Sistem SAR dalam satelit (Ferretti dkk, 2007a).....	10
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data	33
Gambar 3. 4 Menunjukkan titik merah merupakan master citra dalam penelitian ini (16-Jul-2018), dimana tidak ada baseline yang melebihi 400 m.	34
Gambar 4. 1 Master Image 20180716.....	39
Gambar 4. 2 DEM SRTM 1-arc second.....	39
Gambar 4. 3 (a), (b), dan (c) adalah Interferogram antara Master dan Slave dan (d), (e), dan (f) adalah hasil Unwrap dari Interferogram.....	41
Gambar 4. 4 (a) (b) Unwrap 20170311, (b) (e) Unwrap 20180622, dan (c) (d) Unwrap 20180809. Dimana masing – masing (a) (b) (c) menggunakan parameter Coherence Threshold 0,50 dan (d) (e) (f) 0,75.....	42
Gambar 4. 5 Kosongnya piksel karena koherensi yang rendah	43
Gambar 4. 6 Pemodelan dan penghapusan fase atmosfer	44
Gambar 4. 7 Interferogram Sebelum (kiri) dan Sesudah (kanan) Proses APS ...	44
Gambar 4. 8 Unwrap Sebelum (kiri) dan Sesudah (kanan) APS Removal.....	45
Gambar 4. 9 Reference Point Terletak pada piksel Range 2375 dan Azimuth 222	46
Gambar 4. 10 Integrated Cumulative displacement dan Integrated Velocity	47
Gambar 4. 11 Integrated Cumulative displacement dan Integrated Velocity otomatis.....	47
Gambar 4. 12 Cumulative Displcement dan Velocity Coherence Threshold 0,25	48
Gambar 4. 13 Cumulative Displcement dan Velocity Coherence Threshold 0,50	49

Gambar 4. 14 Cumulative Dispalcement dan Velocity Coherence Threshold 0,75	50
Gambar 4. 15 Scatter Plot Coherence Threshold 0,25 velocity (mm/tahun)	50
Gambar 4. 16 Scatter Plot Coherence Threshold 0,50 velocity (mm/tahun)	51
Gambar 4. 17 Scatter Plot Coherence Threshold 0,75 velocity (mm/tahun)	51
Gambar 4. 18 Time Series Dispalcement LUSI 2017 – 2019 dalam LoS (mm), Coherence Threshold 0,25	52
Gambar 4. 19 Time Series Dispalcement LUSI 2017 – 2019 dalam LoS (mm), Coherence Threshold 0,50	53
Gambar 4. 20 Time Series Dispalcement LUSI 2017 – 2019 dalam LoS (mm), Coherence Threshold 0,75	53
Gambar 4. 21 Sebaran Titik PS pada Setiap Ambang Batas Koherensi	55
Gambar 4. 22 Diagram Time Series Cumulative Displacement	56
Gambar 4. 23 Time Series Displacement 2017 (Maret – Desember)	57
Gambar 4. 24 Time Series Displacement 2018 (Januari – Desember)	57
Gambar 4. 25 Time Series Displacement 2019 (Januari – September)	57
Gambar 4. 26 Sebaran Titik Uji Fisher Barat (kiri) dan Timur (kanan)	59
Gambar 4. 27 Velocity dan Cumulative Displacement PS-InSAR.....	63
Gambar 4. 28 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah di Pusat LUSI Berdasarkan PS-InSAR.....	64
Gambar 4. 29 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah di pusat LUSI Berdasarkan Interpolasi.....	64
Gambar 4. 30 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah Sisi Timur Berdasarkan PS-InSAR.....	65
Gambar 4. 31 Tingkat Perubahan Tanah dikawasan Timur Lusi Berdasarkan Interpolasi.....	65
Gambar 4. 32 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah Sisi Barat Berdasarkan PS-InSAR.....	66
Gambar 4. 33 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah Sisi Barat Berdasarkan Interpolasi.....	66
Gambar 4. 34 Tingkat Kecepatan Perubahan Permukaan Tanah.....	67

Gambar 4. 35 Tingkat Kecepatan Perubahan Permukaan Tanah Berdasarkan Interpolasi.....	68
Gambar 4. 36 Peta Geologi dan sebaran gunung lumpur di Jawa Timur dan Jawa Tengah. Titik merah adalah lokasi lumpur yang teridentifikasi (Istadi dkk, 2009)	69
Gambar 4. 37 Pola Struktur Geologi Regional Berdasarkan Anomali Gayaberat Malang dan Surabaya (Padmawidjaja, 2013).....	70
Gambar 4. 38 Sesar Watukosek yang Melintasi Pusat Semburan LUSI (Andreas dkk, 2017)	71
Gambar 4. 39 Jalur Sesar Watukosek di Daerah Sidoarjo (Setiadi dkk, 2016) ..	72
Gambar 4. 40 Pemodelan Sesar Watukosek Melewai Sisi Barat dari Pusat LUSI (Setiadi dkk, 2016).....	73
Gambar 4. 41 Profil Melintang Sesar Watukosek.....	74

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Pasangan citra master dan slave.....	32
Tabel 4. 1 Pasangan Citra SAR.....	37
Tabel 4. 2 Jumlah Pembentukan Titik PS.....	51
Tabel 4. 3 Set Uji Statistik Fisher Barat LUSI.....	58
Tabel 4. 4 Set uji Statistik Fisher Timur LUSI	58
Tabel 4. 5 Hasil Uji Statistik Bagian Barat.....	59
Tabel 4. 6 Hasil Uji Statistik Bagian Timur.....	59

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lumpur Sidoarjo (LUSI) merupakan peristiwa munculnya semburan lumpur dan gas dari dalam bumi menuju ke permukaan. Gunung lumpur LUSI di Kecamatan Porong, Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia mulai meluap pada tanggal 29 Mei 2006. Material campuran lumpur, air dan gas yang hampir terus menerus keluar hingga saat ini. Semburan lumpur yang terjadi sejak 2006 mengakibatkan perubahan permukaan tanah disekitar kawasan pusat semburan. Lebih dari 150 pasang interferogram yang dihasilkan dari 66 *scene Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) PALSAR dari Juni 2006 hingga Desember 2009 juga telah digunakan untuk mempelajari deformasi tanah yang disebabkan oleh lumpur gunung LUSI (Andreas dkk, 2017).

Semburan lumpur panas Sidoarjo sampai sekarang masih terus mengalir dan bukti geologis belum menunjukkan tanda-tanda akan berhenti dalam waktu dekat (Wibowo dkk, 2018). Semburan lumpur menyebabkan dampak besar pada lingkungan sekitar dan kehidupan sosial ekonomi masyarakat serta meningkatkan spekulasi lain terhadap bukti geologis. Hasil analisis struktur geologis menunjukkan adanya struktur penindikan yang melintasi pusat erupsi sedangkan analisis geodesi menggunakan InSAR menunjukkan adanya beberapa daerah yang mengalami penurunan (*subsidence*) dan ada yang terangkat (*uplift*) (Aoki & Sidiq, 2014).

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Karato (2008) menyebutkan deformasi mengacu pada perubahan bentuk material, karena perpindahan homogen dari titik material tidak menyebabkan deformasi, deformasi harus terkait dengan variasi spasial atau gradien perpindahan. Dalam kasus umum benda - benda yang dapat dideformasi bergerak relatif terhadap satu sama lain, jarak, waktu dan variasi *temporal* adalah dasar dari semua teori deformasi (Altiner, 1999).

Penentuan deformasi secara umum dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti pengukuran sipat datar, pengamatan *Global Positioning System* (GPS) dan penginderaan jauh. Dalam penelitian ini penulis melakukan penelitian untuk melihat perubahan permukaan tanah menggunakan *Syntetic Aperture Radar* (SAR) dengan metode *Permanent Scatterer Syntetic Aperture Radar* (PS-InSAR). Metode ini adalah salah satu metode penginderaan jauh dimana penelitian tidak bersentuhan langsung dengan objek yang akan diamati. Secara ketelitian SAR memang belum bisa mencapai tingkat akurasi yang lebih teliti dibandingkan dengan penggunaan metode GPS atau Sipat Datar dalam mendapatkan nilai deformasi disekitaran kawasan semburan LUSI. Dalam penelitian dengan cakupan area yang luas SAR dapat meminimalisir biaya, sumber daya manusia maupun waktu pengamatan yang terbilang cukup lama.

Penelitian LUSI dengan menggunakan data SAR metode InSAR dan *Differential Syntetic Aperture Radar* (DInSAR) telah banyak dilakukan dalam kurun waktu 13 tahun terakhir. Beberapa penelitian seperti Fukushima dkk, (2009), Gauchet dkk, (2011), Shirzaei dkk, (2015) dan Andreas dkk, (2017) memanfaatkan metode InSAR menggunakan data ALOS PALSAR untuk melihat deformasi yang terjadi pada kawasan sekitar LUSI. Sensor satelit bekerja pada panjang gelombang mikro seperti PALSAR pada L-band merupakan sistem pengindera aktif dengan menggunakan energi pancaran sendiri dari wahana satelit, kemudian sinyal *back scatter* ditangkap oleh antena sensor. Dikarenakan sistem aktif dan bekerja pada gelombang mikro maka sensor SAR dapat dipergunakan untuk memantau permukaan bumi tanpa gangguan awan, cuaca dan ketergantungan sumber cahaya matahari (Kushardono, 2017). Dalam penelitian Yulyta dkk, (2015) dan Thomas dkk, (2010) menerapkan metode DInSAR untuk mendapatkan besar deformasi dengan ketelitian mencapai sub-sentimeter. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah empat buah citra satelit ALOS/PALSAR hingga didapatkan besar deformasi yang terjadi pada kawasan LUSI.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, penelitian ini terfokus untuk mendapatkan besaran perubahan permukaan tanah yang terjadi pada daerah sekitar kawasan semburan LUSI dengan memanfaatkan data Sentinel-1 pada tahun perekaman 2017 hingga 2019. Penelitian ini menggunakan metode *Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* (PS-InSAR) dengan kumpulan data SAR yang diperoleh dalam jumlah besar serta memanfaatkan nilai ambang batas koherensi yang berbeda. Perbedaan koherensi antara dua pasangan gambar SAR adalah informasi yang berguna untuk mendeteksi bencana tertentu di area berskala regional (Lu dkk, 2018) dalam hal ini adalah LUSI. Kawasan yang menjadi fokus dalam penelitian ini didasarkan pada penelitian Aoki & Sidiq (2014), Shirzaei dkk (2015), dan Fukushima dkk (2009) yaitu di wilayah dibagian barat, dan timur dari pusat semburan LUSI. Dari uraian tersebut, dapat dirumuskan tiga pertanyaan sebagai berikut.

- a. Bagaimana analisa perubahan permukaan tanah dengan metode PS InSAR khususnya pada kawasan semburan LUSI tahun 2017 – 2019?
- b. Bagaimana analisa dan evaluasi perubahan permukaan tanah yang terjadi khususnya pada kawasan LUSI dengan nilai ambang batas koherensi yang berbeda (tahun 2017 – 2019)?
- c. Bagaimana analisa perubahan permukaan tanah wilayah Barat dan Timur dari pusat semburan LUSI dan faktor-faktor apa saja yang mempengaruhinya?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Untuk mengetahui perubahan permukaan tanah dan kecepatan deformasi tiap tahun dengan metode PS-InSAR khususnya pada kawasan semburan LUSI tahun 2017 – 2019
- b. Untuk mengetahui evaluasi hasil perubahan permukaan tanah yang terjadi pada kawasan LUSI tahun 2017 – 2019 dengan penggunaan nilai ambang batas koherensi yang berbeda

- c. Untuk mengetahui perubahan permukaan tanah di wilayah barat dan timur dari pusat semburan LUSI dan faktor-faktor apa saja yang mempengaruhinya.

1.4 Manfaat Penelitian

- a. Sebagai bahan informasi dan rekomendasi untuk Pemerintahan Kabupaten Sidoarjo dan Jawa Timur dalam melihat perubahan permukaan tanah yang terjadi pada kawasan Semburan Lumpur Sidoarjo
- b. Sebagai bahan referensi untuk pemetaan dan pengembangan wilayah di Kabupaten Sidoarjo.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Penurunan Permukaan Tanah

Penurunan permukaan tanah adalah sebuah peristiwa turunnya permukaan tanah yang disebabkan karena adanya perubahan pada volume lapisan batuan yang terkandung di bawahnya (Sophian, 2010). Menurunnya muka tanah ini biasanya terjadi perlahan dalam jangka waktu yang lama sehingga manusia tidak langsung menyadari hal tersebut. Penurunan muka tanah ini akan berdampak pada kondisi lingkungan sekitar apabila tidak segera ditanggulangi. Reddish & Whittaker (1989) dalam Ferns dkk, (2006) menyebutkan beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya penurunan permukaan tanah antara lain:

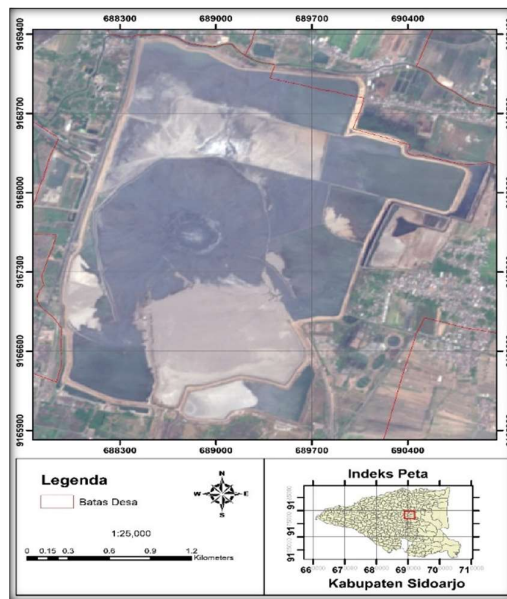
1. Penurunan muka tanah alami (*natural subsidence*) yang disebabkan oleh proses-proses geologi seperti aktifitas vulkanik dan tektonik, siklus geologi, adanya rongga di bawah permukaan tanah dan sebagainya.
2. Penurunan muka tanah yang disebabkan oleh pengambilan bahan cair dari dalam tanah seperti air tanah atau minyak bumi.
3. Penurunan muka tanah yang disebabkan oleh adanya beban - beban berat di atasnya seperti struktur bangunan sehingga lapisan-lapisan tanah dibawahnya mengalami kompaksi/konsolidasi. Penurunan muka tanah ini sering juga disebut dengan *settlement*.
4. Penurunan muka tanah akibat pengambilan bahan padat dari tanah (aktifitas penambangan).

Penurunan muka tanah berhubungan dengan fenomena lainnya seperti terjadinya banjir, keamanan bangunan, keamanan sarana perhubungan darat dan lainnya yang biasanya bersifat destruktif, maka sistem pemantauan penurunan muka tanah ini adalah suatu hal yang penting untuk dilakukan (Prasetya dkk, 2017).

2.2 Karakteristik Daerah Studi

Semburan LUSI muncul di Porong Sidoarjo yang terletak dilokasi kegiatan eksploitasi gas PT. Lapindo Brantas. Semburan ini mengakibatkan perlu adanya

monitoring penurunan permukaan tanah. Dalam dinamika bumi, permukaan tanah akan selalu mengalami deformasi dengan berbagai macam faktor penyebab. Salah satu penyebab deformasi adalah berkurangnya massa dibawah permukaan akibat pengambilan mineral bumi atau air tanah yang berlebihan. Sedangkan penurunan tanah atau amblesan yang terjadi di lumpur Lapindo Sidoarjo ini disebabkan oleh berkurangnya daya dukung batuan akibat semakin bertambahnya volume lumpur yang keluar menuju permukaan tanah dalam waktu yang lama (Yulyta dkk, 2015).



Gambar 2.1 Lokasi semburan Lumpur Lapindo Sidoarjo

Secara geologi Batuan Alluvium seluas 686,89 tersebar di semua kecamatan, akan tetapi untuk lapisan batuan Plistosen Fasien Sedimen hanya terdapat di 6 kecamatan, yaitu Kecamatan Sidoarjo, Buduran, Taman, Waru, Gedangan dan Sedati. Sedangkan lapisan tanah untuk tanah Alluvial Kelabu merata di 18 kecamatan seluas 470,18 km². Lapisan tanah jenis As, Alluvial Klb dan Coklat Kekuningan hanya ada di 4 kecamatan, yaitu Krembung, Balongbendo, Tarik dan Prambon masing-masing 4,54; 27,95; 9,87 dan 7,33 km². Lapisan tanah Alluvial Hidromort seluas 213,61 km² menyebar di 8 kecamatan, yaitu Kecamatan Sidoarjo, Buduran, Candi, Porong, Tanggulangin, Jabon, Waru dan Sedati. Adapun lapisan tanah kelabu tua seluas 8,71 km² ada di 2 kecamatan,

yaitu Kecamatan Buduran dan Gedangan (BPS (Badan Pusat Statistik Kabupaten Sidoarjo), 2019).

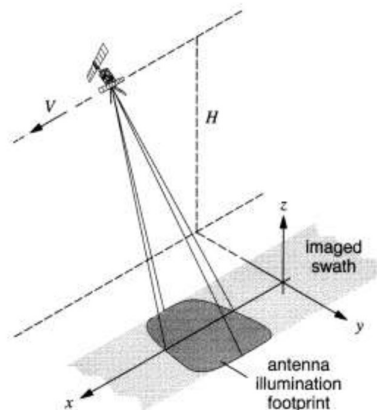
Analisis data geologi dan geofisika menunjukkan bahwa pelepasan cairan bawah permukaan biasanya berfokus pada berbagai tipologi struktur rapuh curam yang sering dikaitkan dengan antiklin. Antiklin pada dasarnya adalah lipatan batu yang mendalam, tua, yang perlahan-lahan melipat dan menindih batuan di atasnya (Istadi dkk, 2009). Kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan pengukuran gayaberat (Padmawidjaja, 2013) dalam 3 periode telah diperoleh perubahan rapat massa. Perubahan rapat massa merupakan deformasi bawah permukaan, akibat perubahan material padatan menjadi material cairan yang menunjukkan ketidakstabilan daerah tersebut. Model geologi pada penampang anomali gayaberat memotong kolam lumpur ditafsirkan bahwa sesar Watukosek, mengalami rekahan maupun sesar dangkal sebagai reaktivasi dari gaya tekan horizontal maupun vertikal.

2.3 *Syntetic Aperture Radar (SAR)*

SAR dikembangkan untuk menghilangkan keterbatasan citra optis akibat gangguan awan dan waktu perekaman yang hanya dapat dilakukan di siang hari. Sensor radar pada antenna SAR ini dapat merekam permukaan baik siang maupun malam hari karena SAR memancarkan gelombang radio (*microwave*), gelombang tersebut dipancarkan sendiri oleh sensor pemancar (*transmitter*) ke permukaan bumi kemudian diterima kembali oleh sensor penerima (*receiver*), tidak tergantung terhadap radiasi matahari dalam pengamatan permukaan bumi. Satelit SAR, seperti ALOS PALSAR, RADARSAT-2, COSMOS Sky-Med, Terra-SAR / X, Sentinel-1, dan RADARSAT Constellation Mission (RCM) yang akan datang, menyediakan data tepat waktu untuk kegiatan pemantauan lahan basah yang dinamis. Lebih lanjut, kemampuan canggih mereka, seperti data interferometrik dengan *baseline temporal* pendek, data polarimetri, data resolusi tinggi, dan produk data konsisten mode tunggal atau ganda pol standar menawarkan kemungkinan menarik untuk mengidentifikasi metode inovatif untuk lahan basah, vegetasi banjir dan aplikasi sumber daya air (Canisius dkk, 2019).

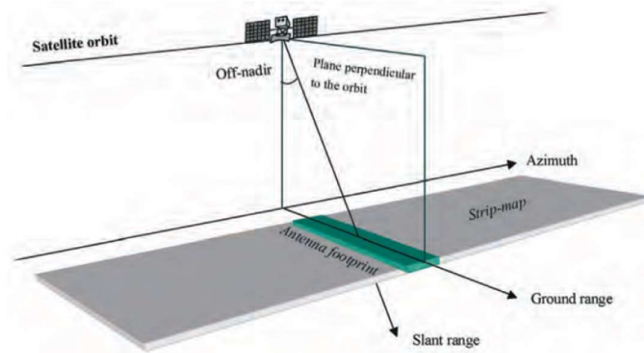
Gelombang elektromagnetik pada SAR dengan rentang frekuensi 0,3 – 40 GHz dan panjang gelombang 0,7 cm – 100 cm. Hanya beberapa band saja yang dapat digunakan untuk pencitraan karena adanya perbedaan interaksi antara atmosfer dan permukaan bumi pada setiap panjang gelombangnya (Rosa, 2018). Band yang biasa digunakan untuk pencitraan oleh radar hanya band X, C, L, dan P (Ferns dkk, 2006). Semakin panjang gelombang yang dipancarkan maka gelombang tersebut akan memiliki kemampuan penetrasi awan dan uap air yang semakin meningkat, tetapi berbalik dengan frekuensi yang digunakan sehingga band dengan gelombang yang lebih panjang (L) lebih baik dalam memberikan informasi jenis dan struktur permukaan (Johansson dkk, 2018). Panjang gelombang pembawa yang umum digunakan adalah sekitar 3 cm (X-band), 6 cm (C-band), 9 cm (S-band), dan 24 cm (L-band) (Rosen dkk, 2000)

Geometri pencitraan SAR terhadap permukaan bumi adalah radar pencitraan yang dipasang di pesawat atau satelit yang tegak lurus terhadap arah penerbangan (*side-looking*). Satelit radar mengirimkan gelombang *microwave* ke permukaan tanah secara terus - menerus dengan *look angle* (sudut antara utara geografis dan arah pancaran gelombang radar atau dengan garis tegak lurus arah terbang wahana) yang mengarah tegak lurus dengan jalur terbang (*azimuth*). Sedangkan resolusi citra radar untuk pengamatan bumi didefinisikan oleh resolusi *azimuth* pada arah terbang (Δx) dan resolusi *slant range* pada permukaan miring (ΔR) atau resolusi jarak permukaan pada arah yang berlawanan (Δy), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa ketika di orbit, satelit SAR memiliki sumbu panjang yang berhimpit dengan arah terbang atau yang disebut sebagai *azimuth* dan sumbu pendek atau yang disebut sebagai *range*. Radar mengirim gelombang ke satu sisi lintasan permukaan (*ground track*) dengan cara menyinari bumi ke seluruh area sapuan (*footprint*).



Gambar 2. 2 Geometri Pencitraan SAR. Seringkali menggunakan istilah '*along track*' atau '*azimuth*' untuk x , '*ground range*' untuk y , '*slant range*' untuk jarak suatu titik terhadap sensor SAR, dan v adalah jalur terbang satelit (Rosen dkk, 2000)

Sistem pencitraan SAR dari satelit (seperti ERS atau Envisat) digambarkan pada Gambar 2.3. Satelit membawa radar dengan antena mengarah ke permukaan bumi di pesawat tegak lurus dengan orbit (dalam praktiknya ini tidak sepenuhnya benar, karena itu diperlukan untuk mengimbangi rotasi Bumi). Kecenderungan antena sehubungan dengan nadir disebut sudut off-nadir dan dalam sistem kontemporer biasanya berkisar antara $20^\circ - 50^\circ$. Karena kelengkungan permukaan bumi, sudut datang radiasi pada medan datar rata lebih besar daripada nadir. Namun, demi kesederhanaan kita mengasumsikan di sini bahwa Bumi itu datar, dan karenanya sudut kejadian sama dengan sudut di luar nadir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Nadir adalah sudut vertikal yang dimulai atau nolnya dari arah bawah (Ferretti dkk, 2007a).



Gambar 2. 3 Sistem SAR dalam satelit (Ferretti dkk, 2007a)

2.3.1 Sentinel-1

Sentinel-1 dirancang untuk mengatasi resolusi menengah ke resolusi tinggi dengan menampilkan *wide swath* (250 km) dan resolusi radiometric (5×20 m), memungkinkan pencitraan daratan, zona pesisir, es laut, wilayah kutub, dan rute pengiriman dengan resolusi tinggi. Sentinel-1 memiliki misi pencitraan untuk (ESA, 2012), memantau zona es laut dan lingkungan kutub, pemetaan dalam mendukung kebutuhan manusia dalam pengawasan lingkungan laut, memantau risiko gerakan permukaan tanah, dan pemetaan permukaan tanah: hutan, air tanah, dan pertanian. Sentinel-1 secara kapabilitas jangkauannya lebih baik dari pada satelit penginderaan jauh Eropa (ERS-1 dan 2) dan Envisat Advanced SAR (ASAR). Dibandingkan dengan pendahulunya, misi Sentinel-1 mewakili peningkatan yang signifikan dalam mengusung sensor *Band-C*. Secara keseluruhan sensor *band* dalam pencitraan permukaan bumi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

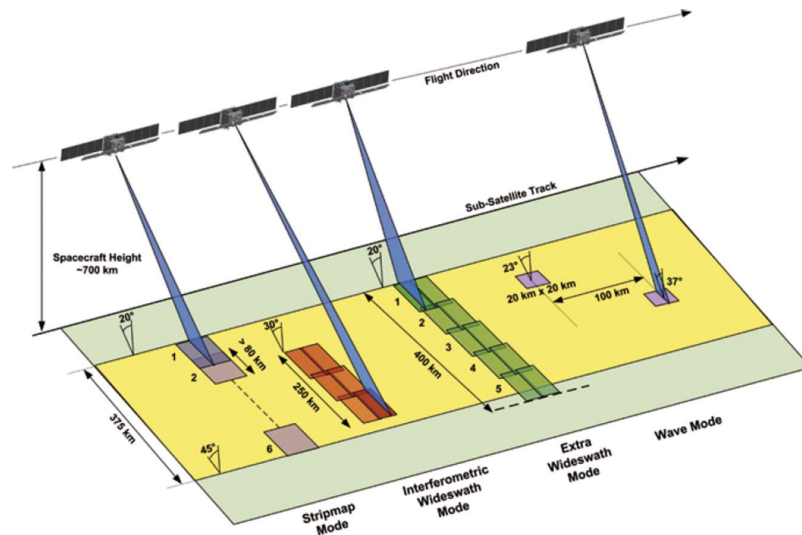
Sentinel-1 memiliki *mode* pencitraan operasional utama yaitu *Interferometric Wide-swath*. Untuk memenuhi kebutuhan akan data radar, Sentinel-1 memiliki mode utama dalam mengamati permukaan bumi yaitu mode *Interferometric Wide-swath* (IW) dan *Wave mode* (WV), dan untuk alasan kesinambungan data dan kebutuhan pengguna Sentinel-1 mengembangkan *mode Strip Map mode* (SM) dan *Extra Wide-swath mode* (EW). Secara sederhana mede pencitraan Sentinel-1 dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Tabel 2.1 Sensor *Band* Radar

Band	Frekuensi (GHz)	Panjang Gelombang (cm)	Karakteristik
Ka	40 - 27	0,75 - 1,11	Pengamatan astronomi.
K	27 - 18	1,11 – 1,67	Radar komunikasi satelit, pengamatan astronomi dan radar otomotif.
Ku	18 - 12	1,67 – 2,5	Komunikasi satelit.
X	12,5 - 8	2,4 – 3,75	Pengintaian, pemetaan dan pengawasan militer.
C	4 - 8	3,75 – 7,5	Kemampuan menembus vegetasi terbatas pada bagian atas lapisan.
S	4 - 2	7,5 – 15	Digunakan untuk aplikasi meteorologi seperti pengukuran curah hujan.
L	2 - 1	15 – 30	Kemampuan menembus vegetasi hingga kepermukaan, memantau lapisan es dan dinamika gletser.
P	1 - 0,3	30 - 100	Hingga saat ini terbatas untuk penelitian dan eksperimen. Penetrasi yang signifikan dengan kemampuan pengamatan tumbuhan, es laut, tanah, dan gletser.

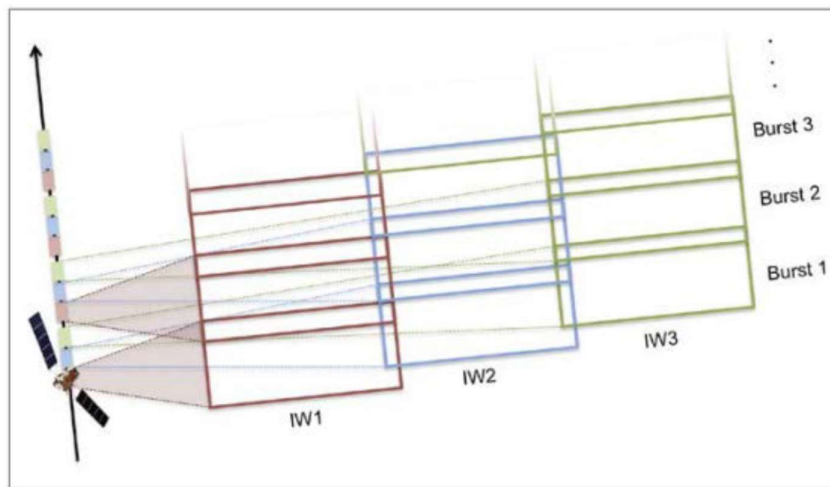
Sumber: Zhu dkk, (2018)

Untuk memenuhi kualitas gambar yang memiliki ukuran petak yang lebar, mode IW diimplementasikan sebagai mode ScanSAR dengan pemindaian azimuth progresif. Mode ini membutuhkan ketinggian *beam* antena yang tinggi (~700 km). Mode IW memiliki ukuran pencitraan 250 km dengan resolusi geometris citra sebesar 5×20 m dipermukaan tanah. Dalam mode *Strip Map*, Sentinel-1 memberikan cakupan dengan resolusi geometri 5×5 m dengan pada lebar pencitraan yang lebih sempit dari mode IW yaitu 80 km. Mode *Extra Wide-swath* mencakup lebar petak lebih dari 400 km dan memiliki resolusi sedang 20×40 m dipermukaan tanah (Vincent dkk, 2018).



Gambar 2.4 Mode Pencitraan Sentinel-1 (ESA, 2012)

Citra Sentinel-1 *wide swath* (IW) data harus diregistrasi menjadi akurasi 0,001 pixel (Lazecký dkk, 2018). Pemrosesan *coregistrasi* citra diikuti oleh koreksi fase landai yang dalam mode spesifik akuisisi citra yang disebut *Terrain Observation by Progressive Scans* (TOPS).



Gambar 2.5 Ilustrasi Pencitraan Sentinel-1 TOPS (Haghighi & Motagh, 2017)

Hal ini merupakan langkah di mana sebagian besar sistem interferometri SAR (InSAR) dibentuk kedalam *interferogram*. IW merupakan jenis pengamatan permukaan tanah standar milik Sentinel-1 yang cocok digunakan untuk aplikasi

interferometri. Dengan luas sapuan dan resolusi spasial yang dimiliki oleh IW mode, secara khusus dapat mendukung operasional yang berhubungan dengan pengamatan permukaan bumi secara rutin (Rucci dkk, 2012). Citra TOPS SAR terdiri dari 3 overlapping sub-swath (IW1, IW2, dan IW3) dengan jarak overlap ± 2 km dan pada tiap sub-swath dibentuk dari beberapa bagian yang sedikit bertampalan/overlapping atau yang disebut dengan burst (lihat Gambar 2.5).

Akurasi vertikal pada sentinel dapat dihitung dengan menghubungkan standar deviasi fase sebagai fungsi dari koherensi. Ferretti dkk (2007c), mendapat perkiraan untuk standar deviasi dalam akurasi vertikal pada persamaan (2.1):

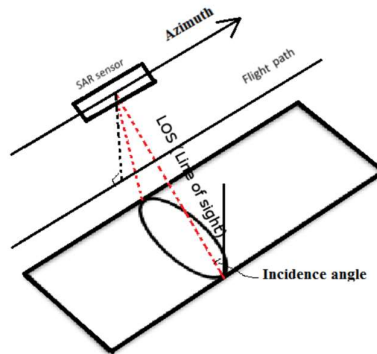
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1-\gamma^2}{2\gamma N}} \frac{R\lambda \sin\theta}{4\pi B} \quad (2.1)$$

Dimana γ adalah nilai koherensi, R adalah jarak target radar, λ adalah panjang gelombang, θ adalah sudut datang satelit, N adalah jumlah citra dan B adalah panjang *baseline*. Jika kita mengasumsikan koherensi keseluruhan $\gamma = 0,5$, dan $N = 5$ (misal ukuran tanah ~ 200 m² dibidang datar), kita mendapatkan $\sigma \cong 30$ cm. Akurasi yang sama akan dicapai dengan interferogram dengan asumsi $B_n \cong 200$ m dengan luas area lebih besar, misal 20 km². Hal ini akan menyebabkan kehilangan akurasi spasial (Ferretti dkk, 2007c). Sentinel-1 memiliki sensitivitas terhadap vegetasi yang terus bertumbuh dan perubahan permukaan yang terjadi berdasarkan *backscatter* dan gelombang mikro yang diterima oleh satelit dalam satu kali *pulse* gelombang kepermukaan bumi (Vreugdenhil dkk, 2018)

Sentinel-1A memiliki kelemahan yang berhubungan dengan kuat lemahnya interaksi panjang gelombang terhadap suatu objek (sensitifitas). Gelombang C ($\lambda=5,6$ cm) yang dibawa oleh Sentinel-1A hanya mampu berinteraksi dengan permukaan tanah jika objeknya merupakan tanah kering (*dry soil*), namun jika objeknya hutan, maka kemampuan interaksi gelombangnya hanya sampai pada batang pohonnya saja, tidak mampu menembus permukaan tanahnya (Rosen (2004) dalam (Yulyta, 2018)).

2.3.2 Interferometry Syntetic Aperture Radar (InSAR)

InSAR atau yang disebut interferogram mewakili perbedaan setiap fase *pixel* antara dua akuisisi SAR. Secara umum, sebuah interferogram akan berisi informasi topografi dan gerak permukaan (Tolomei dkk, 2015).



Gambar 2. 5 Geometri Satelit SAR dalam model InSAR (Tolomei dkk, 2015)

Perubahan fase variasi gelombang sinyal elektromagnetik disebabkan oleh perubahan fisik Bumi. Namun, untuk membentuk interferogram, setidaknya diperlukan dua akuisisi data SAR yang merupakan langkah mendasar sebelum pembuatan interferogram. Idealnya, kondisi berikut harus dipenuhi sensor yang sama, area yang sama sesuai dengan lokasi sensor yang sama dan geometri tampilan yang sama (Gambar 2.4). Untuk memproses interferogram dari data *Single Look Complex* (SLC), mengikuti persamaan umum (Massonnet & Feigl, 1998):

$$I = \frac{\Sigma f(M)f(S^*)\exp(2\pi iG)}{\sqrt{\Sigma f(M)^2}\sqrt{\Sigma f(S)^2}} \quad (2.2)$$

Istilah M (master), S (slave), I (fungsi interferogram), dan G (fase orbit dan topografi) adalah fungsi implisit dari koordinat titik gambar pada SAR. Filter *f* dirancang untuk mengurangi perbedaan dalam respons sinyal radar setiap trek satelit dari bidang yang sama. Fase yang terbentuk dalam interferogram memiliki rentang dari 0 hingga 1 yang disebut koherensi. Koherensi sempurna 1 akan berarti bahwa setiap piksel setuju dengan fase di dalam setiap selnya, situasi yang sangat tidak mungkin jika sel tersebut mengandung lebih dari satu piksel. Nilai

mendekati nol menunjukkan pengukuran fase yang tidak berarti (Massonnet & Feigl, 1998).

Perubahan deformasi permukaan dapat menyebabkan perubahan fase pada data radar yang diperoleh. Informasi fase yang diamati ini terbatas atau dibatasi dalam interval $-\pi$ sampai π , yang merupakan bagian dari komponen sinyal interferogram. Interferogram yang terbentuk dari data SLC biasanya disebut sebagai "interferogram mentah", dengan kata lain, interferogram berisi semua informasi fase dalam persamaan sebelumnya (Liu, 2015). Pembentukan dalam analisis InSAR mempertimbangkan koherensi pada setiap pasang citra. Dari keseluruhan data pasangan SAR dalam InSAR kesimpulan umum tentang koherensi yang didapatkan yaitu (Ferretti dkk, 2007b) :

1. Daerah perkotaan dan daerah dengan batuan terbuka mempertahankan tingkat koherensi yang tinggi bahkan setelah beberapa tahun dengan tingkat koherensi lebih dari 0.2
2. Area yang jarang ditanami dan lahan pertanian umumnya menunjukkan koherensi tinggi pada akuisisi Tandem (interval 1 hari) dan koherensi yang jauh lebih rendah setelah 35 hari. Meskipun demikian, nilai koherensi yang cocok sering dideteksi dengan membandingkan *image* yang diperoleh dengan interval waktu beberapa tahun, yaitu pada periode yang sama setiap tahunnya .
3. Daerah berhutan (terutama hutan tropis) dan cekungan air yang memiliki tingkat koherensi kurang dari 0.2 tidak menunjukkan tingkat koherensi yang memadai bahkan dalam interval 1 hari.

Akhirnya, deformasi geometri yang ditunjukkan oleh SAR harus selalu dipertimbangkan, untuk memaksimalkan koherensi perlu dipahami bahwa :

1. Area dalam *foreshortening* atau distorsi ekstrim dari sudut pengambilan gambar citra menjadi tidak koheren setelah *baseline* tegak lurus lebih dari beberapa meter
2. Daerah dengan kemiringan yang berlawanan biasanya menunjukkan koherensi terbaik jika tidak dalam bayangan, karena resolusi spasial

lebih tinggi dan *baseline* kritis aktual lebih besar daripada bidang datar.

2.3.3 Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)

Pada saat ini, baik sistem pesawat ruang angkasa dan sistem radar udara digunakan untuk membentuk interferogram. Sumber daya pesawat ruang angkasa memiliki keunggulan seperti cakupan global dengan dampak turbulensi yang lebih sedikit dan kontrol lintasan yang lebih mudah (Massonnet & Feigl, 1998). Dasar dari metode DInSAR adalah teknik analisa pasangan citra SAR untuk mengidentifikasi perubahan permukaan hingga sub-sentimeter di sepanjang garis pengamatan sensor ke target atau *Line of Sight* (LoS).

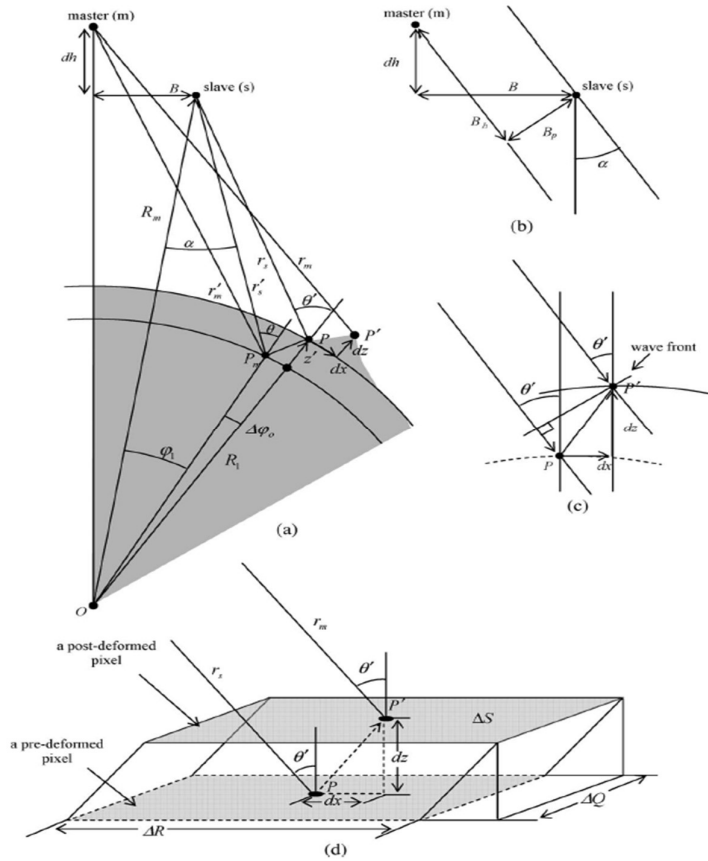
Dari prosedur DInSAR, setelah perataan interferogram, komponen fase dominan DInSAR terdiri atas dampak topografi dan deformasi ditunjukkan dalam persamaan (2.3) (Hanssen, 2003):

$$\phi_p = -\frac{4}{\lambda} \left(D_{defo} + \frac{B_{\perp p}}{R_p \sin \theta_p^0} h_p \right) \quad (2.3)$$

Dimana λ adalah panjang gelombang, D_{defo} adalah deformasi permukaan LOS, $B_{\perp p}$ adalah garis dasar tegak lurus, R_p adalah kisaran dari hamburan p ke sensor, θ adalah sudut pandang dan h_p adalah perubahan ketinggian yang menciptakan perubahan rentang sama dengan ukuran rentang pixel. Dengan menggunakan data DEM sebagai koreksi topografi sehingga didapat deformasi atau pergerakan permukaan tanah (Ferretti dkk, 2007c) sehingga didapat persamaan (2.4) :

$$\phi(p) = \frac{4\pi B_{\perp p}}{\lambda R_p} [\Delta R(p)] \quad (2.4)$$

Dimana $\phi(p)$ adalah fase topografi yang dihitung pada grid DEM, $B_{\perp p}$ adalah garis dasar tegak lurus, λ adalah panjang gelombang *microwave* yang dipancarkan satelit, $\Delta R(p)$ adalah jarak miring antara target-sensor. Implementasi informasi fase dari dua data kompleks sebagai data DInSAR untuk mengambil perubahan volume yang disebabkan oleh permukaan tanah jangka panjang yang berurutan deformasi, terutama penurunan muka tanah atau peningkatannya. Gambar 2.5 menunjukkan geometri DInSAR untuk perubahan volume atau tanah.



Gambar 2.6 Geometri DInSAR. (a) Geometri DInSAR untuk deformasi lahan (pengangkatan). (b) Geometri *baseline*. (c) Geometri deformasi tanah pada permukaan bumi (terangkat). (d) Geometri perubahan volume berbasis *pixel* (Sumantyo dkk, 2012)

Dalam Geometri DinSAR (Gambar 2.5), dimana *m* (*master*) dan *s* (*slave*) menunjukkan garis dan baris piksel dalam gambar SAR dan dh adalah jarak horizontal *master* dan *slave*. λ adalah panjang gelombang, B_h dan B_p adalah garis horizontal dan *baseline perpendicular*, $\alpha_{m,s}$ adalah sudut off-nadir, $\theta'_{m,s}$ adalah *incidence angle* (sudut perubahan) pada piksel, R adalah rentang miring sementara, dan r_m adalah rentang kemiringan. Selain itu, $z'_{m,s}$ adalah informasi topografi dan $\phi_{m,a}$ adalah perbedaan fase. Deformasi tanah diasumsikan sebagai arah vertikal (*subsidence* atau *uplift*) dz , dan deformasi horizontal dx diabaikan, $\Delta S = \Delta R \Delta Q$ resolusi spasial di sepanjang rentang tanah dan arah azimuth.

2.3.4 Filtering and Coherence

Fase *noise* dapat diperkirakan dari setiap pasangan interferometrik SAR melalui koherensi lokal (γ). Koherensi lokal adalah koefisien korelasi silang dari pasangan gambar SAR yang diperkirakan melalui beberapa piksel dalam *range* dan *azimuth*, setelah semua komponen fase *deterministic* (fase dimana tidak ada keacakan yang terlibat dalam pengembangan kondisi fase itu sendiri) dikompensasi. Komponen fase *deterministic* sebagai pendekatan linier baik dalam *azimuth* dan *slant-range*. Selain itu, prosedur *multilook* yang kompleks mengurangi *noise* yang tidak berkorelasi karena *temporal*, *baseline* dan volume, tetapi tidak dapat menghilangkan artefak yang berkorelasi spasial (Ferretti dkk, 2007a).

Filtering berfungsi untuk melakukan pemfilteran yang bertujuan mereduksi fase *noise* yang berkorelasi dalam dua gambar SAR, sehingga *noise* yang terdapat dalam setiap pasangan gambar SAR dihilangkan (Goldstein & Werner, 1998). *Filter Goldstein*, sebagai metode penyaringan dan menghaluskan intensitas sampel dengan *Fourier-transformed* (sebuah alat untuk mentransformasikan suatu bentuk gelombang (sebuah fungsi atau sinyal) ke dalam sebuah representasi alternatif) dalam interferogram. Secara luas *filter Goldstein* digunakan untuk InSAR karena kemampuan penekanan *noise* dan operasi yang cepat. *Filter Goldstein* dapat dinyatakan dalam persamaan (Feng dkk, 2016):

$$H(f_x, f_y) = S \{|Z(f_x, f_y)|\}^\alpha \cdot Z(f_x, f_y) \quad (2.5)$$

Dimana f_x dan f_y masing-masing mewakili frekuensi spasial dalam *range* dan *azimuth*, α adalah parameter filter, $Z(f_x, f_y)$ mewakili spektrum *fourier* dari setiap pemfilteran dan S adalah fungsi *filter*, yang biasanya dicapai dengan *filter low-pass*. Parameter α , dipilih berdasarkan nilai dalam kisaran $[0, 1]$, menunjukkan tingkat efektivitas operasi penyaringan yang diinginkan. Untuk $\alpha = 0$, kita memiliki $H(f_x, f_y) = Z(f_x, f_y)$ yang berarti tidak ada pemfilteran yang diterapkan. Efek penyaringan akan menjadi lebih signifikan dengan peningkatan nilai α . Nilai α yang besar akan menyebabkan hilangnya resolusi dalam fase yang

difilter, sementara nilai yang kecil akan mengurangi kemampuan menghilangkan *noise*. Secara umum, sulit untuk memilih nilai yang sesuai untuk α , dan untuk filter Goldstein asli, $\alpha = 0,5$ biasanya digunakan untuk memastikan keseimbangan antara *noise* dan fase.

Interferogram adalah informasi fase yang berbentuk *wrapped* atau fase hasil pengukuran. Dari informasi fase, diperkirakan koherensi dari dua citra dapat dihasilkan persamaan (2.6). Nilai koherensi menunjukkan cara lain untuk mengukur kualitas interferogram dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Diperkirakan nilai koherensi memiliki rentang 0 hingga 1, nilai koherensi yang lebih tinggi menunjukkan pengukuran yang lebih baik atau SNR piksel yang lebih tinggi (Goldstein & Werner, 1998). Secara umum koherensi memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$\gamma_X = \frac{\sum u_1(x)u_i^2}{\sqrt{\sum |u_1(x)|^2 \sum |u_2(x)^*|^2}} \quad (2.6)$$

Dimana $u(x)$ adalah nomor kompleks tampilan tunggal dari target pada gambar SAR, $u(x)^*$ adalah konjugasi dari target yang sesuai, dan i menunjukkan gambar *master* dan *slave* ketika masing-masing sama dengan 1 atau 2. Koherensi yang diperkirakan dapat diekstraksi baik dari interferogram asli atau interferogram yang difilter. Dalam penelitian ini, koherensi dihasilkan dari interferogram yang disaring berdasarkan beberapa pertimbangan: (1) koherensi berkurang secara linier dengan garis dasar menjadi nol ketika mencapai panjang *baseline critical* (*Bcr*); (2) koherensi secara intuitif menunjukkan dekorelasi *temporal* antara akuisisi *master* dan *slave* dengan *baseline* waktu yang lebih lama; (3) dekorasi spasial yang sistematis dari dua gambar SAR.

2.3.5 Permanent Scatter InSAR (PS-InSAR)

Salah satu kesulitan utama yang dihadapi dalam DInSAR adalah dekorasi *temporal* dan *geometric*. Prinsip utama dari teknik PS-InSAR memanfaatkan data pengamatan citra SAR *multitemporal* dalam rentang waktu panjang untuk mendeteksi titik-titik potensial koherensi. Titik-titik *Permanent Scatterer* (PS) pada umumnya berupa objek-objek solid di permukaan bumi yang menjadi

pemantul alami yang relatif koheren terhadap dimensi waktu. Sebaran titik-titik PS dan perbedaan nilai fase untuk setiap individu titik yang dianalisis lebih lanjut menggunakan metode PS-InSAR (Prasetyo & Subiyanto, 2014). Tujuan utama dalam metode ini adalah identifikasi piksel tunggal yang disebut *permanent scatter* (PS) yang koheren dalam interval waktu yang lama dan untuk sudut pandang variasi yang lebar (Ferretti dkk, 2007c).

Pengembangan metode PS-InSAR didasarkan atas teknik DInSAR dimana pada prinsip teknik ini bersifat unik, mencakup daerah liputan yang luas untuk pelaksanaan aplikasi pengamatan dan pengukuran deformasi (Chang dkk, 2005). Karena teknik DInSAR menggunakan citra radar *multitemporal* maka akan timbul *temporal decorrelation* dan *atmospheric dishomogeneities* yang mempengaruhi kualitas hasil interferogram. Oleh sebab itu, dikembangkanlah teknik PS yang dapat mengeliminasi efek tersebut dan meningkatkan akurasi DEM hingga fraksi dibawah sub-meter (bahkan hingga akurasi hingga milimeter per tahun dalam pengamatan deformasi).

Tujuan dari penerapan metode PS-InSAR pada awal penelitian (Ferretti dkk, 2001) adalah melakukan identifikasi pada *single coherence pixels* yang dimulai dari beberapa citra SAR yang terpisah oleh baseline yang besar dalam rangka mendapatkan akurasi DEM hingga sub-meter dan pergerakan permukaan bumi pada area koheren rendah berdasarkan basis piksel - piksel. Dimana secara ringkasnya, bertujuan mendeteksi dan mengamati pergeseran di kawasan pemukiman dengan akurasi hingga milimeter per tahunnya.

Data pertama kali di *co-registration* bersama data *master* dan DEM dari area studi dimulai dari pasangan *baseline temporal* rendah (Ferretti dkk, 2007c). Selanjutnya, N interferogram diferensial antara semua gambar SAR dan *master* dihitung. Setelah kompensasi DEM, fase residual interferogram sehingga didapat persamaan:

$$\Phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} r_{Ti} + \alpha_i + n_i + \varepsilon_{topo_i} \quad (2.7)$$

Dimana λ adalah sistem panjang gelombang yang dipancarkan satelit, α_i adalah kontribusi fase atmosfer, n_i adalah *noise* dekorasi, ϵ_{topo_i} kontribusi fase karena kemungkinan kesalahan dalam DEM (sebanding dengan garis dasar normal setiap gambar B_{n_i} , dan $r_{\Gamma i}$ adalah gerakan target yang mungkin ke arah *line of sight* (LoS).

2.4 Uji Statistik Distribusi Tabel F (*Fisher*)

Pengujian adalah metode untuk melihat hasil perubahan permukaan yang terjadi, dimana perubahan yang terjadi berbeda akibat perbedaan nilai ambang batas koherensi. Uji ini menggunakan distribusi *Fisher* dengan derajat kebebasan dan tingkat kepercayaan tertentu sebagai pembandingnya. Pembanding yang dimaksud adalah nilai standar deviasi yang didapatkan pada masing – masing *coherence*. Untuk melakukan uji ini merujuk pada persamaan (2.8) (Montgomery & Runger, 2003):

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{S_i^2}{S_{ii}^2} \quad (2.8)$$

Dimana S adalah rata – rata standar deviasi PS yang terbentuk pada setiap koherensi (0,25, 0.50, dan 0,75), F adalah nilai F hitung, yang mana akan dibandingkan dengan F table (Montgomery & Runger, 2003) dengan hipotesa:

$$F_{\text{Hitung}} \leq F_{(\alpha/2, df1, df2)} \quad (2.9)$$

$$H_0 = F_{\text{Hitung}} \leq F_{(\alpha/2, df1, df2)} \quad (2.10)$$

$$H_a = F_{\text{Hitung}} > F_{(\alpha/2, df1, df2)} \quad (2.11)$$

Dimana F adalah nilai pada tabel distribusi *Fisher* dengan α sebagai tingkat kepercayaan dimana tingkat kepercayaan dalam penelitian ini 95% pada tabel F , dan df (*degree of freedom*) adalah nilai jumlah *sample*. Penerimaan H_0 memenuhi persamaan (2.10), sehingga nilai koherensi yang memenuhi persamaan ini dan artinya tidak ada perbedaan yang signifikan pada hasil *cumulative displacement* dan *velocity* pada setiap koherensi yang berbeda. Sedangkan penolakan H_0 akan memenuhi persamaan (2.11), sehingga nilai koherensi yang memenuhi persamaan ini dan artinya berbeda secara signifikan.

2.5 Penelitian Terdahulu

Fukushima dkk, (2009) Gunung lumpur LUSI memulai letusannya pada tanggal 29 Mei 2006, bersebelahan dengan sumur eksplorasi hidrokarbon di Jawa Timur. Penurunan permukaan tanah di sekitar lubang letusan LUSI telah direkam dengan baik oleh satelit ALOS PALSAR. Penelitian ini menerapkan teknik InSAR pada sepuluh *scene* data PALSAR, yang diperoleh antara 19 Mei 2006 dan 21 Mei 2007, untuk mendapatkan nilai perubahan permukaan tanah berkelanjutan di sekitar LUSI. Meskipun perubahan permukaan di daerah yang paling dekat dengan lubang erupsi (perpanjangan spasial sekitar 1,5 km) tidak terdeteksi karena lumpur yang meletus, semua interferogram yang diproses menunjukkan penurunan permukaan di daerah elipsoidal sekitar 4 km (utara-selatan) dan 3 km (timur-Barat), berpusat di lubang erupsi utama. Secara khusus, interferogram yang mencakup empat bulan pertama hingga 4 Oktober 2006 dan 46 hari berikutnya antara 4 Oktober 2006 dan 19 November 2006 menunjukkan setidaknya sekitar 70 cm dan 80 cm. Kemungkinan penyebab amblesan, yaitu efek pemuatan lumpur yang meletus, pembuatan saluran lumpur silinder, dan penurunan tekanan dan penipisan material di kedalaman bumi.

Thomas dkk, (2010) penelitian ini menyajikan hasil pemantauan DInSAR 2 tahun memanfaatkan data ALOS PALSAR di seluruh gunung lumpur LUSI. Pemrosesan DInSAR diterapkan pada urutan gambar yang diperoleh selama 3 hingga 6 bulan antara Mei 2006 dan Mei 2008. Hasilnya menyoroti kemampuan ALOS PALSAR dalam mendeteksi desimal penurunan permukaan tanah yang koheren untuk membantu peneliti dalam analisis struktur, dinamika dan stabilitas keseluruhan gunung lumpur dan wilayah sekitarnya. Aliran lumpur dan deformasi permukaan tanah telah menyebabkan kerusakan fisik, lingkungan, ekonomi dan sosial yang signifikan bagi masyarakat lokal dan regional. Masa hidup letusan LUSI yang tersisa masih belum diketahui, tetapi perkiraan terbaik adalah bahwa letusan LUSI akan terus meletus selama beberapa dekade dan bukan hanya beberapa tahun. Urutan *interferogram diferensial* yang dihasilkan sejauh ini adalah demonstrasi yang sangat baik dari kemampuan sensor ALOS PALSAR L-

band. Penelitian ini menunjukkan tiga interferogram yang diolah menghasilkan *line of sight subsidence* dikawasan LUSI antara 17-18 cm.

Dalam penelitian Gauchet dkk, (2011) metode InSAR digunakan dalam memonitoring semburan LUSI 2006 – 2010. InSAR menggunakan perbedaan fase antara dua gambar SAR bernilai kompleks untuk memberikan perpindahan tanah, dengan akurasi yang baik. Pemrosesan interferometri adalah topik yang dieksplorasi dengan baik selama lebih dari satu dekade. Untuk mempelajari Lusi, peneliti menggunakan InSAR *repeat-pass*, dengan gambar ALOS / PALSAR. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah interferogram yang terbuka menunjukkan bahwa antara 19 Mei dan 04 Oktober 2006, terjadi perpindahan di sekitar semburan LUSI. Letusan terjadi pada akhir Mei 2006 dan antara kedua tanggal tersebut, lumpur menutupi beberapa kilometer persegi kawasan pemukiman. Kemudian titik stabil yang tidak terlalu dekat dengan lokasi semburan, dipilih untuk mendapatkan nilai *subsidence* yang sebenarnya, meskipun indeks dispersi yang sangat baik, *subsidence* pada titik-titik yang diperoleh tidak teratur. Akhirnya, hasil yang baik ditemukan tetapi untuk beberapa tanggal terdapat masalah mendasar yang menimbulkan nilai fase yang salah dan karenanya *subsidence* yang terjadi dianggap salah.

Penelitian *Ground deformation associated with the eruption of Lumpur Sidoarjo mud volcano, east Java, Indonesia* (Aoki & Sidiq, 2014) memanfaatkan data ALOS dalam melihat deformasi yang terjadi pada kawasan semburan LUSI antara 2006 dan 2011 dari analisis deret waktu yang terjadi pada kawasan semburan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan terjadi di sebelah Barat pusat erupsi serta di sekitar lubang angin. Total perubahan LOS yang diamati mencapai hingga 200 mm. Peneliti juga menyimpulkan bahwa perubahan LOS meluruh secara eksponensial setelah pertengahan tahun 2008 dengan konstanta waktu 1,5 - 2,5 tahun di kedua bidang. Waktu peluruhan singkat ini menunjukkan bahwa letusan tidak akan bertahan lama. Pengamatan ini juga menunjukkan bahwa daerah dekat saluran bagian Barat telah terhubung sejak pertengahan 2008 dengan geometri stasioner. Penciptaan sistem ini membuat

ekstrusi lumpur dikendalikan oleh gradien tekanan antara reservoir lumpur dan permukaan.

Shirzaei dkk, (2015) menyatakan analisis deformasi permukaan menyarankan peluruhan eksponensial dari tekanan di sumber lumpur tetapi tidak membatasi lokasi, geometri, dan evolusi sumber yang mungkin dari lumpur dan cairan yang meletus. Untuk memetakan deformasi permukaan, peneliti menggunakan *multitemporal* InSAR dan menganalisis set data L-band dengan populasi yang baik yang diperoleh oleh ALOS antara Mei 2006 dan April 2011 dengan rata – rata subsidence 100 mm/tahun. Peneliti kemudian menerapkan pemodelan invers bergantung terhadap waktu. Perubahan volume terjadi di dua wilayah di bawah Lusi, pada 0,3–2,0 km dan kedalaman 3,5–4,75 km. Perubahan volume kumulatif dalam sumber dangkal ~ 2–3 kali lebih besar dari pada sumber dalam. Pengamatan dan model menunjukkan bahwa sumber dangkal memainkan peran kunci dengan memasok lumpur yang meletus, tetapi cairan tambahan naik dari kedalaman > 4 km pada rentang waktu erupsi.

Penelitian ini terfokus pada penerapan *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) untuk mendeteksi dan pengukuran deformasi permukaan di wilayah Catalonia (Spanyol) menggunakan data Sentinel-1. Dalam penelitian ini, hasil yang dicapai sejauh ini menggunakan teknik PSI dan Sentinel-1 telah ditampilkan. Prosedur interferometrik yang digunakan oleh penulis untuk memperoleh peta deformasi dan deret waktu dari setumpuk gambar interferometrik Sentinel-1 telah dijelaskan, yang terdiri dari pendekatan pembukaan fase *unwrapped*. Peta deformasi berasal dari area seluas 6750 km², sebuah wilayah luas di Catalonia (Spanyol), yang terdiri dari 6 scene, telah diilustrasikan. Kepadatan PS yang dicapai dalam penelitian ini telah terbukti baik: 620 PS / km² di daerah perkotaan dengan cakupan dan koneksi yang baik antara daerah perkotaan. Langkah selanjutnya dari prosedur ini adalah melakukan analisis untuk 26 *scene* Sentinel-1 meliputi seluruh wilayah. Tujuannya adalah untuk memperoleh peta deformasi di atas wilayah Catalonia, melakukan densifikasi lokal untuk mempelajari fenomena deformasi yang terjadi (Devanthery dkk, 2016).

Penelitian ini menggunakan sistem penentuan posisi global dan teknik InSAR, serta observasi lapangan terhadap retakan, pemindaian laser terestrial dan pengukuran geo-listrik, untuk menentukan tanda-tanda deformasi tanah di sekitar gunung lumpur LUSI dan untuk menjelaskan mekanisme pemicunya. Menggunakan metode InSAR, 150 pasang interferogram dihasilkan dari 66 ALOS PALSAR dari Juni 2006 hingga Desember 2009. Citra satelit referensi dari 19 Mei 2006 (sebelum letusan dimulai) digunakan untuk menghasilkan interferogram untuk periode antara tanggal ini dan tanggal berikutnya. *Baseline temporal* dari gambar bervariasi dari 46 hingga 138 hari. Pasangan interferometrik dipilih dengan Panjang *baseline* maksimum 2 km. Survei GPS dan pengukuran InSAR telah dengan jelas menjelaskan bagaimana deformasi tanah terjadi di sekitar gunung lumpur LUSI. Laju vertikal dan horizontal masing-masing sekitar 4 dan 1 cm perhari yang diamati dalam periode waktu penelitian. Penelitian ini juga dapat melihat tren linear deformasi (Andreas dkk, 2017).

Natsuaki dkk, (2018) dalam penelitiannya menyajikan evaluasi analisis koherensi interferometrik *multi-temporal* menggunakan dataset ALOS PALSAR-2 untuk penilaian kerusakan akibat gempa bumi di Jepang tahun 2016 khususnya di daerah perkotaan dengan Teknik InSAR. Analisis koherensi interferometrik belum dievaluasi untuk keterbatasan sensitivitasnya dan ukuran bangunan yang rusak. Secara khusus, korelasi antara analisis koherensi dan tingkat kerusakan yang dirujuk oleh penilaian arsitektur. Sebagai referensi, kerusakan bangunan diklasifikasikan dengan *European Macroseismic Scale* 1998 (EMS-98). Untuk estimasi koherensi diatur dalam skala piksel 5x5. Penelitian ini menggunakan nilai ambang batas koherensi dari 0,2 hingga 0,6 pada interval 0,1. Hasil percobaan pada skala yang lebih kecil di lokasi yang rusak parah menunjukkan dua aspek. Pertama, di sana adalah korelasi antara bangunan yang dapat dibedakan sebagai rusak parah atau sedang, dan bangunan yang koherensi interferometriknya menurun lebih dari 0,3. Kedua, jika bangunannya besar (>200 m²), ada korelasi kuat antara bangunan dengan koherensi interferometrik menurun lebih dari 0,3 dan bangunan yang tingkat kerusakannya tingkat 2 atau lebih berat ketika tingkat kerusakan diklasifikasikan oleh EMS-98. Studi kasus ini menyarankan bahwa

koherensi interferometrik dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan sedang (tingkat 2 atau lebih berat) namun tidak untuk bangunan yang rusak parah (tingkat 5). Namun, parameter yang diturunkan ditentukan untuk gempa bumi.

Penelitian membahas identifikasi akurat zona kerusakan akibat gempa dengan menggunakan pasangan gambar koherensi dari satelit Sentinel-1 sebelum dan setelah gempa bumi. Penelitian ini menggunakan teknik InSAR dalam proses untuk memperhitungkan variasi koherensi antara pasangan gambar coseismik dan preseismik. Perbedaan koherensi antara dua pasangan gambar SAR adalah informasi yang berguna untuk mendeteksi bencana tertentu di area berskala regional setelah gempa bumi. Tiga puluh empat gambar Sentinel-1 antara Januari 2015 dan Februari 2016 dikumpulkan untuk memproses 30 pasangan gambar preseismik dan dua pasangan gambar coseismik untuk menilai berbagai jenis bencana di Kota Tainan di Barat daya Taiwan, tempat kerusakan parah teramati setelah peristiwa gempa Meinong. Penelitian ini menggunakan nilai ambang batas koherensi antara 0,25 hingga 0,75. Hubungan yang sempurna memiliki korelasi koherensi 1, koherensi 0,75 dan 0,5 masing-masing dianggap sebagai hubungan yang kuat dan sedang. Selain itu, koherensi lemah memiliki nilai kurang dari 0,25. Ketika koherensi turun ke nilai kurang dari 0,5, itu berarti bahwa korelasinya lebih rendah dari hubungan yang seharusnya. Perbedaan koherensi didapat dari koherensi alami. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, kami menggunakan nilai 0,5 menjadi kedua ambang batas untuk menyaring efek fitur permukaan (Lu dkk, 2018).

Kota Constantine, Aljazair, dan sekitarnya selalu dipengaruhi oleh ketidakstabilan dan penurunan permukaan yang disebabkan oleh manusia dan alam. Formasi lempung *neogen*, yang membentuk sebagian besar dari kota Constantine, sangat peka terhadap keberadaan air, yang membuatnya rentan terhadap tanah longsor. Identifikasi dan pemantauan cepat dan akurat dari area utama yang menghadapi risiko berbahaya yang ada atau potensial pada skala regional, serta mengukur jumlah perpindahan sangat penting untuk konservasi dan pembangunan berkelanjutan Constantine. Dalam tiga dekade terakhir, penerapan

teknik interferometri radar untuk pengukuran gerakan medan level milimeter telah menjadi salah satu alat paling kuat untuk pemantauan deformasi tanah karena jangkauannya yang besar dan biaya yang rendah. *Persistent Scatterer* (PS-InSAR) memiliki potensi yang ditunjukkan untuk memantau berbagai skenario peristiwa bahaya dan melacak evolusi spasial temporal. Kami mendemonstrasikan efisiensi data Sentinel-1 untuk pemantauan deformasi di Constantine yang terletak di timur laut Aljazair, dan bagaimana serangkaian informasi seperti peta geologi dan pengukuran tanah diintegrasikan untuk pemetaan deformasi. Salah satu hasil dari penelitian ini adalah *subsidence* dapat dilihat di bagian selatan Constantine, terutama di ujung selatan bandara, kami menemukan kecepatan negatif dari *ascending* antara -14 hingga -25 mm/tahun dan kecepatan negatif dari *descending* mulai dari -13 hingga -19 mm/tahun. Ini menunjukkan penurunan yang relatif kuat di ujung selatan bandara, yang dapat mempengaruhi landasan pacu dalam waktu dekat (Beladam dkk, 2019).

Daerah beriklim *oceanic* (juga dikenal sebagai iklim pantai Barat laut, iklim maritim, iklim Cascadia dan iklim Inggris, dan tanah tinggi subtropis) memiliki tantangan untuk penerapan interferometri SAR *multi-temporal* berbasis satelit. Bentang alam kawasan tersebut biasanya ditandai oleh cakupan vegetasi luas yang bervariasi secara musiman yang dapat menyebabkan koherensi temporal yang rendah dan membatasi kemampuan deteksi citra SAR saat diperoleh. Dalam penelitian ini, penulis mengeksplorasi resolusi yang ditingkatkan dalam ruang dan waktu dari satelit Sentinel-1A/B yang baru - baru ini digunakan untuk mendeteksi dan memantau gerakan tanah yang terjadi di dua wilayah studi di Republik Irlandia. Dataset yang tersedia, terdiri dari lebih dari 100 *scene* yang diperoleh dalam orbit *ascending* dan *descending* dari April 2015 hingga Maret 2018, diproses dengan menggunakan pendekatan PS-InSAR. Hasil yang diperoleh menyoroti adanya gerakan tanah skala kecil di lingkungan perkotaan dan hutan dengan tingkat perpindahan di sepanjang garis pandang satelit (*line of sight*) hingga -17 mm / tahun (Fiaschi dkk, 2019).

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yaitu pada penelitian ini menggunakan data Sentinel-1, metode PS-InSAR, dan menganalisis perubahan permukaan tanah berdasarkan ambang batas koherensi yang berbeda. Pemanfaatan produk data Sentinel-1 ke berbagai bidang aplikasi adalah berdasarkan kemampuan fase sinyal radar yang koheren untuk berhubungan dengan posisi dan perpindahan target poin menggunakan teknik PS-InSAR, kumpulan besar data radar dapat diproses untuk menentukan populasi titik (poin PS-InSAR) dengan informasi geometris yang akurat, termasuk kecepatan. Teknik ini telah divalidasi dan memungkinkan untuk mengukur deformasi tanah beberapa milimeter per tahun (ESA, 2012). Pengukuran perpindahan yang tepat dapat digunakan untuk memetakan stabilitas tanah dan mengidentifikasi dan mengkarakterisasi pola gerakan. Khusus yang relevan dengan penilaian risiko kebencanaan bersinambungan dengan data jangka panjang yang ditawarkan oleh SAR. Lebih dari 15 tahun data yang diarsipkan tersedia untuk pemetaan bahaya historis dalam pemetaan deformasi. Produk interferometrik Sentinel-1A (dari mode IW) akan memberikan data resolusi dengan cakupan spasial yang tinggi (250 km) dan pengambilan sampel *temporal* tinggi (12 hari), membantu memastikan kepadatan tinggi pencar yang persisten untuk menyediakan pengukuran kecepatan (Vincent dkk, 2018). Penelitian ini memanfaatkan metode PS-InSAR dalam memonitoring perubahan permukaan pada kawasan Lumpur Sidoarjo. Rentang data yang digunakan adalah 2017 hingga 2019 dengan total 30 *scene* citra. Metode PS-InSAR digunakan untuk memperbaiki *spectral noise* yang tidak didapatkan dengan melakukan pengolahan InSAR maupun DInSAR. Penelitian ini menggunakan perbedaan nilai ambang batas *coherence* (0,25, 0,5, dan 0,75) dalam melihat perubahan permukaan tanah yang terjadi disekitar kawasan Lumpur Sidoarjo.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dari tesis ini adalah Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Secara geografis Kabupaten Sidoarjo terletak antara 7°27'10,9" LS dan 112°43'2,4" BT, dengan luas wilayah 714,243 km². Kabupaten Sidoarjo berbatasan sebelah utara dengan Kota Surabaya dan kabupaten Gresik. Di sebelah timur berbatasan dengan Selat Madura, sebelah selatan berbatasan dengan Kabupaten pasuruan dan sebelah Barat berbatasan dengan Kabupaten Mojokerto.

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu :

1. Citra Sentinel 1 IW (SLC) pada tahun perekaman 2017 hingga 2019 dengan polarisasi VV (pancaran dari sensor vertikal, backscatter dari objek vertikal) *descending*, kumpulan data dapat dilihat pada Tabel 3.1. Data ini diunduh secara gratis pada website vertex.daac.asf.alaska.edu/
2. Data *Digital Elevation Model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 second* dengan resolusi 30 meter.

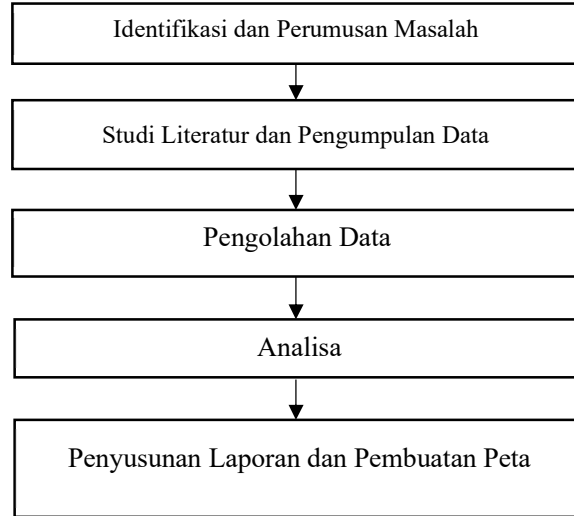
3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). *Software* utama yang digunakan dalam proses pengolahan data adalah SARPROZ (Perissin, 2009) yang merupakan *open source software* dan merupakan *compile* dari *software* MATLAB. *Software* ini digunakan untuk mengaplikasikan metode PS-InSAR. Penelitian ini juga menggunakan *software* lain seperti *software* untuk konversi data.

3.3 Metodologi Pekerjaan

3.3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan dalam penelitian ini antara lain:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

a. Tahap Persiapan

Tahapan ini terdiri dari:

1. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Hal pertama yang dilakukan dalam sebuah penelitian yaitu mengidentifikasi dan merumuskan masalah pada penelitian tersebut. Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana hasil penurunan permukaan tanah pada kawasan Lumpur Sidoarjo dan bagaimana pengaruh penurunan permukaan dengan daerah sekitar kawasan lumpur.

2. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan berbagai macam referensi yang berkaitan tentang SAR, Interferometri dan PS-InSAR, cara memproses data citra sentinel hingga dapat dianalisa menjadi kesimpulan.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk mengumpulkan data citra Sentinel-1 pada tahun perekaman 2017 hingga tahun 2019.

b. Pengolahan Data

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data citra Sentinel untuk mendapatkan nilai perubahan permukaan tanah pada kawasan Lumpur Sidoarjo. Pasangan citra yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1. Dimana *master* adalah citra tunggal sebagai referensi dari citra lainnya. Pemasangan citra ini berdasarkan *bBaseline prepedicular* (Bperp) dalam satuan meter (m) dan *Baseline temporal* (Btemp) dalam satuan hari atau *day* (d).

c. Analisa Hasil Pengolahan Data

Setelah tahap pengolahan data selesai, maka dilakukan tahap analisa hasil pengolahan data citra satelit. Metode analisa yang digunakan adalah analisa deskriptif untuk menggambarkan nilai perubahan permukaan yang didapatkan dari pengolahan data-data yang ada. Kemudian hasil dan kesimpulan digunakan untuk pembuatan peta kondisi saat ini kawasan Lumpur Sidoarjo.

d. Penyusunan Laporan dan Pembuatan Peta

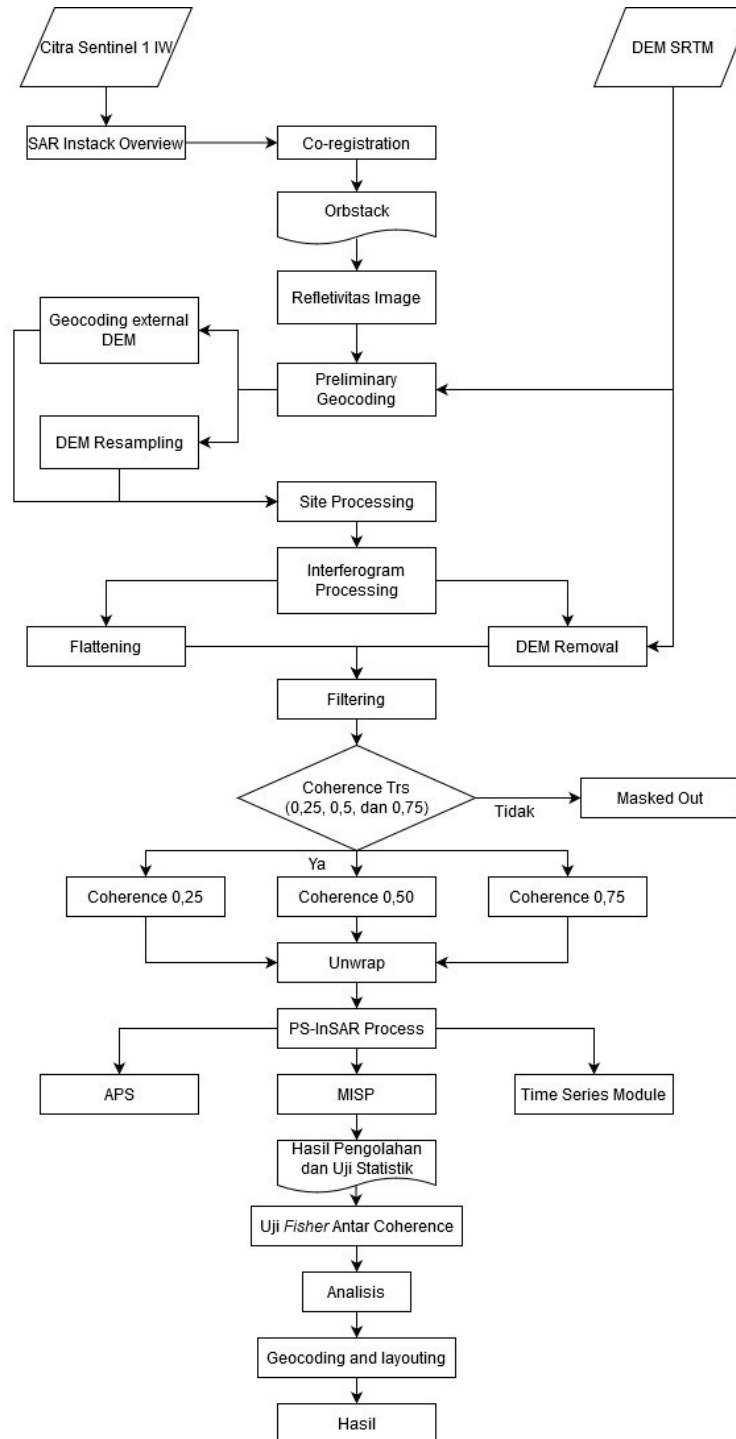
Tahap ini merupakan tahapan terakhir dari penelitian yaitu menyusun laporan dan membuat peta kondisi kawasan lumpur yang kemudian dilanjutkan ke proses *layouting* peta.

Tabel 3. 1 Pasangan citra master dan slave

<i>Master</i>	<i>Slave</i>	Bperp (m)	Btemp (d)
16-Jul-18	11-Mar-17	18	-492
16-Jul-18	4-Apr-17	24	-468
16-Jul-18	10-May-17	67	-432
16-Jul-18	3-Jun-17	44	-408
16-Jul-18	9-Jul-17	-29	-372
16-Jul-18	2-Aug-17	36	-348
16-Jul-18	7-Sep-17	-30	-312
16-Jul-18	13-Oct-17	68	-276
16-Jul-18	18-Nov-17	10	-240
16-Jul-18	12-Dec-17	-28	-216
16-Jul-18	17-Jan-18	10	-180
16-Jul-18	22-Feb-18	-5	-144
16-Jul-18	18-Mar-18	-14	-120
16-Jul-18	23-Apr-18	-10	-84
16-Jul-18	29-May-18	-21	-48
16-Jul-18	22-Jun-18	14	-24
16-Jul-18	9-Aug-18	-16	24
16-Jul-18	14-Sep-18	20	60
16-Jul-18	8-Oct-18	-21	84
16-Jul-18	1-Nov-18	55	108
16-Jul-18	19-Dec-18	-64	156
16-Jul-18	12-Jan-19	27	180
16-Jul-18	5-Feb-19	-59	204
16-Jul-18	13-Mar-19	8	240
16-Jul-18	18-Apr-19	102	276
16-Jul-18	5-Jun-19	-8	324
16-Jul-18	11-Jul-19	-3	360
16-Jul-18	4-Aug-19	9	384
16-Jul-18	9-Sep-19	28	420

3.3.2 Tahapan Pengolahan Data

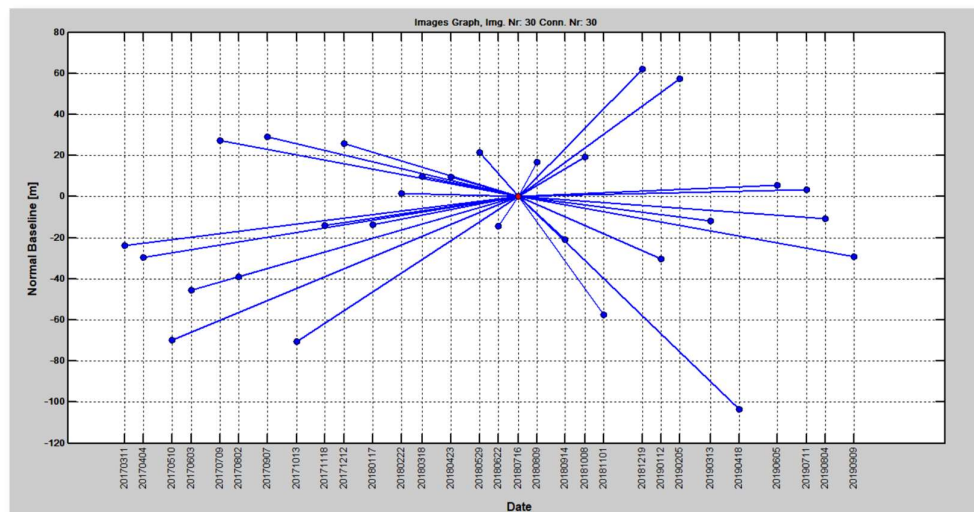
Tahap pengolahan data dapat digambarkan seperti berikut :



Gambar 3. 2 Diagram Alir Pengolahan Data

Keterangan:

1. Data Sentinel 1 IW (SLC) pada tahun perekaman 2017 hingga 2019, dengan spesifikasi *dual* polarisasi VV + VH, *beam mode* IW (*Interferometric Wide*) dan *flight direction descending*. Data DEM digunakan pada tahapan geocoding awal.
2. Data Sentinel 1 yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 30 *scene*, dimana satu *scene* menjadi *master* dan 29 *scene* menjadi *slave*. Parameter yang digunakan dalam memilih data SAR adalah *baseline prepedicular* tidak lebih dari 400 m (Pepe dkk, 2011) (Gambar 3.4). Seluruh data SAR ini akan digunakan antara *slave* dan *master* dengan proses *coregistration*. Pemilihan citra master (16 Juli 2018) didasarkan dengan metode *One Star Graph*, ini bertujuan untuk membuat satu citra referensi terhadap pasangan citra lainnya (Perissin, 2009).



Gambar 3. 3 Menunjukkan titik merah merupakan master citra dalam penelitian ini (16-Jul-2018), dimana tidak ada *baseline* yang melebihi 400 m.

3. Proses reflektifitas citra adalah proses dimana energi yang dipancarkan akan kembali lagi ke radar. Dalam penjelasan reflektifitas radar terbagi menjadi 2 yaitu:

- a. *Base Reflectivity* adalah pemindaian ketinggian terendah, reflektifitas ini digunakan untuk memperlihatkan curah hujan pada daerah penelitian.
 - b. *Composite reflectivity* adalah pengembalian dari semua pemindaian ketinggian yang dikompilasi, sebuah gambar dibuat akan menggambarkan nilai dBZ (*decibel* relatif terhadap Z) reflektifitas faktor radar (Z) tertinggi dari semua ketinggian pada lokasi penelitian.
4. Geocoding awal bertujuan untuk mengkonversi koordinat citra menjadi koordinat permukaan bumi dengan algoritma *range doppler correction*. Geocoding awal ini menggunakan data DEM sebagai parameter DEM dalam mengkonversi koordinat citra menjadi koordinat permukaan.
5. Pembentukan interferogram dari masing – masing citra akan menghasilkan beda fase dimana perbedaan ini fase ini bisa menunjukkan identifikasi awal adanya perubahan pada permukaan bumi yang menjadi subjek penelitian. Parameter dalam penelitian ini adalah menggunakan nilai ambang batas koherensi sebesar 0,25, 0,5, dan 0,75 (Lu dkk, 2018). Hasil pembentukan interferogram akan berlanjut dengan proses *amplitude time series* dan pembentukan *scatterer* pada PS-InSAR.
6. *Wrapped phase* pada tiap interferogram bernilai modulo -2π ($-\pi$, π), selanjutnya nilai ini harus melalui proses *unwrapping* untuk mendapatkan nilai *phase* yang sebenarnya. Pada proses *phase unwrapping*, dekorelasi atau error lain karena *atmospheric*, *look angle*, dan orbit satelit juga dihapuskan. Prosedur ini dijalankan menggunakan algoritma dalam *software* SARPROZ. Saat melakukan proses *unwrapping* pada interferogram, sistem memilih untuk tetap memproses fase yang dianggap *noise* (*phase noisy*), sehingga semua piksel akan dilakukan *unwrapping*,

bahkan yang tidak berkorelasi, karena memiliki potensi untuk menunjukkan kesalahan fase tambahan.

7. PS-InSAR proses terbagi atas 3 tahapan utama yaitu:
 - a. *Atmospheric Phase Screen*, Pembentukan awal dari titik PS dimana parameter yang digunakan adalah *Amplitude Stability Index* (ASI) yang dipilih berdasarkan *amplitude dispersion index* dengan nilai batas $<0,25$. nilai ini akan memberikan peluang titik yang terpilih memiliki nilai ASI yang tinggi. Hal ini juga memastikan bahwa titik PS yang memiliki *decorelation noise* rendah yang terpilih. Parameter nilai ASI yang digunakan adalah 0.8 (Fárová dkk, 2019)
 - b. *Multy Image Sparse Processing*, Secara sederhana tahapan ini akan membentuk *amplitude time series* dari titik PS yang telah terpilih. Proses ini juga akan membentuk perubahan permukaan tanah yang terjadi dalam rentang data SAR yang digunakan
 - c. *Time Series Module*, adalah proses pembentukan *Atmospheric Phase Screen (APS) Estimation*, dimana akan membentuk *sparse point* yang akan memiliki informasi perubahan permukaan tanah yang terjadi.
8. Penggambaran keseluruhan hasil pengolahan akan divisualisasikan dengan penggambaran dan *plotting* menggunakan MATLAB dan *Generic Mapping Tool* (GMT).
9. Melakukan analisis hasil pengolahan data untuk mendapatkan nilai perubahan permukaan yang terjadi pada tahun 2017 hingga 2019. Analisis akan meliputi untuk mengetahui letak titik-titik yang secara signifikan mengalami penurunan tanah dan faktor-faktor apa saja yang mempengaruhinya

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data

Dalam penelitian ini digunakan Citra Sentinel 1 IW (SLC) pada tahun perekaman 2017 hingga 2019 dengan polarisasi VV (pancaran dari sensor vertikal, backscatter dari objek vertikal) descending. Data Digital Elevation Model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 second dengan resolusi 30 meter

4.1.1 Data Sentinel-1

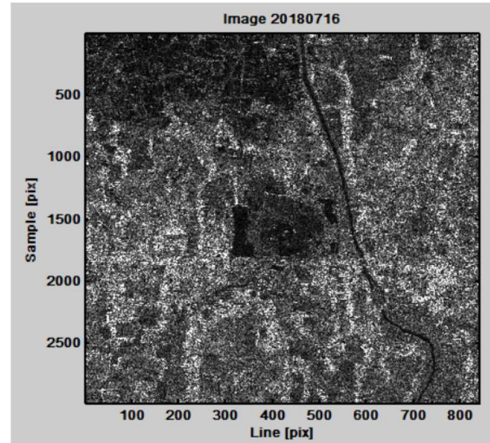
Data Sentinel-1 yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi tipe data *Single Look Complex (SLC)*, *beam mode Interferometric Wide (IW)*, polarisasi VV+VH (VV, pancaran dari sensor vertikal dan *backscatter* dari objek vertikal ; VH, pancaran dari sensor vertikal dan *backscatter* dari objek horizontal), dan *direction descending*. Pasangan data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1, Bperp (*Baseline perpendicular*) dan Btemp (*Baseline temporal*).

Tabel 4. 1 Pasangan Citra SAR

<i>Master</i>	<i>Slave</i>	Bperp (m)	Btemp (d)
16-Jul-18	11-Mar-17	18	-492
16-Jul-18	4-Apr-17	24	-468
16-Jul-18	10-May-17	67	-432
16-Jul-18	3-Jun-17	44	-408
16-Jul-18	9-Jul-17	-29	-372
16-Jul-18	2-Aug-17	36	-348
16-Jul-18	7-Sep-17	-30	-312
16-Jul-18	13-Oct-17	68	-276
16-Jul-18	18-Nov-17	10	-240
16-Jul-18	12-Dec-17	-28	-216
16-Jul-18	17-Jan-18	10	-180
16-Jul-18	22-Feb-18	-5	-144
16-Jul-18	18-Mar-18	-14	-120
16-Jul-18	23-Apr-18	-10	-84

<i>Master</i>	<i>Slave</i>	Bperp (m)	Btemp (d)
16-Jul-18	29-May-18	-21	-48
16-Jul-18	22-Jun-18	14	-24
16-Jul-18	9-Aug-18	-16	24
16-Jul-18	14-Sep-18	20	60
16-Jul-18	8-Oct-18	-21	84
16-Jul-18	1-Nov-18	55	108
16-Jul-18	19-Dec-18	-64	156
16-Jul-18	12-Jan-19	27	180
16-Jul-18	5-Feb-19	-59	204
16-Jul-18	13-Mar-19	8	240
16-Jul-18	18-Apr-19	102	276
16-Jul-18	5-Jun-19	-8	324
16-Jul-18	11-Jul-19	-3	360
16-Jul-18	4-Aug-19	9	384
16-Jul-18	9-Sep-19	28	420

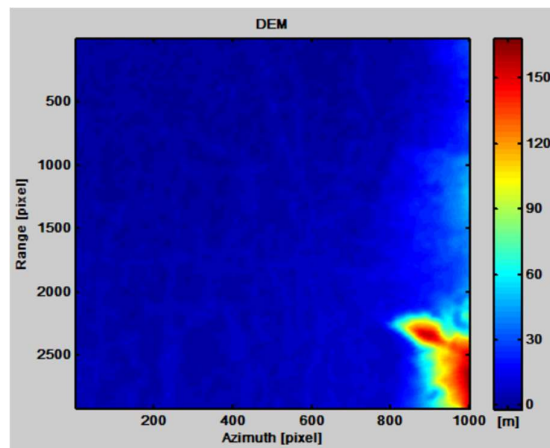
Master citra dipilih secara otomatis pada saat proses pemilihan *master* oleh perangkat pengolahan. *Master* ini dipilih yang terbaik dengan mempertimbangkan *baseline prepedicular* dan *baseline temporal*. *Master* dalam penelitian ini adalah 1 citra pada akuisisi 16 juli 2018. Pemilihan 1 *master* ini didasarkan dengan metode *One Star Graph*, ini bertujuan untuk membuat satu citra referensi terhadap pasangan citra lainnya (Perissin, 2009). Luasan daerah yang menjadi fokus dalam penelitian ini ± 5 km dari pusat semburan lumpur, *master image* dapat dilihat pada Gambar 4.1, dimana *master image* ini merupakan citra tunggal yang menjadi referensi untuk pasangan citra lainnya. Citra *master* ini memiliki orientasi asli dari citra radar dimana memiliki orientasi *Line* (x) dan *Sample* (y).



Gambar 4. 1 Master Image 20180716

4.1.2 Data *Digital Elevation Model (DEM)*

Data DEM yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1-arc second* dengan resolusi spasial 30 m. Data DEM diunduh secara otomatis pada saat pengolahan data, ukuran DEM yang digunakan secara otomatis akan mengikuti ukuran citra SAR Gambar 4.2, dimana *color bar* merupakan nilai ketinggian permukaan di area penelitian.



Gambar 4. 2 DEM SRTM 1-arc second

Data DEM digunakan untuk mengurangi *phase* topografi yang terdapat pada *phase* interferogram sehingga didapatkan *phase* deformasi. Perbedaan resolusi citra SAR dan DEM berbeda, maka data DEM disimulasikan dengan

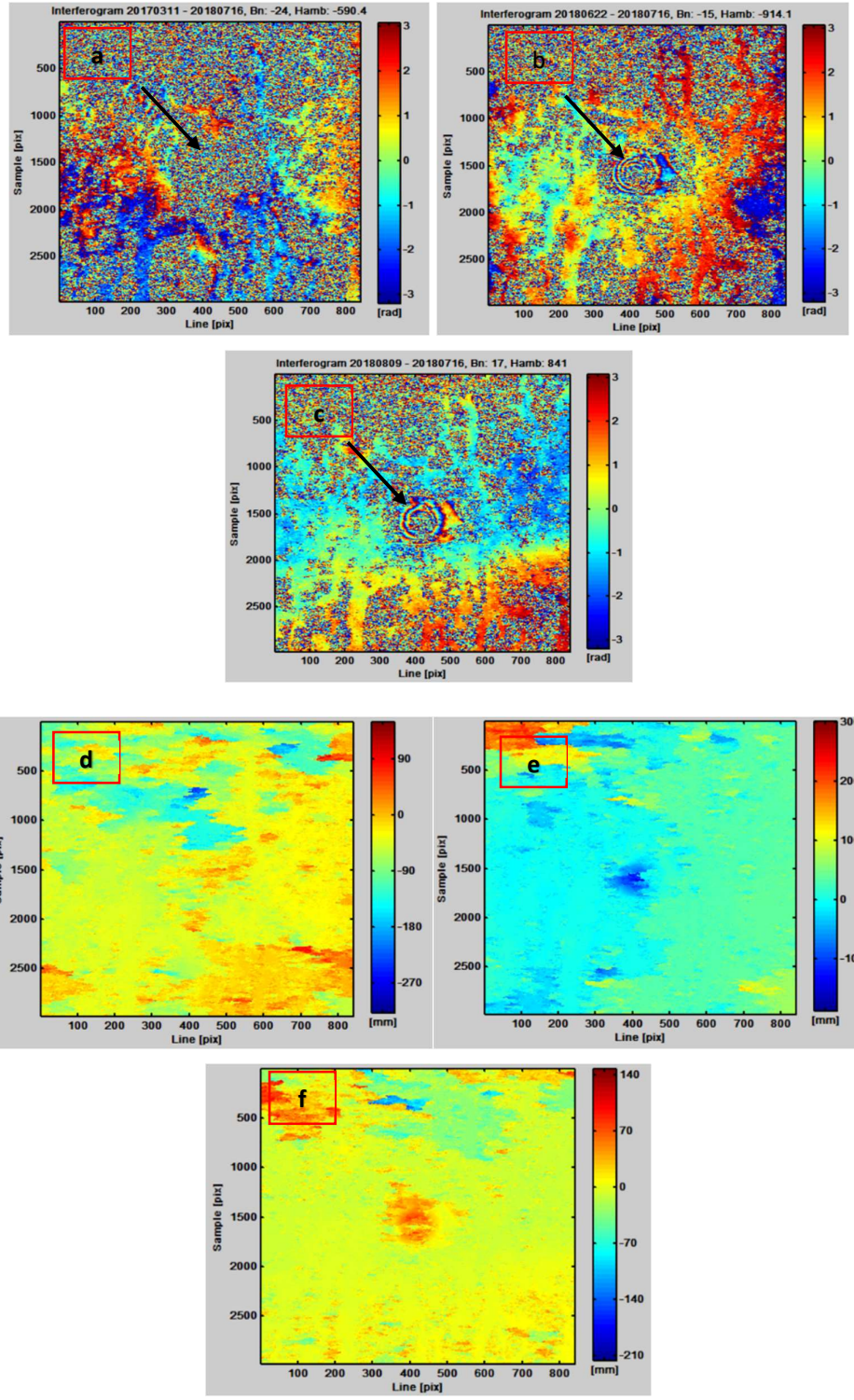
menggunakan data parameter dari citra *master* yang terbentuk saat proses pengolahan data SAR (Hanssen, 2003).

4.2 Co-Registration

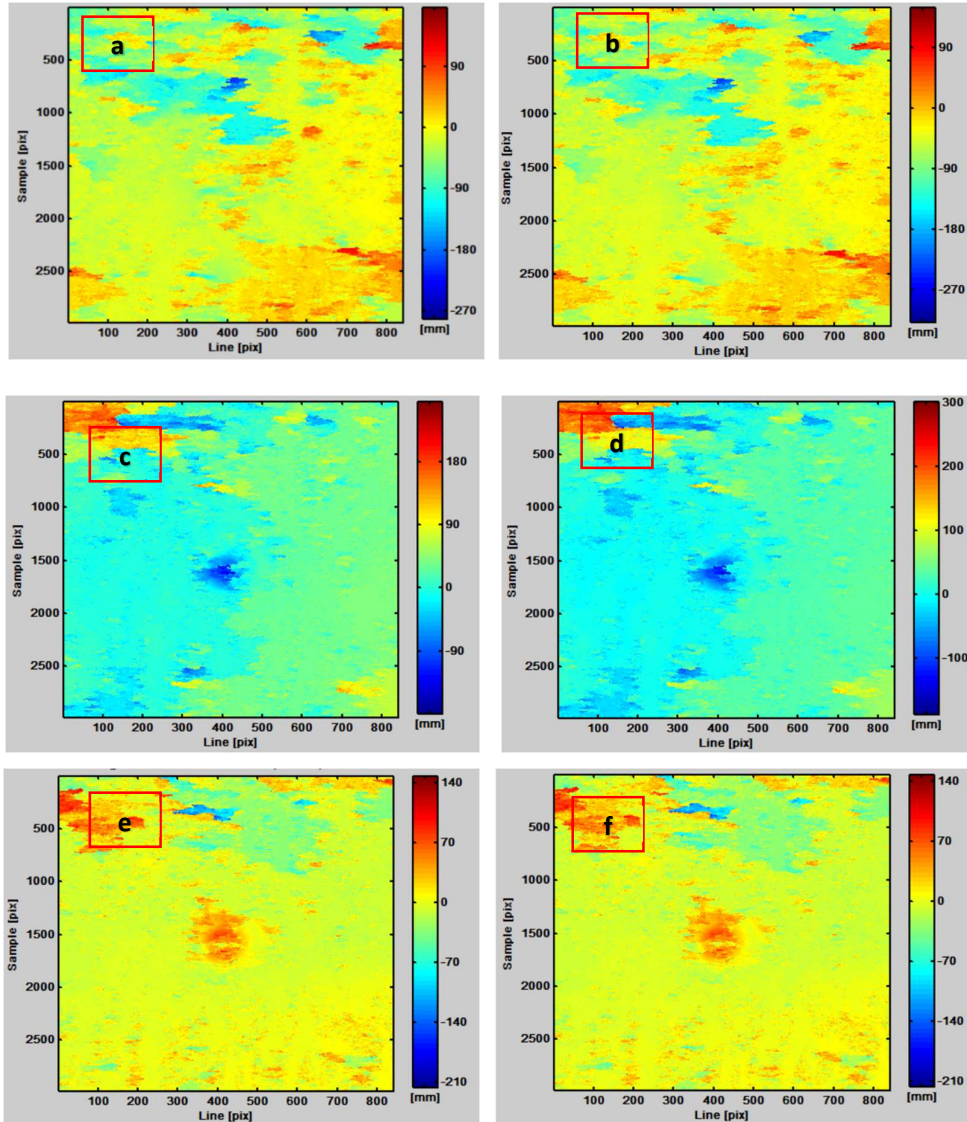
Pemasangan antara citra *master* dan *slave* adalah langkah awal dalam pengolahan dalam penelitian ini. Dalam proses ini data DEM dan set orbit secara otomatis di unduh oleh perangkat pengolahan. Pada tahap ini juga dilakukan pemilihan *subswath* lokasi penelitian, dimana pemilihan luasan area penelitian berada pada *subswath* 1 dengan ukuran *Area of Interest* (AOI) ± 5 km dari pusat semburan lumpur.

4.3 Interferogram, Filtering, dan Unwrap

Pada penelitian ini pembentukan interferogram dan proses *unwrap* dilakukan secara bersamaan, karena perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini menyediakan kemampuan untuk menentukan parameter sebelum proses dimulai. *Filtering* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Goldstein Modeling berfungsi untuk melakukan pemfilteran yang bertujuan mereduksi fase *noise* yang berkorelasi dalam dua gambar SAR, sehingga *noise* yang terdapat dalam setiap pasangan gambar SAR dihilangkan (Goldstein & Werner, 1998). Nilai *Coherence Threshold* (0,25, 0,50, dan 0,75) yang berbeda dalam melihat perubahan yang terjadi dikawasan LUSI dilakukan berulang pada setiap pasangan citra. Beberapa hasil pembentukan interferogram dan *unwrap* dengan *coherence threshold* 0,25 dapat dilihat pada Gambar 4.3. *Fringes* yang terbentuk pada gambar (b) 20180622 dan (c) 20180809 terjadi karena adanya gempa bumi pada 13 juni 2018 yang berpusat di Sumenep dan gempa bumi 8 Agustus 2018 berpusat di Malang. Pada hasil *interferogram* dengan *coherence threshold* 0,50 dan 0,75 sama dengan 0,25 seperti pada Gambar 4.4, karena *coherence threshold* akan mempengaruhi hasil *unwrap* (Lu dkk, 2018). Hasil *unwrap* pada *coherence threshold* 0,50 dan 0,75 dapat dilihat pada Gambar 4.4.

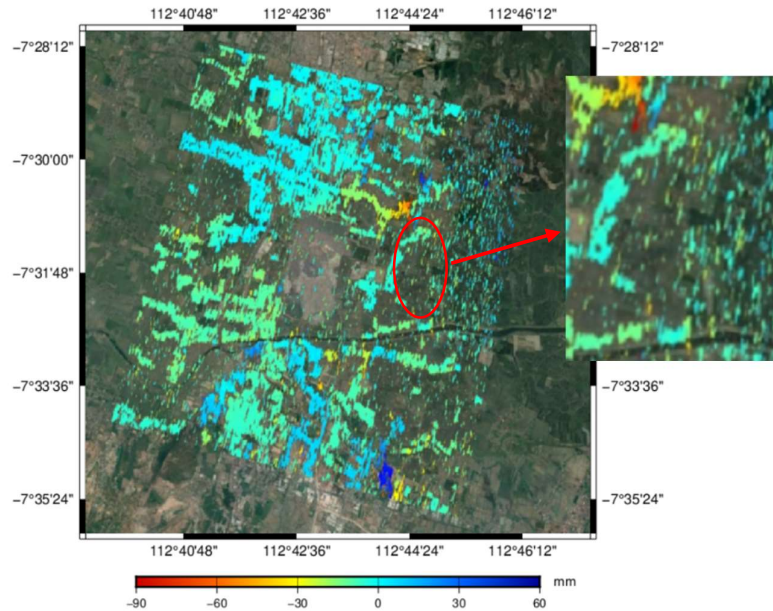


Gambar 4. 3 (a), (b), dan (c) adalah Interferogram antara Master dan Slave dan (d), (e), dan (f) adalah hasil Unwrap dari Interferogram



Gambar 4. 4 (a) (b) Unwrap 20170311, (b) (e) Unwrap 20180622, dan (c) (d) Unwrap 20180809. Dimana masing – masing (a) (b) (c) menggunakan parameter Coherence Threshold 0,50 dan (d) (e) (f) 0,75

Meskipun belum menunjukkan hasil yang berbeda secara signifikan, perbedaan *coherence threshold* mempengaruhi nilai perubahan fase yang terjadi di kawasan sekitar LUSI khususnya dipusat semburan.



Gambar 4. 5 Kosongnya piksel karena koherensi yang rendah

Pada Gambar 4. 5 merupakan salah satu contoh *low coherence* dimana piksel ini mengalami kekosongan informasi perbedaan nilai fase antara 2 pasang citra radar. Parameter yang telah ditentukan sebelumnya dengan salah satu contoh koherensi 0,25 terlihat bahwa adanya kekosongan, pertumbuhan vegetasi atau pergerakan daun dapat menyebabkan adanya perbedaan phase dari dua pengambilan data. Bagaimanapun perbedaan kondisi saat masa tanam, tumbuh dan panen juga menunjukkan adanya variasi phase disepanjang data time series serta dapat menurunkan nilai koherensi (Yulyta, 2018). Banyaknya nilai koherensi kurang dari 0,25 yang muncul pada penelitian ini dimungkinkan akibat dari efek troposfer. Menurut Hanssen (2003), kondisi troposfer antara dua citra dapat mempengaruhi perubahan refraksi/ pembiasan sinyal sehingga dapat menurunkan nilai koherensi.

4.4 PS-InSAR

4.4.1 Amplitude Phase Screen (APS) Estimation

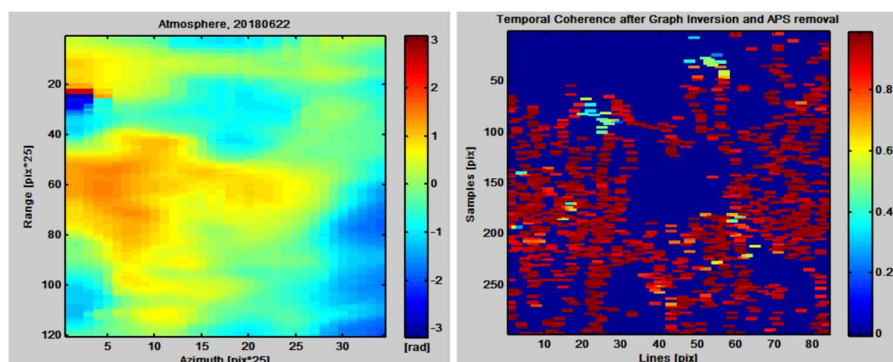
SAR dipengaruhi oleh kondisi atmosfer yang berbeda pada saat akuisisi. Uap air menunda sinyal radar, distribusi uap air yang bervariasi secara spasial juga menyebabkan perbedaan keterlambatan pantulan gelombang seluruh gambar SAR

(Ding et al., 2008). APS diperkirakan menggunakan *filter temporal spasial*, taksiran APS dihapus dari hasil estimasi dan fase yang tersisa kemudian digunakan untuk memperkirakan kesalahan ketinggian topografi dan kecepatan deformasi linier (Beladam dkk, 2019).

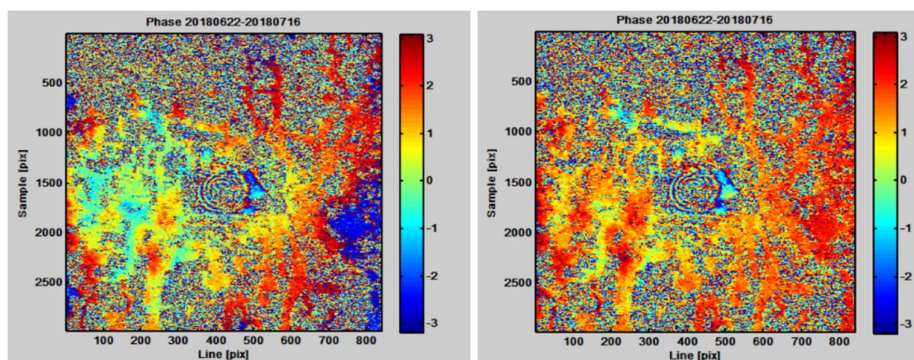
Lei dkk, (2013) menyebutkan, proses APS pada SARPROZ dibagi menjadi *trend orbital error* dan *turbulent atmosphere* dengan persamaan:

$$APS_{(i)}(x, y) = A_x + B_y + k_i q + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Dimana Di mana A dan B adalah koefisien untuk estimasi kesalahan orbit, k_i adalah koefisien keterlambatan troposfer, q adalah DEM, ε adalah *turbulent*. Keterlambatan troposfer disebabkan oleh atmosfer dan uap air, diasumsikan sebagai fungsi elevasi linier. *Phase residual* adalah atmosfer *turbulent* dengan rata-rata nol pada troposfer (Lei dkk, 2013) dapat dilihat pada Gambar 4. 6.

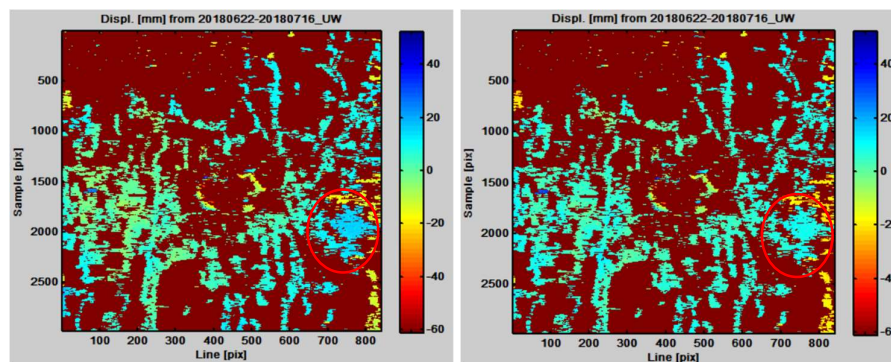


Gambar 4. 6 Pemodelan dan penghapusan fase atmosfer



Gambar 4. 7 Interferogram Sebelum (kiri) dan Sesudah (kanan) Proses APS

Estimasi atmosfer (Gambar 4. 6 dan Gambar 4. 7) pada proses APS akan memperbaiki piksel yang mengandung kesalahan yang disebabkan keterlambatan troposfer pada gambar SAR. Secara sederhana perbedaan fase setelah dilakukan APS pada hasil interferogram dapat dilihat pada Gambar 4. 7. Untuk melihat perbedaan *displacement* pada hasil *unwrap* sebelum dan sesudah proses APS dilihat pada Gambar 4. 8.



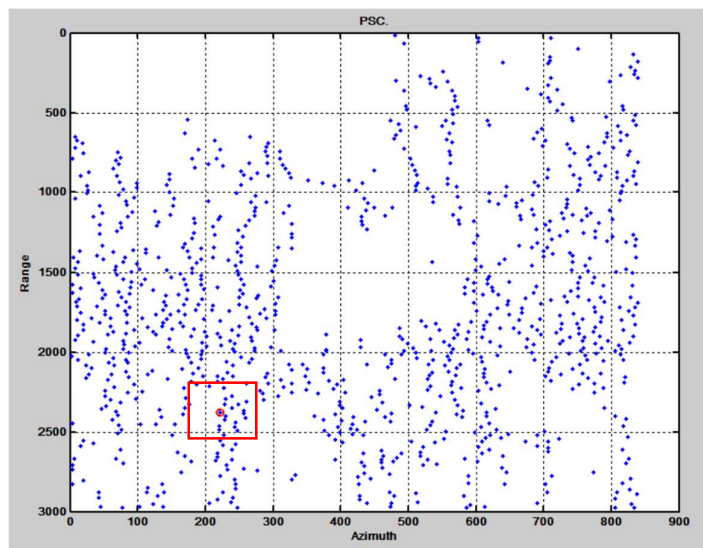
Gambar 4. 8 Unwrap Sebelum (kiri) dan Sesudah (kanan) APS Removal

Lingkaran merah pada Gambar 4. 8 menunjukkan perbedaan hasil *displacement* sebelum APS mengalami *uplift* dengan rentang 0 – 20 mm, namun setelah proses penghilangan efek atmosfer pada hasil *unwrap* rentang terjadinya *uplift* pada lokasi yang sama hanya 0 – 10 mm. Ini menunjukkan proses APS sangat mempengaruhi nilai dari perubahan permukaan tanah yang terjadi nantinya.

Ding dkk (2008) menyebutkan perbedaan nilai atau besaran *displacement* yang dipengaruhi oleh atmosfer berbeda pada setiap lokasi penelitian. Untuk mereduksi kesalahan yang disebabkan oleh atmosfer perlu mengkombinasikan SAR dengan data *external* untuk mengkoreksi kesalahan yang ditimbulkan. Beberapa data yang dapat digunakan untuk mengkoreksi kesalahan atmosfer adalah data pengukuran meteorologi, data *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), dan *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS).

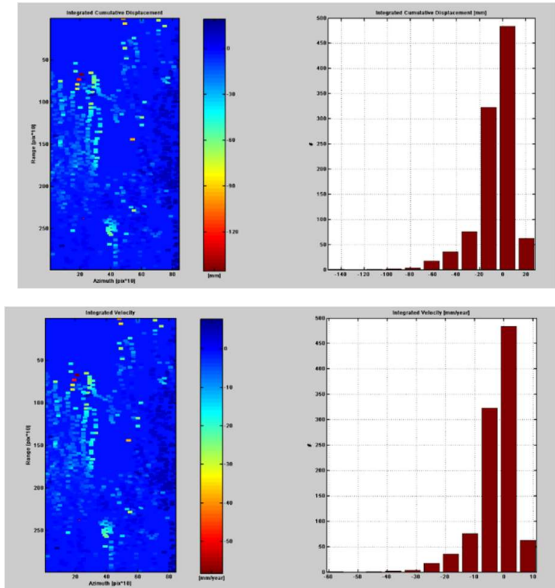
Dalam tahapan penelitian ini, APS estimation juga berfungsi dalam penentuan *reference point*. Dimana titik acuan ini adalah titik yang stabil dan

hampir tidak dipengaruhi perubahan atau deformasi yang terjadi disekitar kawasan penelitian. Untuk mendapatkan *reference point* dilakukan pembentukan titik PS dengan parameter *Dispersion* < 0,25 atau nilai *ASI* > 0,75 (Ferretti dkk, 2001) namun dalam penelitian ini penulis menggunakan *ASI* 0,8 (Fárová dkk, 2019) dengan jumlah poin yang terbentuk 3080. Pembentukan titik awal ini disebut juga *Permanent Scatterer Candidates* (PSC) Titik yang menjadi *reference* dapat dilihat pada Gambar 4.9



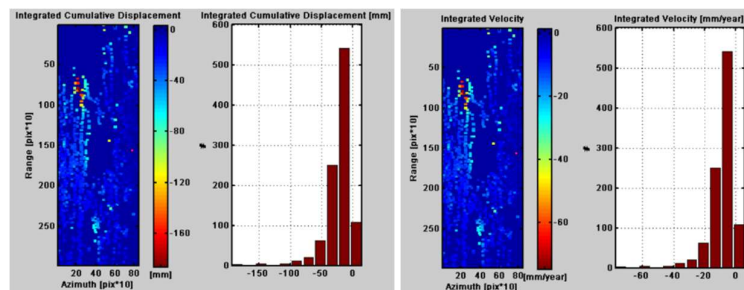
Gambar 4. 9 Reference Point Terletak pada piksel Range 2375 dan Azimuth 222

Gambar 4. 9 menunjukkan titik yang dipilih pada untuk menjadi titik referensi untuk titik – titik lainnya. Titik referensi ini terletak di *Range* 2375 dan *Azimuth* 222, titik reference ini sama dengan seluruh *coherence threshold* pada setiap pengolahan, pemilihan titik referensi ini dilakukan secara manual dengan cara melihat pada daerah dengan mayoritas daerah yang memiliki *displacement* 0 (nol) berdasarkan skala bar yang terbentuk. Hal ini menunjukkan bahwa titik referensi berada pada kawasan yang cukup stabil. Titik yang dianggap stabil karena perpindahan kumulatif = kecepatan × waktu. Perhatikan puncak histogram *integrated velocity* dan histogram *integrated cumulative displacement* Gambar 4.10 memiliki nilai nol, ini artinya mayoritas poin memiliki kecepatan relatif nol ketika membandingkan dengan titik referensi (Qin, 2018).



Gambar 4. 10 *Integrated Cumulative displacement* dan *Integrated Velocity*

Beberapa titik yang dijadikan titik referensi cenderung tidak stabil pada kawasan kawasan tertentu. Salah satu contoh titik yang dipilih secara otomatis dapat dilihat pada Gambar 4. 11.

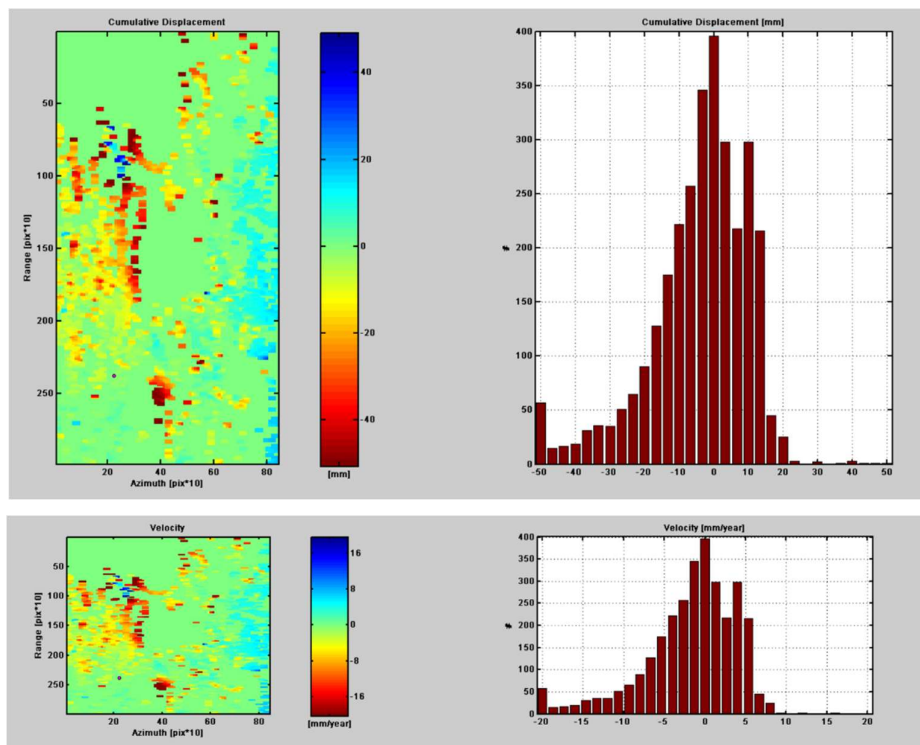


Gambar 4. 11 *Integrated Cumulative displacement* dan *Integrated Velocity* otomatis

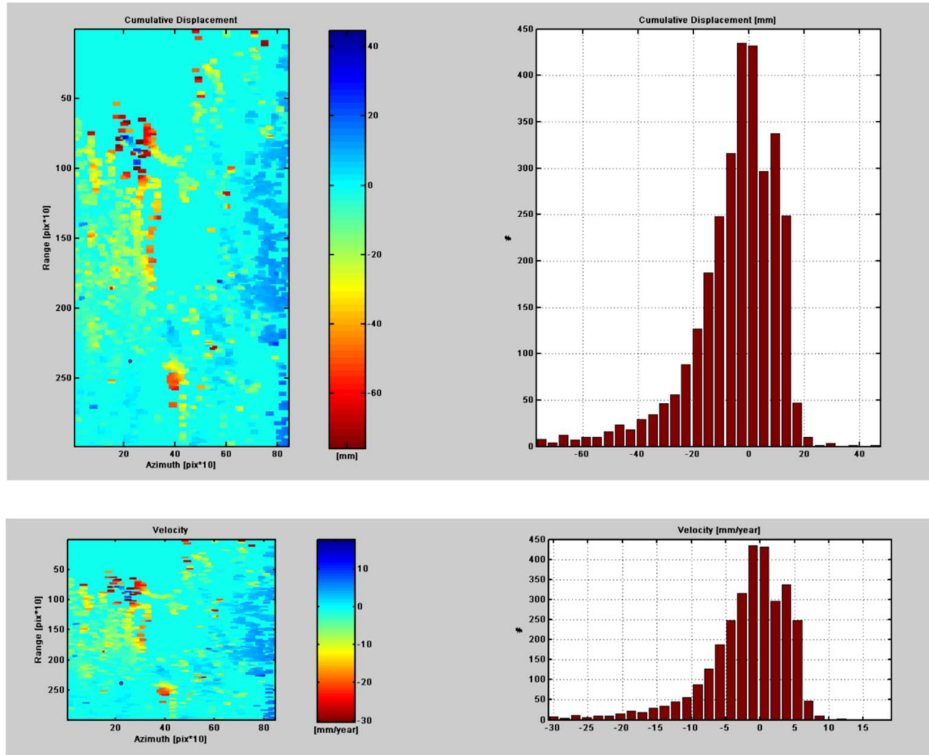
Gambar 4. 11 menunjukkan titik *reference* yang dipilih secara otomatis pada *Range* 1563 dan *Azimuth* 772. Dari histogram dapat dilihat bahwa titik referensi tidak berada pada kawasan yang stabil, karena puncak histogram tidak berada pada nilai 0. Titik referensi ini berada kawasan dengan rentang *subsidence* antara 0 hingga -20. Titik referensi yang tidak stabil akan menyebabkan adanya kesalahan pada hasil *displacement* sehingga titik referensi ini tidak bisa digunakan untuk ketahap selanjutnya dalam penelitian ini.

4.4.2 Multi Image Sparse Point Processing (MISP)

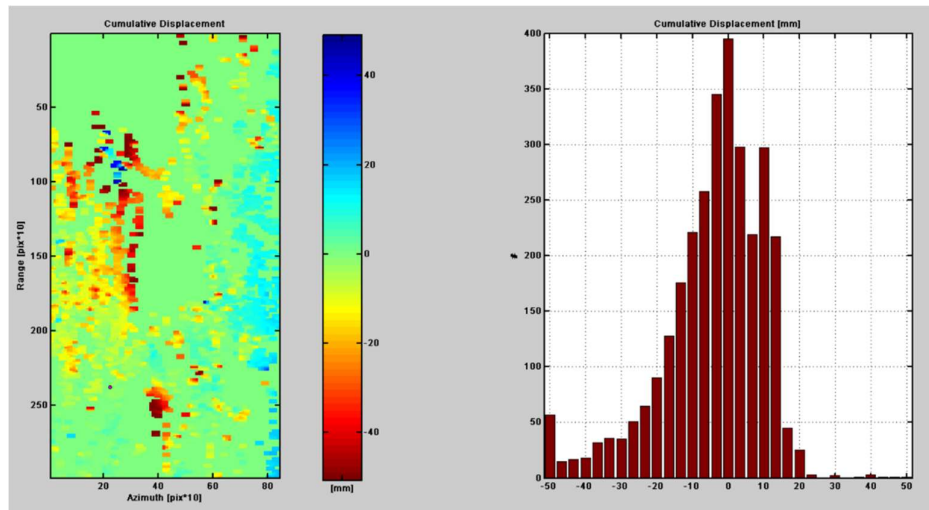
Proses ini tidak jauh berbeda dengan proses APS. Parameter yang telah didapatkan dalam proses APS baik itu referensi titik, *integrated cumulative displacement*, dan *integrated velocity*. Dalam tahapan ini parameter APS akan diproses menjadi *cumulative displacement*, *velocity*, *height*, dan *residual height* pada kawasan LUSI. Perkiraan *cumulative displacement* dan *velocity* untuk titik yang dipilih Gambar 4. 12, Gambar 4. 13, dan Gambar 4. 14 pada setiap *coherence threshold*. Perhatikan puncak histogram adalah nol, yang berarti bahwa sebagian besar titik memiliki kecepatan relatif nol dengan referensi titik, menunjukkan bahwa titik referensi yang terpilih kemungkinan besar stabil (Qin, 2018). Proses ini melibatkan seluruh pasangan citra Sentinel yang digunakan dalam penelitian.

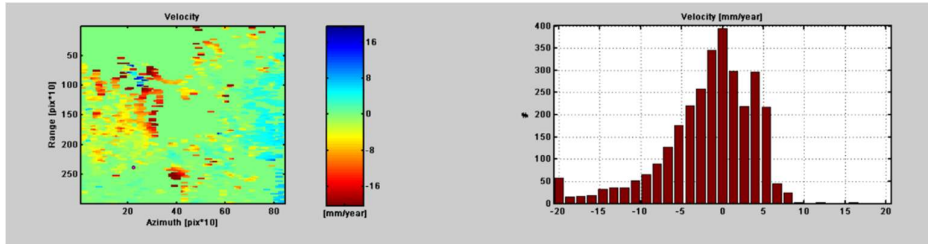


Gambar 4. 12 Cumulative Dispalcement dan Velocity Coherence Threshold 0,25



Gambar 4. 13 *Cumulative Displacment dan Velocity Coherence Threshold 0,50*

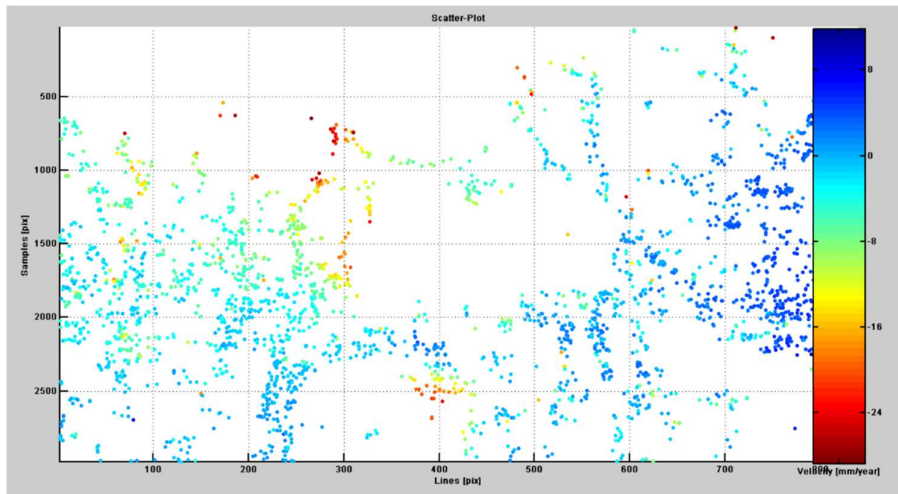




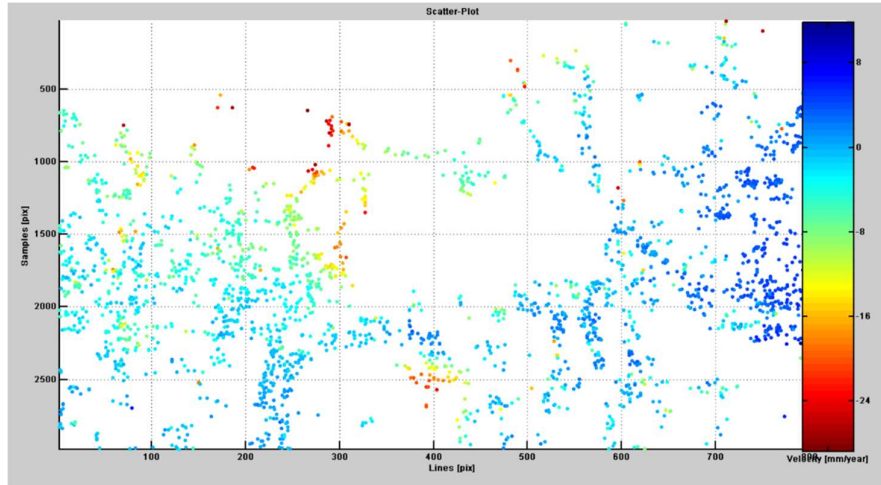
Gambar 4. 14 Cumulative Dispalcement dan *Velocity Coherence Threshold* 0,75

4.4.3 Scatter Plots

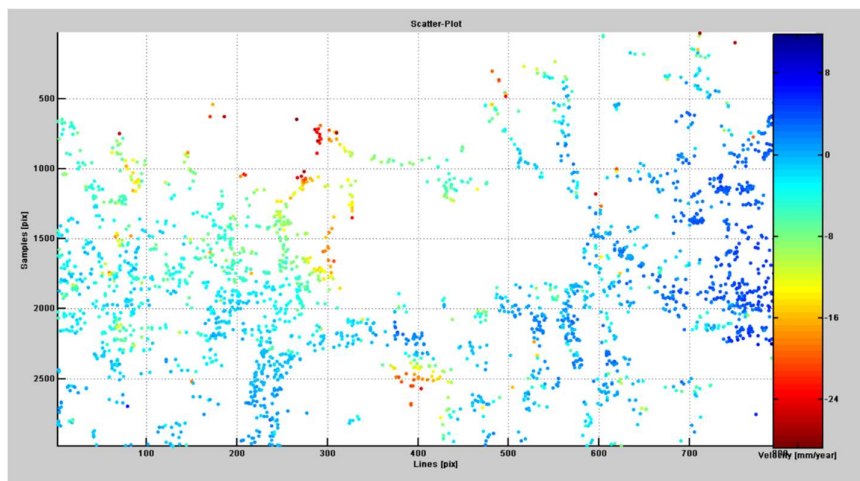
Hasil titik PS yang terbentuk pada saat sparse point akan di mask dengan parameter ASI 0,8 sehingga titik menghasilkan titik yang memiliki informasi deformasi yang terjadi di permukaan tanah. Karena pada setiap *coherence threshold* (0,25, 0,50, 0,75) diterapkan parameter pembentukan PS yang sama sehingga jumlah titik pada setiap *coherence threshold* sama. Namun *masking* akan mereduksi titik – titik dengan *temporal coherence* yang rendah sehingga jumlah pembentukan titik PS dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4. 15, 4. 16, dan 4. 17.



Gambar 4. 15 *Scatter Plot Coherence Threshold* 0,25 *velocity* (mm/tahun)



Gambar 4. 16 Scatter Plot Coherence Threshold 0,50 velocity (mm/tahun)



Gambar 4. 17 Scatter Plot Coherence Threshold 0,75 velocity (mm/tahun)

Tabel 4. 2 Jumlah Pembentukan Titik PS

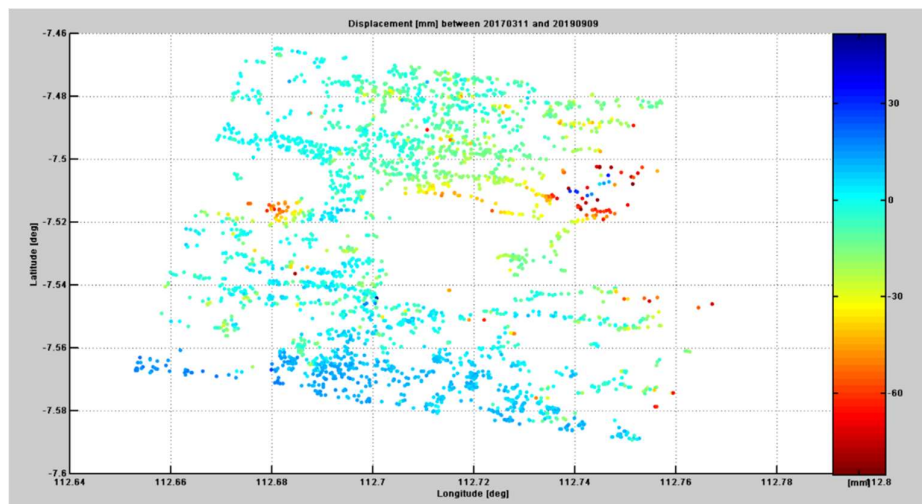
Coherence Threshold	Total PS
0,25	3052
0,50	3023
0,75	2969

Dari Gambar 4. 15, Gambar 4. 16, dan Gambar 4. 17 terlihat bahwasannya terjadi perubahan permukaan tanah pada setiap ambang batas koherensi disekitaran kawasan semburan LUSI, hal ini ditandai dengan adanya informasi kecepatan tanah pada *color bar* pada gambar. Sebaran titik PS ini menandakan masih adanya aktifitas semburan lumpur yang mempengaruhi perubahan

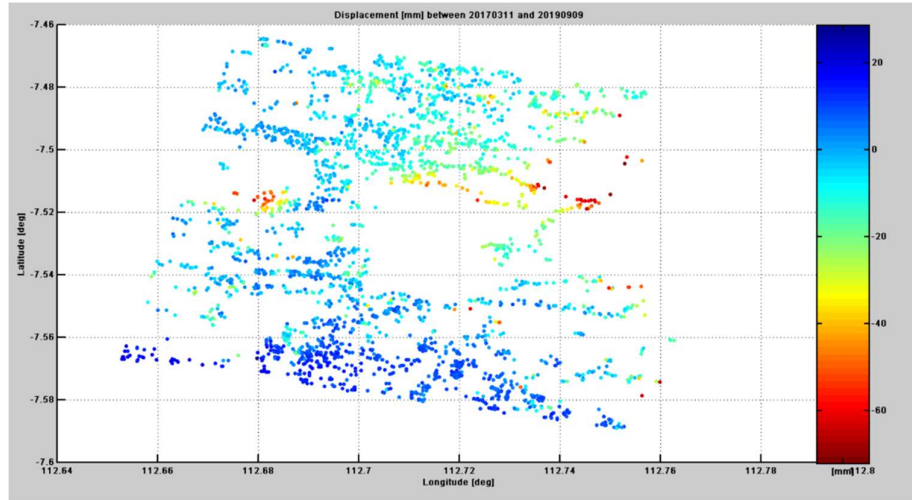
permukaan tanah daerah disekitarnya. Proses *masking* pada *coherence threshold* mereduksi titik PS yang memiliki koherensi yang lebih rendah, akan tetapi selisih jumlah titik ini tidak berbeda secara signifikan. Berdasarkan parameter Ferretti dkk, (2001), jumlah titik PS akan berbeda jumlah secara signifikan dengan mengurangi ambang batas *Dispersion Index* dengan parameter lebih dari 0,25.

4.4.4 Time Series Module

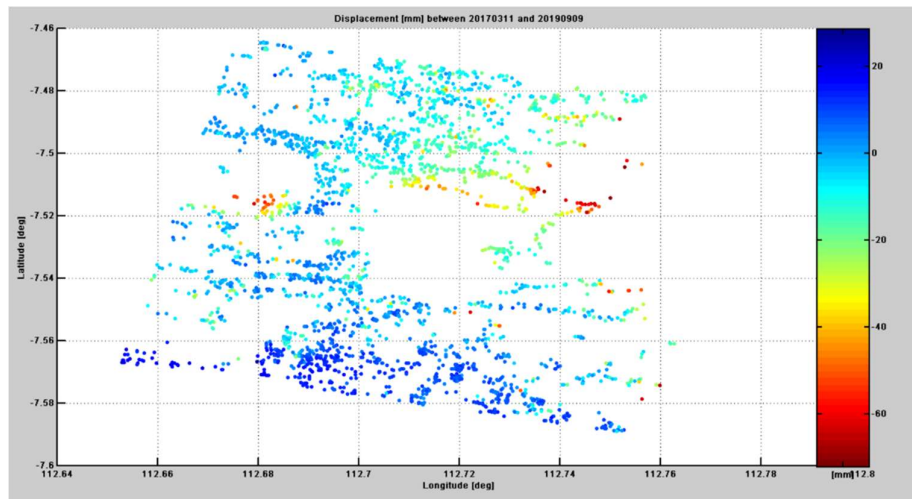
Untuk melihat *trend* perubahan dari tahun 2017 – 2019 dilakukan analisis *time series* untuk melihat perubahan permukaan yang terjadi. Dalam proses ini dilakukan *geocoding* untuk mengkonversi koordinat radar menjadi koordinat permukaan (Ng dkk, 2012). Hasil titik PS yang telah di *geocoding* dan *time series displacement* 2017 – 2019 dapat dilihat pada Gambar 4. 18, Gambar 4. 19, dan Gambar 4. 20 pada setiap *coherence Threshold* yang berbeda.



Gambar 4. 18 *Time Series Displacement LUSI 2017 – 2019 dalam LoS (mm), Coherence Threshold 0,25*

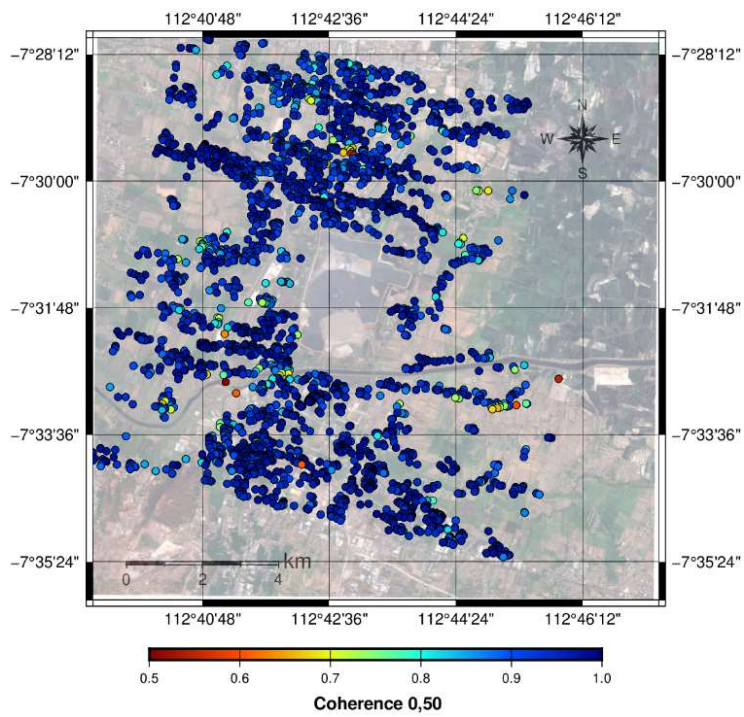
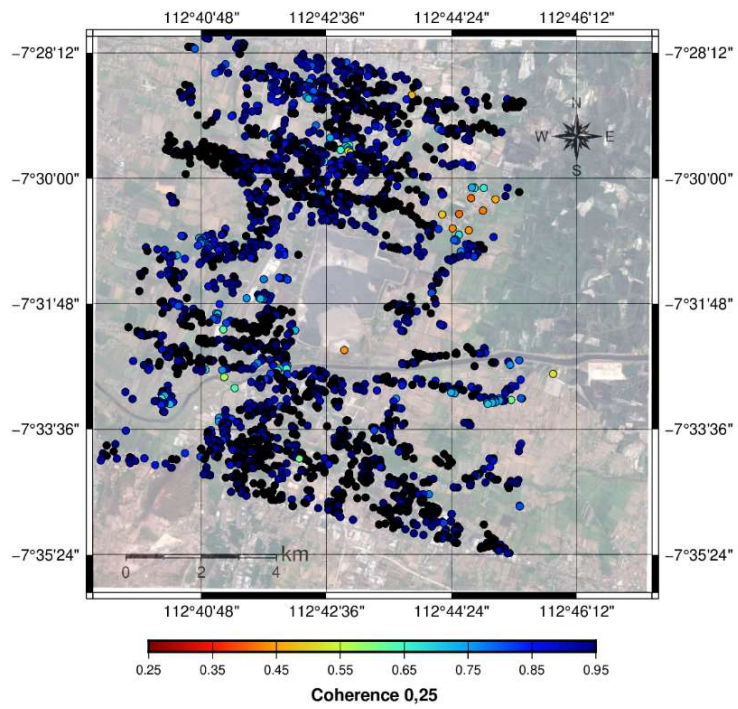


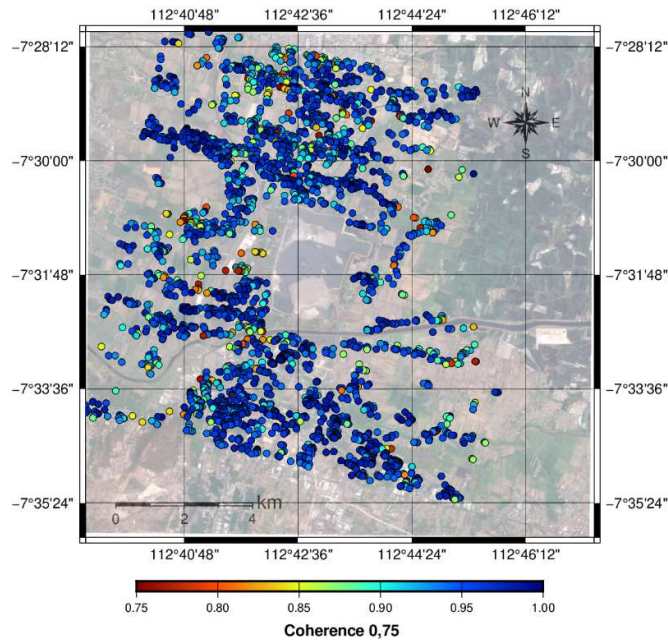
Gambar 4. 19 *Time Series Dispalcement* LUSI 2017 – 2019 dalam *LoS* (mm), *Coherence Threshold* 0,50



Gambar 4. 20 *Time Series Dispalcement* LUSI 2017 – 2019 dalam *LoS* (mm), *Coherence Threshold* 0,75

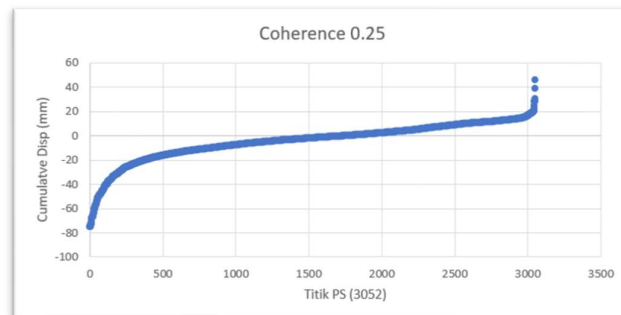
Gambar ini memvisualisasikan bahwasannya di beberapa lokasi sekitar semburan LUSI mengalami perubahan permukaan sehingga terdapat informasi *cumulative displacement* yang terjadi pada radius 5 km dari pusat semburan. Untuk melihat nilai sebaran titik pada setiap nilai ambang koherensi yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 4. 21

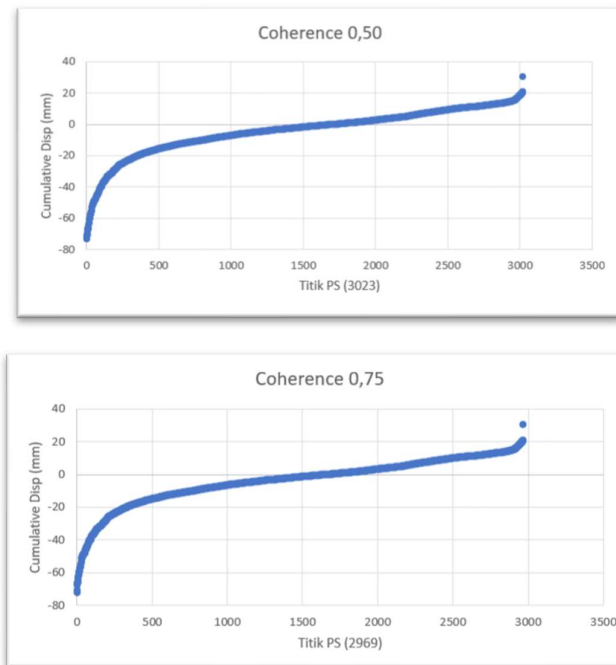




Gambar 4. 21 Sebaran Titik PS pada Setiap Ambang Batas Koherensi

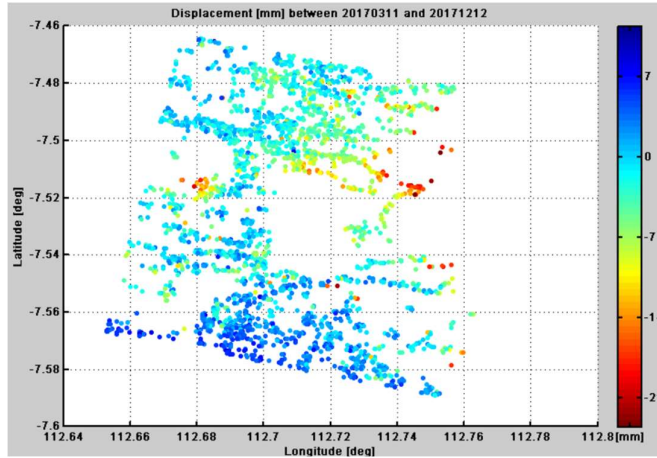
Hasil ini menunjukkan bahwasannya dengan *coherence Threshold* yang berbeda maka nilai *cumulative displacement* dan *velocity* yang diperoleh berbeda dalam satu titik yang sama (Lu dkk, 2018). Untuk melihat perubahan permukaan tanah dari 2017 – 2019 pada setiap koherensi, penelitian ini menampilkan pada diagram *time series cumulative displacement* setiap koherensi Gambar 4. 23. Perbedaan hasil pada setiap *coherence* akan diuji dengan metode statistik distribusi *Fisher* pada sebaran titik PS yang berada di bagian barat dan timur dari LUSI.



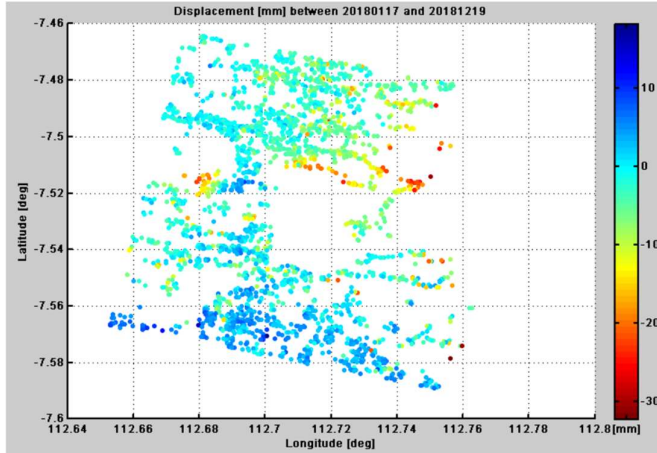


Gambar 4. 22 Diagram *Time Series Cumulative Displacement*

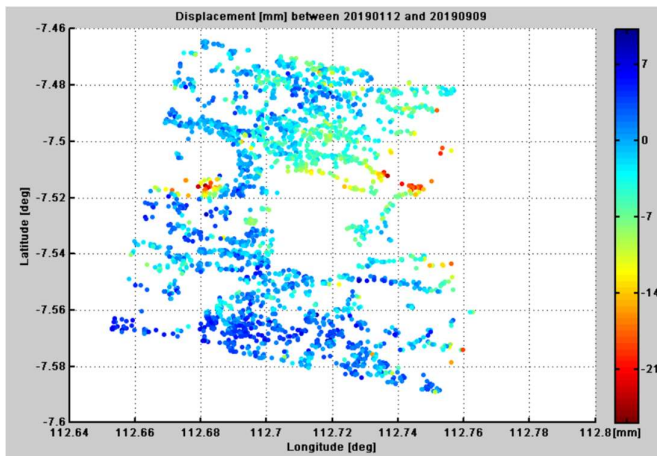
Gambar 4. 22 menunjukkan sebaran titik PS yang terbentuk dari nilai ambang batas koherensi yang berbeda. Secara terpisah *trend displacement* tiap tahun dilakukan untuk melihat perbedaan perubahan permukaan tanah tiap tahunnya, namun perlu diklarifikasi bahwasannya pada tahun 2017 hanya terdapat *tren displacement* dari Maret hingga Desember 2017 (10 bulan), 2018 (12 bulan), dan 2019 (9 bulan) dari Januari hingga September. Dimana pada tahun 2017 terjadi perubahan permukaan tanah pada rentang 7 mm (*uplift*) dan -21 mm (*subsidence*) dengan kecepatan perubahan permukaan tanah rata – rata 3 mm/10 bulan, 2018 terjadi perubahan permukaan tanah pada rentang 10 mm (*uplift*) dan -30 mm (*subsidence*) dengan kecepatan perubahan permukaan tanah rata – rata 5 mm/tahun, dan pada tahun 2019 terjadi perubahan permukaan tanah pada rentang 7 mm (*uplift*) dan -21 mm (*subsidence*) dengan kecepatan perubahan permukaan tanah rata – rata 3 mm/9 bulan, dapat dilihat pada Gambar (4. 23 – 4. 25).



Gambar 4. 23 Time Series Displacement 2017 (Maret – Desember)



Gambar 4. 24 Time Series Displacement 2018 (Januari – Desember)



Gambar 4. 25 Time Series Displacement 2019 (Januari – September)

4.5 Uji Statistik F (distribusi Fisher)

Uji F (Distribusi Fisher) dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui perbedaan yang signifikan atau tidak dari hasil pengolahan ambang batas koherensi yang berbeda, dalam hal ini adalah *cumulative subsidence* dan *velocity* rata – rata pada daerah barat (Aoki & Sidiq, 2014) (Shirzaei dkk, 2015) dan timur (Fukushima dkk, 2009) dari pusat semburan Gambar 4. 26. Perhitungan ini dilakukan dengan membandingkan standar deviasi rata – rata pada setiap koherensi yang berbeda.

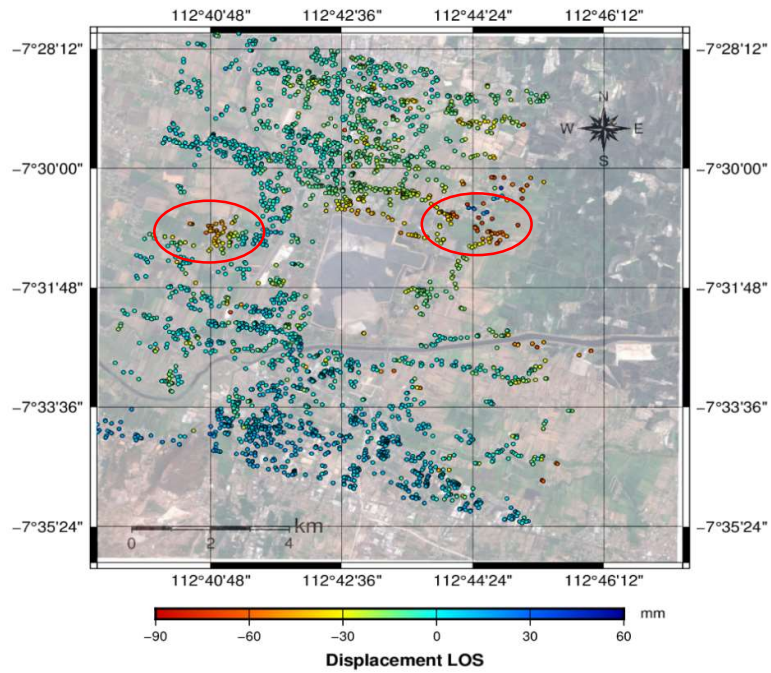
Tabel 4. 3 Set Uji Statistik Fisher Barat LUSI

Coherence Threshold	Velocity (mm/tahun)	Cumulative Subsidence (mm)	STDEV
barat 0,25	-18,861	-47,094	2,475
barat 0,50	-19,155	-47,827	2,379
barat 0,75	-19,597	-48,929	2,391

Tabel 4. 4 Set uji Statistik Fisher Timur LUSI

Coherence Threshold	Velocity (mm/tahun)	Cumulative Subsidence (mm)	STDEV
timur 0,25	-24,757	-61,815	2,373
timur 0,50	-24,185	-60,386	1,925
timur 0,75	-24,183	-60,384	1,924

Titik ini dihitung dengan persamaan statistik (2.7) distribusi tabel distribusi Fisher seperti yang telah di bahas pada Bab sebelumnya. Dengan standar deviasi yang telah diketahui pada setiap *coherence threshold* pada Tabel 4.3 untuk titik yang akan dianalisis di Timur pusat semburan dan Tabel 4.4 untuk titik di Barat pusat semburan LUSI.



Gambar 4. 26 Sebaran Titik Uji Fisher Barat (kiri) dan Timur (kanan)

4.6 Analisa Hasil Uji Statistik dan Penurunan Permukaan Tanah

4.6.1 Analisa Perbandingan Antar Coherence Threshold

Nilai *cumulative subsidence* dan *velocity* pada masing - masing *coherence threshold* memiliki hasil yang berbeda. Untuk melihat nilai perubahan permukaan tanah yang terjadi mengalami perbedaan atau tidak dilakukan perhitungan uji dengan hasil pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6

Tabel 4. 5 Hasil Uji Statistik Bagian Barat

Perbandingan Coherence	F Hitung	F Tabel	Hipotesa
0,25 & 0,50	1,082	2,978	DITERIMA
0,25 & 0,50	1,071	2,978	DITERIMA
0,50 & 0,75	0,990	2,978	DITERIMA

Tabel 4. 6 Hasil Uji Statistik Bagian Timur

Perbandingan Coherence	F Hitung	F Tabel	Hipotesa
0,25 & 0,50	1,519	2,526	DITERIMA
0,25 & 0,75	1,520	2,526	DITERIMA
0,50 & 0,75	1,001	2,526	DITERIMA

$F_{Hitung} \leq F_{Tabel}$ ini menunjukkan penerimaan hipotesa H_0 sehingga setiap nilai *cumulative displacement* dan *velocity* sama atau tidak berbeda secara signifikan pada setiap *coherence threshold* yang berbeda. Titik – titik PS yang memiliki informasi perubahan permukaan tanah menunjukkan terjadi *subsidence* dikawasan Barat dan Timur pusat semburan LUSI. Perbedaan jumlah titik PS pada masing – masing ambang batas koherensi yang berbeda (Tabel 4.2) tidak mempengaruhi hasil *cumulative displacement*, sehingga dapat disimpulkan nilai *subsidence* dan kecepatan penurunan pertahunnya yang telah ditunjukkan oleh Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 sama.

Dari hasil uji statistik antar ambang batas koherensi yang berbeda membuktikan bahwa perbedaan penurunan permukaan tanah pada masing – masing koherensi tidak berbeda. Namun nilai optimum ambang batas koherensi yang baik digunakan adalah nilai koherensi $> 0,5$, hal ini didasari nilai standar deviasi pada koherensi lebih kecil jika dibandingkan dengan koherensi dibawahnya. Perhitungan F_{score} yang dapat dilihat pada Table 4. 5 dan Tabel 4. 6 didapatkan bahwa perbandingan koherensi diatas 0,5 memiliki nilai yang rerelatif lebih kecil. Meskipun menunjukkan perbedaan penurunan permukaan tanah pada kawasan timur dan Barat pusat semburan LUSI, ambang batas koherensi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai penurunan yang sama dalam pengujian. Namun, perbedaan koherensi ini dapat dijadikan penelitian untuk mengukur kerusakan didaerah perkotaan yang disebabkan oleh bencana alam (Washaya & Balz, 2018). Daerah yang memiliki tingkat vegetasi tinggi yang secara konstan tidak stabil, dengan penyajian koherensi *multi temporal interferometric*, bisa didapatkan informasi perubahan permukaan tanah, namun keterbatasan sensitivitas SAR pada sensor yang berbeda sehingga setiap hasil metode yang sama pada data berbeda akan mendapatkan hasil yang berbeda (Natsuaki dkk, 2018).

4.6.2 Analisa Dengan Penelitian Sebelumnya

Perubahan permukaan tanah bersifat dinamis, hal ini dipengaruhi faktor *internal* seperti proses geodinamika yang terjadi didalam perut bumi dan faktor

external seperti pembangunan, penambangan dan lain sebagainya. Berdasarkan penelitian sebelumnya hingga penelitian ini, nilai *displacement* dan kecepatan perubahan permukaan itu sendiri cenderung berubah dan perlahan mulai menurun baik dari segi *cumulative displacement* dan *velocity*. Beberapa poin yang membedakan hasil penelitian terdahulu dengan penelitian ini:

1. Fukushima dkk, (2009), awal kemunculan LUSI Mei 2006 subsidence terekam 70 – 80 cm pada interferogram data ALOS pada pasangan Oktober hingga November 2006, hal ini terjadi karena awal kemunculan LUSI partikel lumpur berupa air (cairan dan uap), gas, dan partikel padat muncul kepermukaan dengan tekanan yang kuat dan jumlah yang besar, sehingga mempengaruhi perubahan permukaan tanah disekitar kawasan semburan. Set data ALOS dari 2006 – 2007 menunjukkan rata – rata penurunan terjadi disebelah timur LUSI sebesar 120 mm/tahun.
2. Aoki & Sidiq, (2014), Set data SAR dengan rentang 1,5 – 2,5 tahun semenjak 2008 mendapatkan *displacement* sebesar ~200 mm dibagian Barat semburan LUSI dengan penurunan sebesar 100 mm/tahun.
3. Shirzaei dkk, (2015), ALOS PALSAR dimanfaatkan dalam memantau perubahan permukaan tanah dikawasan sekitar LUSI. Penelitian ini mendapatkan rata -rata penurunan permukaan tanah sebesar 100 mm/tahun dibagian Barat dalam periode data 2006 – 2011.
4. Set data yang digunakan dalam penelitian ini memiliki periode waktu yang berbeda dengan penelitian sebelumnya. Data yang digunakan adalah 2017 – 2019 dengan membandingkan hasil coherence Threshold yang berbeda pada setiap pengolahan. Semburan LUSI yang sudah lebih dari 10 tahun cenderung memiliki penurunan permukaan disekitar kawasan semburan lumpur yang lebih kecil dari awal kemunculannya. *Trend* penurunan permukaan tanah yang semakin tahun menurun mengindikasikan semburan LUSI akan berhenti suatu saat.

Penelitian dan survei lapangan termasuk studi tentang LUSI melalui foto udara, gravitasi dan gayaberat mikro, resistivitas, *very low frequency* (VLF) elektromagnetik, mikro-seismik, GPS (Global Positioning System) dan

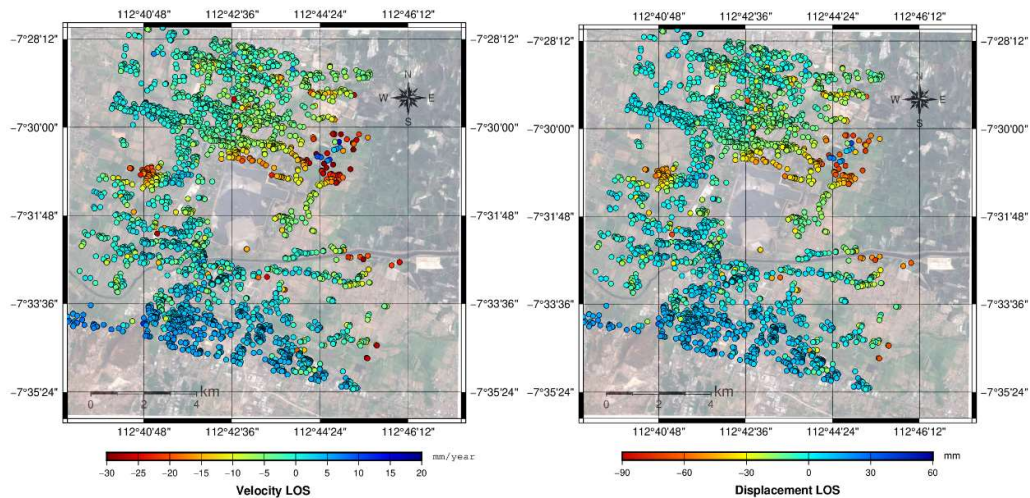
pemantauan geohazard (Sumintadireja dkk, 2007.) Sejarah panjang pemantauan semburan LUSI salah satu diantaranya penelitian Abidin dkk, (2008) menyebutkan dalam pengamatan GPS pada juni, juli, dan agustus 2006 menunjukkan bahwa permukaan tanah telah mengalami *displacement* horisontal dan vertikal. Tingkat *displacement* ini masing – masing mencapai 2 dan 4 cm/hari dalam meliputi area 1 kilometer. Dalam pengamatan GPS dua dan tiga tahun setelah semburan pertama *subsidence* tanah semakin lambat. *Subsidence* yang terjadi hanya beberapa sentimeter hingga desimeter dalam waktu bertahun-tahun (Andreas dkk, 2010).

Mengacu kepada beberapa hasil penelitian yang menyebutkan laju perubahan permukaan tanah yang terus berkurang dari tahun ke tahun mengindikasikan akhir dari LUSI. Berdasarkan hasil interferogram 4 Oktober 2006 dan 19 November 2006 menunjukkan setidaknya sekitar 70 cm dan 80 cm terjadinya amblesan disekitar kawasan semburan LUSI. Penyebab amblesan, yaitu efek pemuatan lumpur yang meletus, pembuatan saluran lumpur silinder, dan penurunan tekanan dan penipisan material di kedalaman bumi (Fukushima dkk, 2009). Dalam 17 bulan dari 2007 – 2009 penurunan permukaan tanah terdeteksi dari 5 – 16 cm (Agustan & Kimata, 2011). Mekanisme perubahan permukaan dapat dimodelkan berdasarkan pola warna yang terdeteksi dengan pendekatan patahan dan intrusi Laju penurunan yang melambat juga dapat mengindikasikan bahwa gaya yang mendorong luapan telah habis, sehingga erupsi lumpur akhirnya akan berakhir (Andreas dkk, 2017).

4.6.3 Analisa Hasil PS-InSAR

Pengolahan 30 citra Sentinel-1 IW berdasarkan metode PS-InSAR menghasilkan dua informasi penting berupa *cumulative displacement* dan *velocity* dalam bentuk LOS. Tujuannya untuk mengetahui kemampuan metode PS-InSAR, penelitian ini fokus menganalisa area yang mengalami perubahan permukaan tanah yang terjadi dikawasan semburan LUSI. Untuk analisa lebih lanjut, penelitian ini menyajikan lokasi titik-titik yang mengalami perubahan tanah dipusat semburan LUSI, bagian barat dari semburan LUSI Aoki & Sidiq (2014)

dan Shirzaei dkk, (2015), dan bagian timur dari semburan LUSI (Fukushima dkk, 2009).

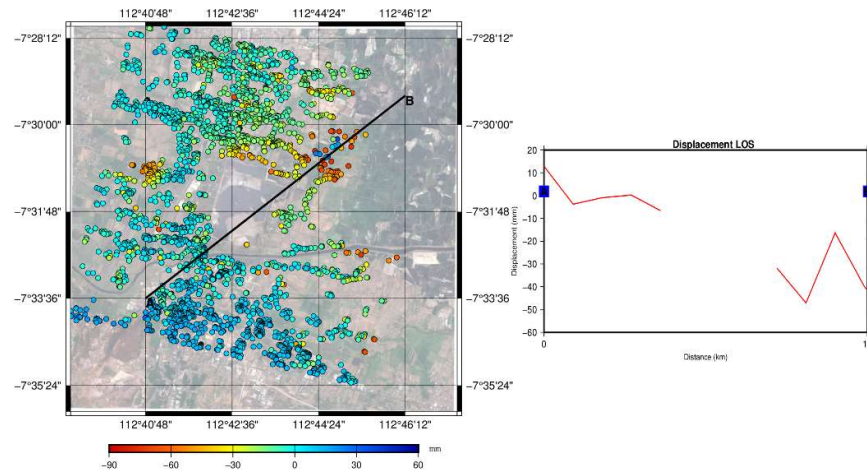


Gambar 4. 27 *Velocity dan Cumulative Displacement PS-InSAR*

Berdasarkan hasil *velocity* dan *cumulative displacement*, sisi Barat dan Timur dari pusat semburan LUSI cenderung mengalami penurunan tanah, hal ini diperkuat dengan penelitian sebelumnya. Sedangkan sisi Selatan cenderung stabil, hanya beberapa area mengalami subsidence namun kecil. Analisa ini difokuskan pada area timur, barat dari pusat semburan LUSI.

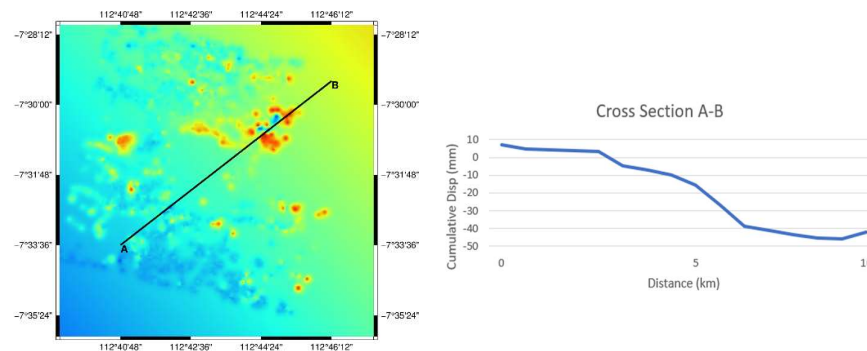
Pembuatan profil melintang ini didasarkan pergerakan LUSI yang berbentuk kubah sehingga perubahan permukaan tanah bergerak kesegala arah. Andreas dkk (2017) menyebutkan gunung lumpur LUSI yang terus meluap menyebabkan perubahan permukaan tanah kesegala arah berdasarkan pembentukan interferogram pada tahun 2006 – 2009. Hal ini ditandai dengan adanya cairan yang keluar dari dalam tanah yang menuju kepermukaan, sehingga kekosongan material ini menyebabkan terjadinya amblesan pada wilayah disekitaran LUSI (Padmawidjaja, 2013).

1. Pusat Semburan LUSI



Gambar 4. 28 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah di Pusat LUSI Berdasarkan PS-InSAR

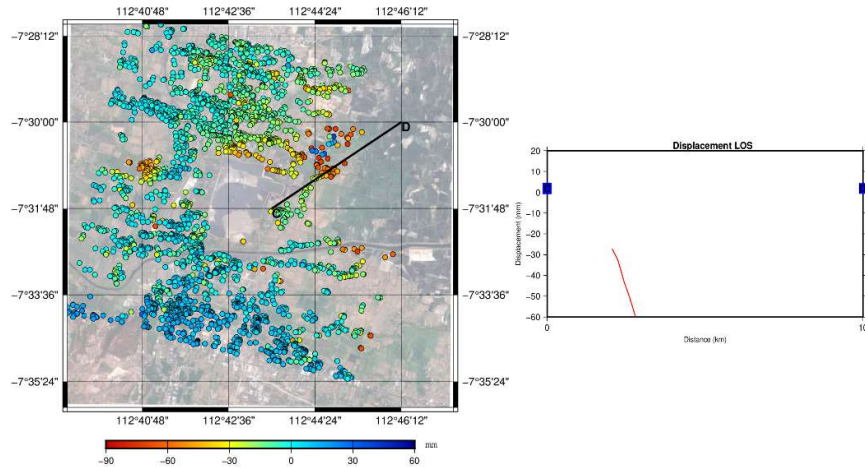
Berdasarkan hasil pembentukan profil melintang pada Gambar 4. 28 dari titik PS, pusat semburan lumpur tidak dapat diinterpretasi karena titik PS akan terbentuk pada objek permukaan tanah yang dianggap solid. Untuk menganalisis besaran perubahan permukaan tanah pada kawasan semburan LUSI dilakukan metode interpolasi pada semua titik PS seperti yang terlihat pada Gambar 4. 29.



Gambar 4. 29 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah di pusat LUSI Berdasarkan Interpolasi

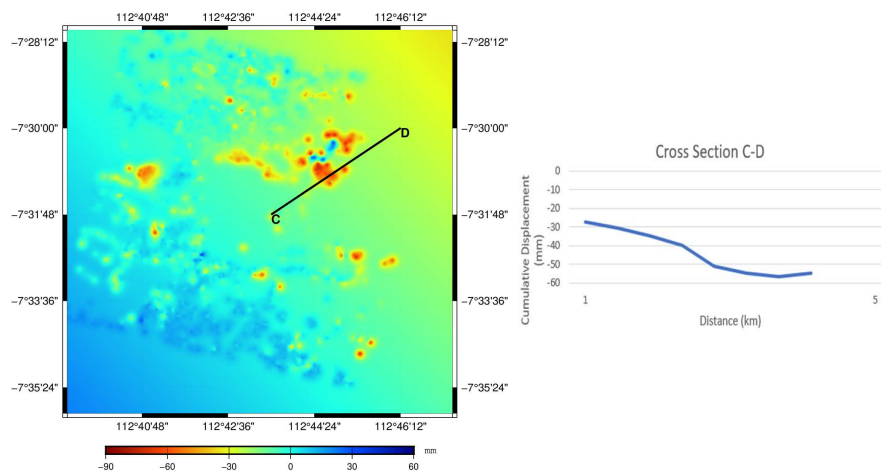
Berdasarkan hasil interpolasi pada setiap titik hasil PS-InSAR pada tahun 2017 – 2019 terjadi *subsidence* pada semburan LUSI dengan besaran 10 mm hingga 20 mm selama tiga tahun.

2. Sisi Timur LUSI



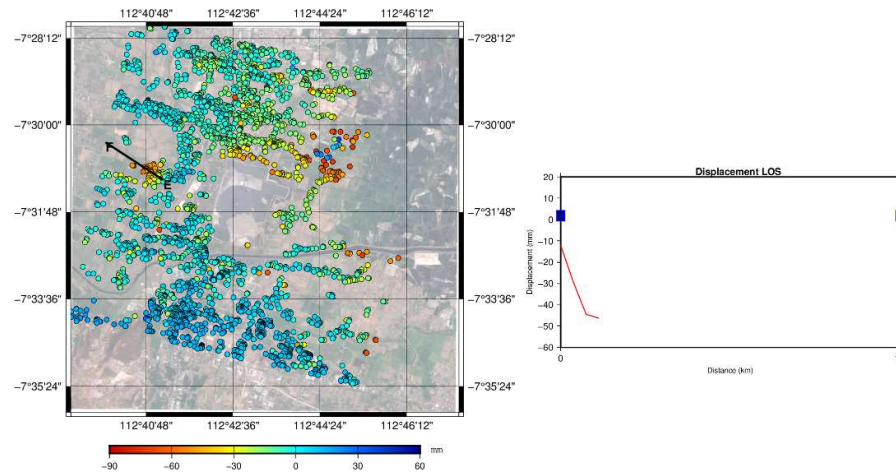
Gambar 4. 30 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah Sisi Timur Berdasarkan PS-InSAR

Berdasarkan pembentukan titik dengan metode PS-InSAR wilayah timur dari semburan LUSI mengalami *subsidence* dengan rentang 30 – 60 mm selama tiga tahun. Secara administrasi wilayah timur yang terdampak penurunan permukaan tanah adalah Desa Penatarsewu, Kalidawir, dan Banjarsari. Untuk melihat keseluruhan penurunan yang terjadi dilakukan interpolasi surface pada titik – titik PS yang terbentuk seperti Gambar 4. 31.



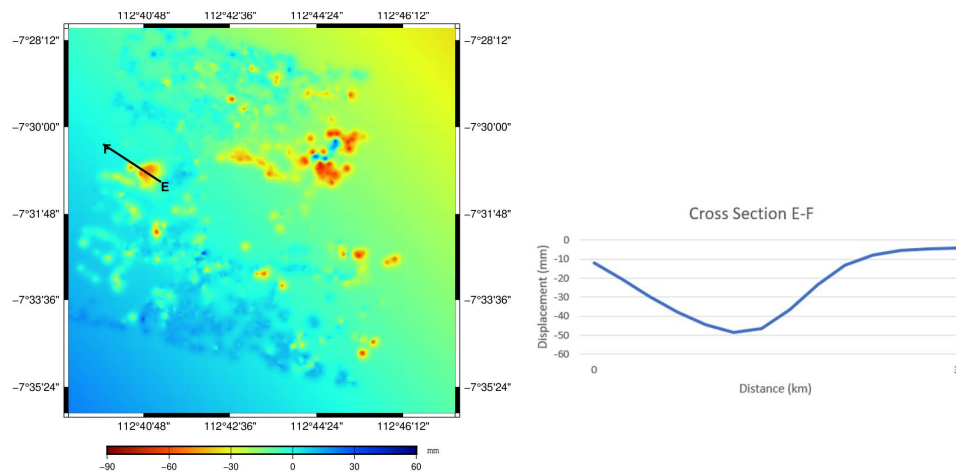
Gambar 4. 31 Tingkat Perubahan Tanah dikawasan Timur Lusi Berdasarkan Interpolasi

3. Sisi Barat LUSI



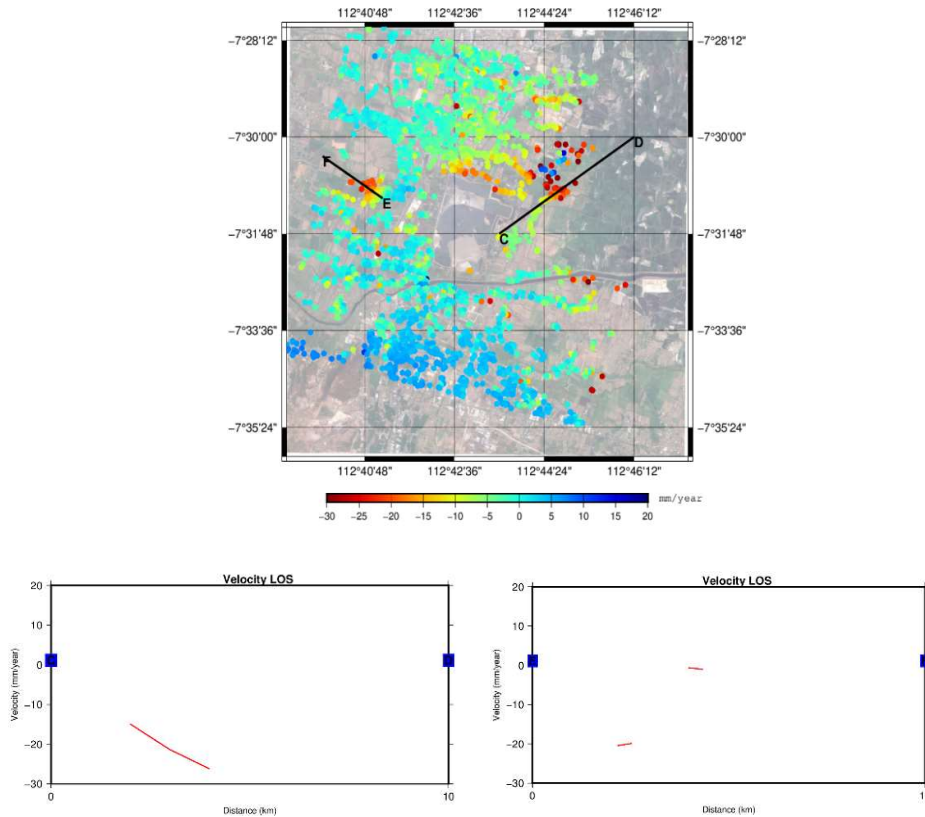
Gambar 4. 32 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah Sisi Barat Berdasarkan PS-InSAR

Berdasarkan pembentukan titik dengan metode PS-InSAR sisi barat dari sumberan LUSI mengalami *subsidence* dengan rentang 10 – 47 mm selama tiga tahun dikawasan pemukiman. Secara administrasi wilayah barat yang terdampak penurunan permukaan tanah adalah Desa Candipari dan Desa Wunut. Untuk melihat keseluruhan penurunan yang terjadi dilakukan interpolasi surface pada titik – titik PS yang terbentuk seperti Gambar 4. 33



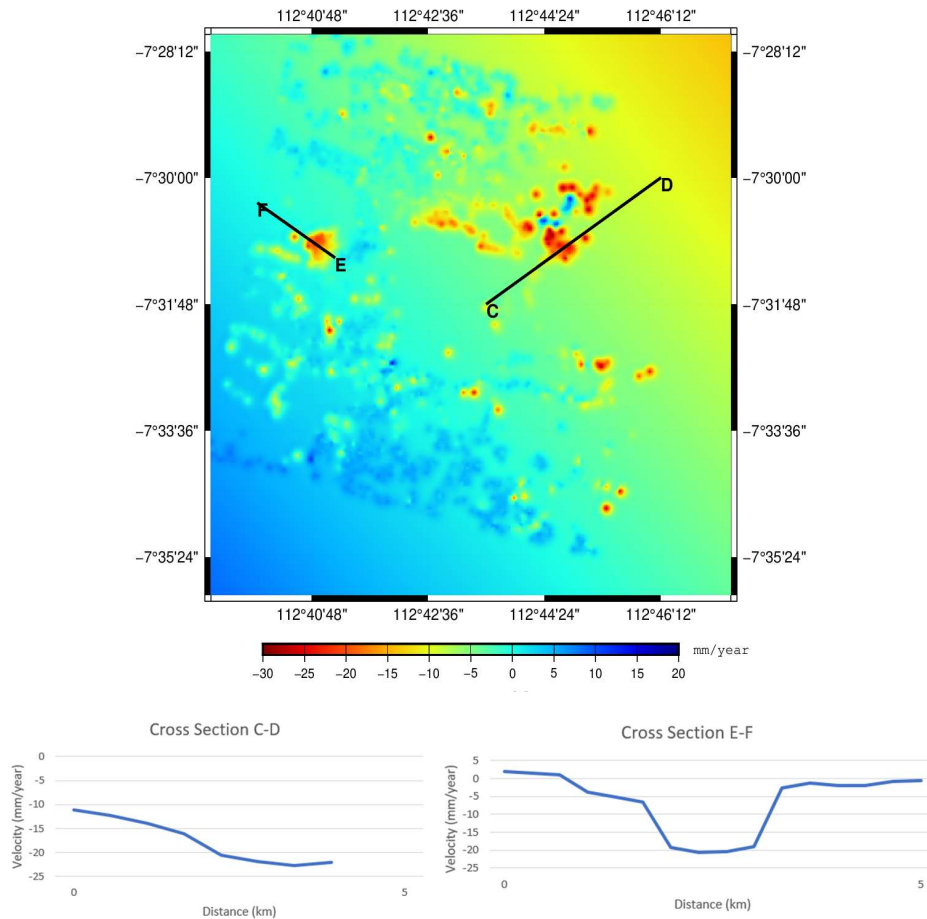
Gambar 4. 33 Tingkat Perubahan Permukaan Tanah Sisi Barat Berdasarkan Interpolasi

Dari keseluruhan lokasi dianalisis kecepatan penurunanya/tahun. Kesuluhan kecepatan penurunan permukaan tanah sisi timur, barat, dan utara dari pusat semburan LUSI dapat dilihat pada Gambar 4. 34.



Gambar 4. 34 Tingkat Kecepatan Perubahan Permukaan Tanah

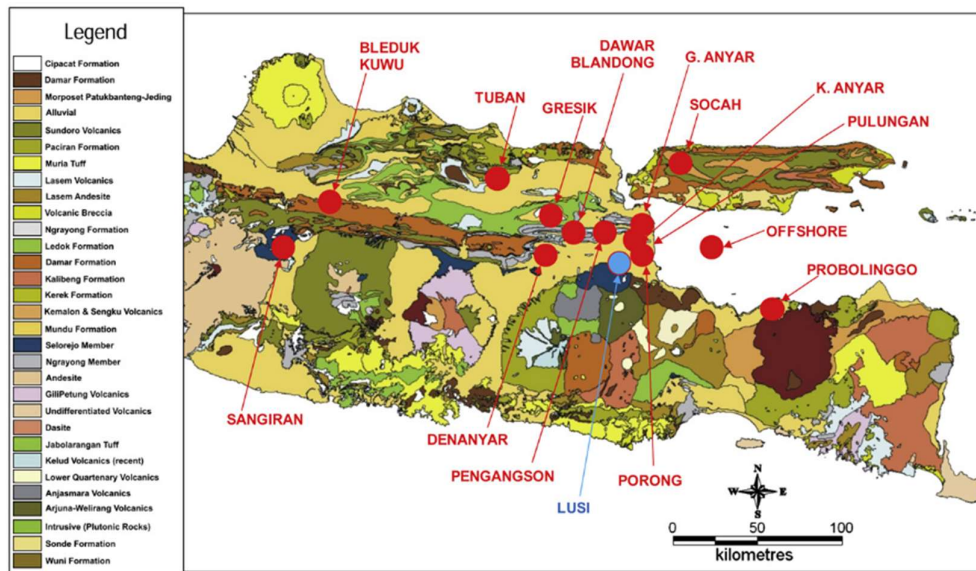
Gambar 4. 34 menunjukkan kecepatan penurunan permukaan tanah pada sisi timur sebesar 8 – 26 mm/tahun dan sisi barat sebesar 1 – 20 mm/tahun. Berdasarkan Analisa ini wilayah timur mengalami penurunan permukaan tanah yang relatif lebih cepat dibandingkan dengan wilayah lainnya. Sisi timur dari semburan LUSI mengalami penurunan permukaan tanah hingga 61 mm selama 3 tahun hasil pengolahan PS-InSAR. Untuk melihat seluruh perubahan permukaan tanah yang terjadi di sisi timur, barat dan utara dari pusat semburan, dilakukan proses interpolasi seperti yang terlihat seperti Gambar 4. 35.



Gambar 4. 35 Tingkat Kecepatan Perubahan Permukaan Tanah Berdasarkan Interpolasi

4.6.4 Analisa Terhadap Faktor Perubahan Permukaan Tanah

Dari pengolahan data Sentinel-1A dengan Teknik PS-InSAR dalam penelitian ini penulis membagi menjadi dua faktor. Faktor pertama adalah metode yang digunakan dalam setiap penelitian. Perbedaan data SAR, parameter pengolahan dan *tools* pengolahan menjadi salah satu faktor yang membuat hasil berbeda dalam satu objek yang sama (Lazecky dkk, 2016). Faktor lain yang mempengaruhi perubahan permukaan tanah dikawasan LUSI adalah Geologi Gambar 4. 36.

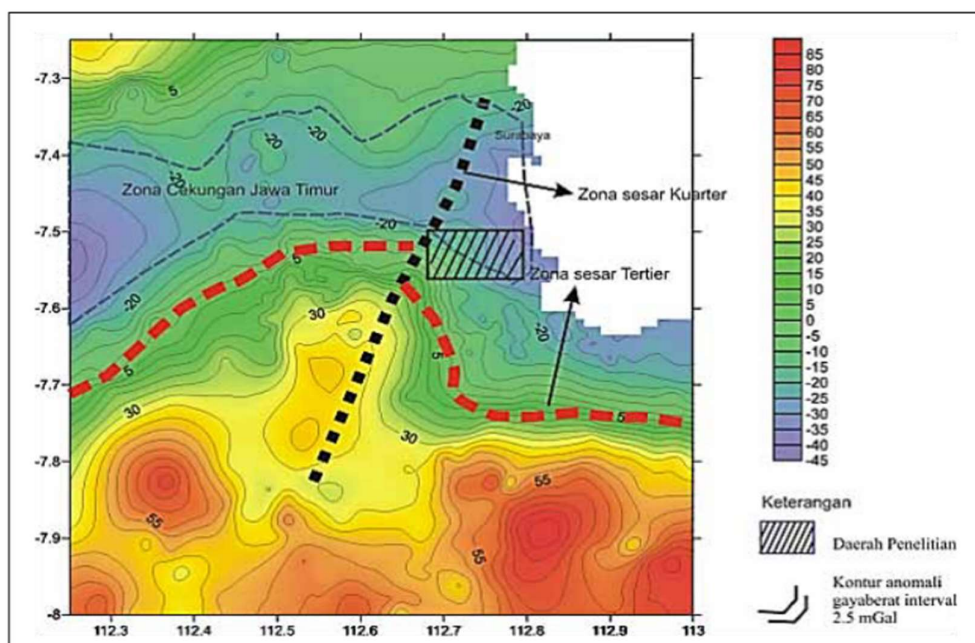


Gambar 4. 36 Peta Geologi dan sebaran gunung lumpur di Jawa Timur dan Jawa Tengah. Titik merah adalah lokasi lumpur yang teridentifikasi (Istadi dkk, 2009)

Provinsi Jatim dan Pulau Jawa merupakan bagian dari Lempeng Benua Eurasia yang secara terus-menerus didesak oleh Kerak Samudra Australia yang bergerak ke utara. Pertemuan kedua lempeng ini membentuk zona penunjaman di sebelah selatan Pulau Jawa. *Basin* atau cekungan Jawa Timur berkembang sebagai cekungan busur belakang sebagai hasil dari subduksi lempeng samudera Australia di Barat laut di bawah benua Sunda selama masa kapur akhir. Sistem utama tektonik ekstensional berlaku selama waktu tersier awal yang disebabkan oleh interaksi yang kompleks antara lempeng Australia, Eurasia, dan Pasifik. Subduksi ini menciptakan sistem graben ekstensional dan pengembangan retakan cekungan (Istadi dkk, 2009). Dengan demikian, dalam prespektif geodinamika, posisi ujung timur Pulau Jawa ini juga sangat rawan dengan gempa bumi, tercatat beberapa gempa pernah terjadi semenjak Mei 2006 hingga 2017 (PUSGEN (Pusat Studi Gempa Nasional), 2017) dan serangkaian gempa lainnya yang terjadi semenjak 2017 hingga 2019.

Sidoarjo termasuk ke dalam Cekungan Kendeng yang merupakan Zona *Central Depression* Pulau Jawa akibat tumbukan lempeng Eurasia dengan lempeng Indo-Australia, sehingga banyak terdapat patahan yang masih aktif. Di dalam rangkaian Zona Kendeng terdapat sesar geser dengan arah Barat daya -

timur laut, yaitu sesar Watukosek. Sesar ini memanjang melewati Mojokerto, Gresik, sampai bagian Barat Madura, dan menimbulkan sesar-sesar lainnya (Setiadi dkk, 2016). Sesar Watukosek berada pada stratigrafi Mandala Kendeng, berarah timur laut - Barat daya yang melewati Pulungan - Sidoarjo dan Bangkalan, Madura (Van Bemmelen, 1949 dalam Setiadi dkk, 2016)). Adanya kelurusan sebaran *mud volcano* menunjukkan kontrol tektonik berupa kelurusan struktur sesar permukaan dan bawah permukaan, sebagai hasil reaktivasi sesar pada zona cekungan Kendeng.



Gambar 4. 37 Pola Struktur Geologi Regional Berdasarkan Anomali Gayaberat Malang dan Surabaya (Padmawidjaja, 2013)

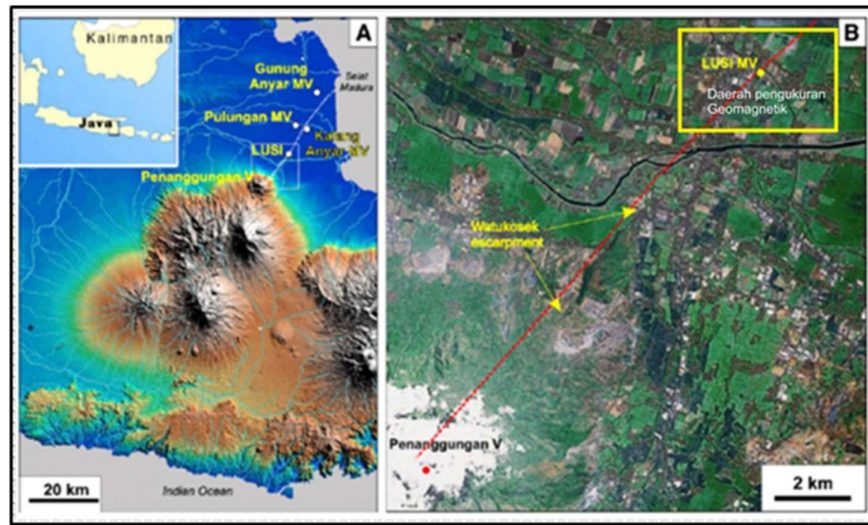
Kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan pengukuran gayaberat (Padmawidjaja, 2013) dalam 3 periode (Gambar 4. 37) telah diperoleh perubahan rapat massa. Perubahan rapat massa merupakan deformasi bawah permukaan, akibat perubahan material padatan menjadi material cairan yang menunjukkan ketidak stabilan daerah tersebut. Model geologi pada penampang anomali gayaberat memotong kolam lumpur ditafsirkan bahwa Sesar Watukosek, mengalami rekahan maupun sesar dangkal sebagai reaktivasi dari gaya tekan horizontal maupun vertikal. Tembusan gas maupun semburan air lumpur di daerah

Siring Barat sampai Tanggulangin sebagai kontrol dari reaktivasi dari Sesar Watukosek (Padmawidjaja, 2013). Penelitian Andreas dkk (2017) menganalisis salah satu penyebab semburan LUSI berdasarkan sesar Watukosek yang melintasi pusat semburan LUSI, dapat dilihat dari Gambar 4. 38.



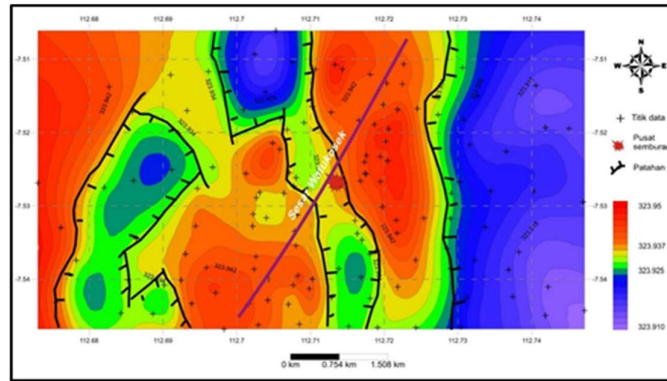
Gambar 4. 38 Sesar Watukosek yang Melintasi Pusat Semburan LUSI (Andreas dkk, 2017)

Pergerakan tektonik yang terus menerus akan menyaring dan berpotensi menggeser struktur dan infrastruktur permukaan, merusak rumah dan tanggul, menyebabkan banjir lumpur. Pergerakan vertikal dan horizontal selanjutnya dapat merusak infrastruktur, khususnya jalan kereta api dan pipa gas dan air. Pengaktifan kembali patahan yang terus menerus dan pembentukan patahan dan celah akan menyebabkan munculnya lebih banyak gelembung gas dalam radius 2–3 km dari lubang letusan lumpur utama di sepanjang jalur kelurusan yang lemah sepanjang bidang patahan (Istadi dkk, 2009).



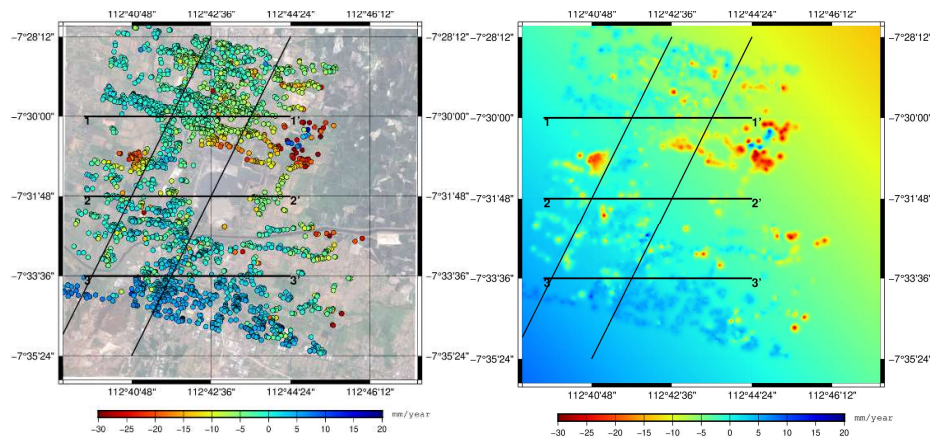
Gambar 4. 39 Jalur Sesar Watukosek di Daerah Sidoarjo (Setiadi dkk, 2016)

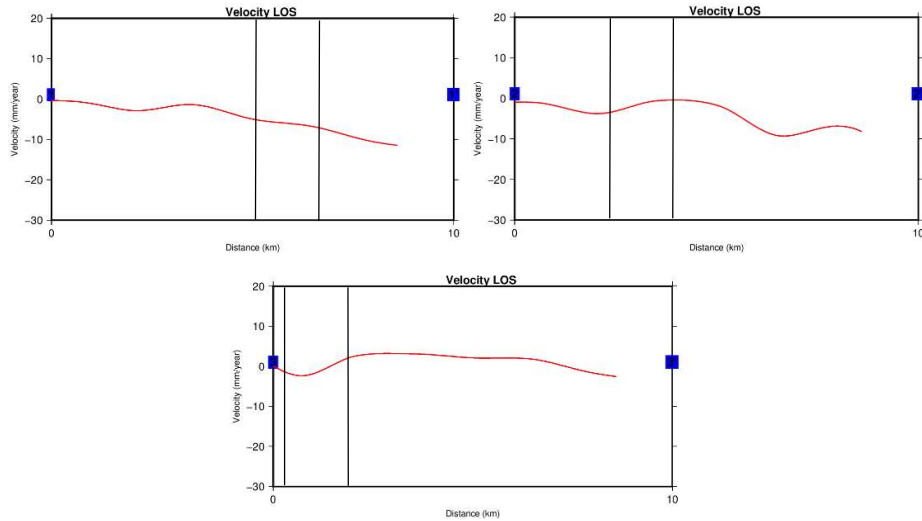
Analisis data geologi dan geofisika menunjukkan bahwa pelepasan cairan bawah permukaan biasanya berfokus pada berbagai tipologi struktur rapuh curam yang sering dikaitkan dengan antiklin. antiklin pada dasarnya adalah lipatan batu yang mendalam, tua, yang perlahan-lahan melipat dan menindih batuan di atasnya, zonasi vertikal tegangan dalam inti lipatan dapat mewakili kontrol penting pada pengembangan fraktur lapisan batuan dan akhirnya menjadi penempatan lumpur (Bonini, 2012). Geologi daerah penelitian didominasi oleh batuan sedimen. Sedimen alluvium dengan ketebalan lebih besar dari 330 meter sebagai endapan laut dangkal yang menempati daerah Porong dan sekitarnya, dimana sedimen tersebut dipengaruhi oleh struktur dangkal yang membentuk rekahan maupun gaya horizontal dari aktifitas lumpur Sidoarjo (Supriyana dkk, 2018). Setiadi dkk (2016) melakukan pemodelan struktur geologi dibawah permukaan dengan pengukuran metode Geomagnetik, didapatkan pemodelan dan jalur sesar Watukosek terlihat pada Gambar 4. 40.



Gambar 4. 40 Pemodelan Sesar Watusokek Melewai Sisi Barat dari Pusat LUSI (Setiadi dkk, 2016)

Dari penelitian Padmawidjaja (2013), Setiadi dkk (2016), dan Andreas dkk (2017) diperoleh 2 informasi sesar Watusokek yang melintasi sisi barat dan memotong pusat semburan LUSI. Dalam penelitian ini sesar Watusokek diperkirakan dengan penelitian sebelumnya. Dimana pembentukan sesar Watusokek dalam penelitian ini diinterpretasi berdasarkan Gambar 4. 38, Gambar 4. 39 dan Gambar 4. 40, sehingga analisis LUSI berdasarkan sesar Watusokek dapat dilihat pada Gambar 4. 41





Gambar 4. 41 Profil Melintang Sesar Watukosek

Untuk melihat perubahan permukaan tanah yang dipengaruhi oleh sesar Watukosek yang melewati LUSI, dilakukan pembuatan profil melintang pada hasil PS-InSAR Gambar 4. 40. Sesar Watukosek yang digambarkan adalah pendugaan lokasi sesar berdasarkan penelitian Setiadi dkk, (2016) dan Supriyana dkk, (2018). Dari hasil profil melintang didapatkan pola penurunan sebesar 0 – 12 mm/tahun, namun saat melewati sesar Watukosek pola penurunan berkurang antara 0 – 4 mm/tahun. Ini mengindikasikan bahwa sesar Watukosek dalam kondisi aktif, namun masih belum diketahui jenisnya, apakah *locked fault* atau *creeping fault*. Jika sesar Kendeng termasuk dalam *locked fault*, maka potensial gempa akan lebih besar dari pada estimasi yang diperhitungkan sebelumnya, sedangkan jika *creeping fault*, maka sebaiknya menghindari pembangunan infrastruktur di sepanjang sesar (Yulyta, 2018).

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perubahan permukaan tanah yang terjadi disekitar kawasan LUSI cenderung menurun seiring berjalannya waktu. Hal ini ditandai dengan berkurangnya *cumulative displacement* dan *velocity* rata – rata jika dibandingkan dengan awal kemunculan LUSI dan penelitian terdahulu. Dimana pada tahun 2017 terjadi perubahan permukaan tanah pada rentang 7 mm (*uplift*) dan -21 mm (*subsidence*) dengan kecepatan perubahan permukaan tanah rata – rata 3 mm/10 bulan, 2018 terjadi perubahan permukaan tanah pada rentang 10 mm (*uplift*) dan -30 mm (*subsidence*) dengan kecepatan perubahan permukaan tanah rata – rata 5 mm/tahun, dan pada tahun 2019 terjadi perubahan permukaan tanah pada rentang 7 mm (*uplift*) dan -21 mm (*subsidence*) dengan kecepatan perubahan permukaan tanah rata – rata 3 mm/9 bulan.
2. Parameter ambang batas koherensi yang berbeda memberikan hasil perubahan permukaan tanah dan kecepatan perubahan permukaan tanah yang berbeda. Berdasarkan evaluasi dengan uji statistik *Fisher Test* diketahui bahwa selisih antar ambang batas koherensi tidak berbeda secara signifikan, namun dapat direkomendasikan menggunakan nilai ambang batas koherensi minimal yaitu 0,50, hal ini disebabkan karena nilai ambang batas ini memiliki jumlah poin dan parameter koherensi yang baik dalam mendapatkan perubahan permukaan tanah.
3. Bagian Timur dan Barat dari semburan LUSI mengalami penurunan permukaan tanah dan menjadi perhatian dari beberapa penelitian sebelumnya. Secara geologi faktor yang mempengaruhi penurunan ini adalah rangkaian zona Kendeng, dimana sesar Watukosek yang memanjang melewati Mojokerto, Gresik, sampai bagian Barat Madura, dan menimbulkan sesar-sesar lainnya. Adanya kelurusan sebaran *mud volcano* menunjukkan kontrol tektonik berupa kelurusan struktur sesar

permukaan dan bawah permukaan, sebagai hasil reaktivasi sesar pada zona cekungan Kendeng (Setiadi dkk, 2016). Sisi barat diindikasikan dengan nilai rapat massa rendah yang menunjukkan adanya struktur rekahan dan patahan. Struktur rekahan dan patahan merupakan zona lemah, air dan lumpur akan mudah masuk pada zona tersebut sehingga mempercepat terjadinya pergerakan tanah (Supriyana dkk, 2018)

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diajukan untuk penelitian selanjutnya antara lain sebagai berikut:

1. Validasi untuk wilayah Timur dan Barat dari semburan LUSI dengan metode pengukuran GPS untuk mendapatkan nilai *vertical* dari perubahan permukaan yang terjadi.
2. Kombinasi menggunakan data *ascending* untuk mendapatkan hasil *displacement* vertikal dengan proses *decomposition* (Samieie-Esfahany dkk, 2010; Blasco et al., 2019)
3. Jumlah titik poin terpengaruh oleh nilai ambang batas koherensi, namun ambang batas koherensi ini tidak mempengaruhi hasil perubahan tanah secara signifikan, sehingga perlu adanya penelitian lanjutan dengan menggunakan parameter nilai ASI dan *dispersion* pembentukan titik PS yang berbeda.
4. Menganalisis wilayah yang berbeda untuk melihat secara keseluruhan perubahan permukaan tanah yang terjadi disekitar kawasan semburan LUSI.
5. Dari keseluruhan hasil pengolahan metode PS-InSAR perlu dilakukannya analisa parameter yang lebih baik lagi, seperti koreksi atmosfer (APS) untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., Davies, R. J., Kusuma, M. A., Andreas, H., & Deguchi, T. (2008). Subsidence and uplift of Sidoarjo (East Java) due to the eruption of the Lusi mud volcano (2006-present). *Environmental Geology*, 57(4), 833–844. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1363-4>
- Agustan, & Kimata, F. (2011). ANALISIS DEFORMASI DAERAH PORONG – SIDOARJO TERKAIT SEMBURAN LUMPUR DENGAN TEKNIK INTERFEROMETRI. *Globe Volume*, 1–7.
- Altiner, Y. (1999). Analytical Surface Deformation Theory. In *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03935-9>
- Andreas, H., Abidin, H. Z., Sidiq, T. P., Gumilar, I., Aoki, Y., Hakim, A. L., & Sumintadiredja, P. (2017). Understanding the trigger for the LUSI mud volcano eruption from ground deformation signatures. *Geological Society Special Publication*, 441(1), 199–212. <https://doi.org/10.1144/SP441.10>
- Andreas, H., Abidin, Z., Mipi, A., Kusuma, P., Sumintadireja, I., & Gumilar, I. (2010). Ground Displacements around LUSI Mud Volcano Indonesia as Inferred from GPS Surveys. *FIG Congress*, 11–16.
- Aoki, Y., & Sidiq, T. P. (2014). Ground deformation associated with the eruption of Lumpur Sidoarjo mud volcano, east Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 278–279, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.012>
- Beladam, O., Balz, T., Mohamadi, B., & Abdalhak, M. (2019). Using ps-insar with sentinel-1 images for deformation monitoring in northeast Algeria. *Geosciences (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/geosciences9070315>
- Blasco, J. M. D., Foumelis, M., Stewart, C., & Hooper, A. (2019). Measuring urban subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing*, 11(2).

<https://doi.org/10.3390/rs11020129>

- Bonini, M. (2012). Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. *Earth-Science Reviews*, 115(3), 121–152.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.09.002>
- BPS (Badan Pusat Statistik Kabupaten Sidoarjo). (2019). *Kabupaten Sidoarjo Dalam Angka 2019*. Retrieved from
<https://sidoarjokab.bps.go.id/publication/>
- Canisius, F., Brisco, B., Murnaghan, K., Kooij, M. Van Der, & Keizer, E. (2019). SAR Backscatter and InSAR Coherence for Monitoring Wetland Extent , Flood Pulse and Vegetation : A Study of the Amazon Lowland. *Remote Sensing*, 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs11060720>
- Chang, H., Ge, L., & Rizos, C. (2005). InSAR and Mathematical Modelling for Measuring Surface Deformation Due to Geothermal Water Extraction in New Zealand. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing*, 1–3.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526298>
- Devanthery, N., Crosetto, M., Cuevas-González, M., Monserrat, O., Barra, A., & Crippa, B. (2016). Deformation Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry and Sentinel-1 SAR Data. *Procedia Computer Science*, 100, 1121–1126. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.263>
- Ding, X. L., Li, Z. W., Zhu, J. J., Feng, G. C., & Long, J. P. (2008). Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation. *Sensors*, 8(9), 5426–5448. <https://doi.org/10.3390/s8095426>
- ESA. (2012). Sentinel-1 ESA’s radar observatory mission for GMES operational services. In K. Fletcher (Ed.), *Sentinel-1: ESA’s Radar Observatory Mission for GMES Operational Services* (Vol. 1).
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Fárová, K., Jelének, J., Kopačková-Strnadová, V., & Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to

monitor highway stability: A case study of a massive Dobkovičky landslide, Czech Republic. *Remote Sensing*, 11(22), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/rs11222670>

Feng, Q., Xu, H., Wu, Z., You, Y., Liu, W., & Ge, S. (2016). Improved goldstein interferogram filter based on local fringe frequency estimation. *Sensors (Switzerland)*, 16(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s16111976>

Ferns, D. C., Barrett, E. C., & Curtis, L. F. (2006). Introduction to Environmental Remote Sensing. *The Journal of Applied Ecology*, 20(3), 1003. <https://doi.org/10.2307/2403163>

Ferretti, A., Monti-guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007a). *InSAR Principles : Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation* (Karen Fletcher, ed.). Frascati, italy: ESA Publications ESTEC.

Ferretti, A., Monti-guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007b). *Part B InSAR processing: a practical approach* (Karen Fletcher, ed.). Frascati, italy: ESA Publications ESTEC.

Ferretti, A., Monti-guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007c). *Part C InSAR processing: a mathematical approach* (Karen Fletcher, ed.). Frascati, italy: ESA Publications ESTEC.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>

Fiaschi, S., Holohan, E. P., Sheehy, M., & Floris, M. (2019). PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: A case study in the Republic of Ireland. *Remote Sensing*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/rs11030348>

Fukushima, Y., Mori, J., Hashimoto, M., & Kano, Y. (2009). Subsidence associated with the LUSI mud eruption, East Java, investigated by SAR

- interferometry. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1740–1750.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.02.001>
- Gauchet, C., Christophe, E., Chia, A. S., Yin, T., & Liew, S. C. (2011). InSAR monitoring of the Lusi mud volcano, East Java, from 2006 to 2010. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1961–1964. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049511>
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar Interferogram Filtering for Geophysical Application. *Geophysical Research Letters*, 25, 4035–4038.
<https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- Haghighi, M. H., & Motagh, M. (2017). Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping. *ZfV - Zeitschrift Fur Geodasie, Geoinformation Und Landmanagement*, 142(4), 245–256. <https://doi.org/10.12902/zfv-0174-2017>
- Hanssen, R. F. (2003). Subsidence Monitoring Using Contiguous and Ps-Insar : Quality Assessment Based on Precision and Reliability. *11 Th FIG Symposium on Deformation Measurements*.
- Istadi, B. P., Pramono, G. H., Sumintadireja, P., & Alam, S. (2009). Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1724–1739.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.03.006>
- Johansson, A. M., Brekke, C., Spreen, G., & King, J. A. (2018). X-, C-, and L-band SAR signatures of newly formed sea ice in Arctic leads during winter and spring. *Remote Sensing of Environment*, 204(April 2017), 162–180.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.032>
- Karato, S. (2008). Deformation of Earth Materials. In *Cambridge University Press*. New York: United States of America by Cambridge University Press, New York.

- Kushardono, D. (2017). KLASIFIKASI DIGITAL PADA PENGINDERAAN JAUH. In A. M. Sari (Ed.), *New Scientist* (1st ed., Vol. 158).
https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6_5006
- Lazecky, M., Comut, F. C., Bakon, M., Qin, Y., Perissin, D., Hatton, E., ... Ustun, A. (2016). Concept of an Effective Sentinel-1 Satellite SAR Interferometry System. *Procedia Computer Science*, 100(October), 14–18.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.118>
- Lazecký, M., Hlaváčová, I., Phase, J., Ruiz-, A. M., Martinovič, J., & Ruiz-, A. M. (2018). Accuracy of Sentinel-1 Interferometry Monitoring Accuracy of Sentinel-1 Interferometry Monitoring System based. *Procedia Computer Science*, 138, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.044>
- Lei, L., Perissin, D., & Qin, Y. (2013). Atmospheric Phase Screen Estimation with TerraSAR-X Data in Hong Kong. *Institute of Space and Earth Information Science*, 5.
- Liu, Y. (2015). *InSAR Technique for Earthquake Studies Geoscience and Earth Observing Systems Group (GEOS)*. The University of New South Wales Sydney,.
- Lu, C., Ni, C.-F., Chang, C.-P., Yen, J.-Y., & Chuang, R. Y. (2018). Coherence Difference Analysis of Sentinel-1 SAR Interferogram to Identify Earthquake-Induced Disasters in Urban Areas. *Remote Sensing*, 1–21.
<https://doi.org/10.3390/rs10081318>
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). RADAR INTERFEROMETRY AND ITS APPLICATION TO CHANGES IN THE EARTH ' S SURFACE. *Reviews of Geophysics*, 441–500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). Applied Statistics and Probability for Engineers. In *European Journal of Engineering Education* (Third Edit, Vol. 19). <https://doi.org/10.1080/03043799408928333>
- Natsuaki, R., Nagai, H., Tomii, N., & Tadono, T. (2018). Sensitivity and

Limitation in Damage Detection for Individual Buildings Using InSAR Coherence — A Case Study in 2016 Kumamoto Earthquakes. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10020245>

Ng, A. H., Ge, L., Li, X., Abidin, H. Z., Andreas, H., & Zhang, K. (2012). Mapping land subsidence in Jakarta , Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 18, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.018>

Padmawidjaja, T. (2013). Analisis data gayaberat daerah Porong dalam studi kasus struktur dan deformasi geologi bawah permukaan Analysis of the Gravity Data of Porong regions in the case study. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 4(3), 237–251.

Pepe, A., Berardino, P., Bonano, M., Euillades, L. D., Lanari, R., & Sansosti, E. (2011). SBAS-based satellite orbit correction for the generation of DInSAR time-series: Application to RADARSAT-1 data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(12 PART 2), 5150–5165. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2155069>

Perissin, D. (2009). SARPROZ. Retrieved January 17, 2020, from sarproz.com website: <https://sarproz.com/publish/SARPROZ.pdf>

Prasetya, A. B., Yuwono, B. D., & Awaluddin, M. (2017). PEMANTAUAN PENURUNAN MUKA TANAH KOTA SEMARANG TAHUN 2016 MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK GAMIT 10.6. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(April), 21–28.

Prasetyo, Y., & Subiyanto, S. (2014). STUDI PENURUNAN MUKA TANAH (LAND SUBSIDENCE) MENGGUNAKAN METODE PERMANENT SCATTERER INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (PS-INSAR) DI KAWASAN KOTA CIMAHI - JAWA BARAT. *Teknik*, 35(2), 78–85. Retrieved from <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/teknik>

PUSGEN. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*.

Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

- Qin, Y. (2018). Demo : APS Estimation & Multi- temporal analysis with Sarproz. Sarproz processing tutorial series. *Tutorial and Exercises*, 75.
- Rosa, I. (2018). MULTIDISCIPLINARY REMOTE SENSING FOR ENVIRONMENTAL MONITORING. *ISPRS Technical Commission III WG III/2*, (12).
- Rosen, P., Hensley, S., & Joughin, I. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. Inverse problems. *Proceedings of the ...*, 1, 1–54. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=838084
- Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A., & Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156–163.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030>
- Samieie-Esfahany, S., Hanssen, R. F., Thienen-visser, K. Van, Muntendam-bos, A., Samiei-Esfahany, S., Hanssen, R. F., ... Muntendam-bos, A. (2010). On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. *Proceedings of Fringe 2009 Workshop, 2009*(March), 1–7. Retrieved from https://earth.esa.int/workshops/fringe09/proceedings/papers/s12_3esfa.pdf
- Setiadi, I., Darmawan, A., & Marjiono. (2016). Pendugaan Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Terdampak Lumpur Sidoarjo (Lusi) Berdasarkan Analisis Data Geomagnet. *JURNAL LINGKUNGAN DAN BENCANA GEOLOGI*, (692), 125–134.
- Shirzaei, M., Rudolph, M. L., & Manga, M. (2015). Deep and shallow sources for the Lusi mud eruption revealed by surface deformation. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5274–5281.
<https://doi.org/10.1002/2015GL064576>

- Sophian, I. (2010). Penurunan Muka Tanah Di Kota-Kota Besar Pesisir Pantai Utara Jawa. *Bulletin of Scientific Contribution*, 8.
- Sumantyo, J. T. S., Shimada, M., Mathieu, P., & Abidin, H. Z. (2012). Long-Term Consecutive DInSAR for Volume Change Estimation of Land Deformation. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 50(1), 259–270.
- Sumintadireja, P., Purwaman, I., Istadi, B., & Darmoyo, A. . (2007). Geology and geophysics study in revealing subsurface condition of Banjarpanji mud extrusion, Sidoarjo, East Java, Indonesia. *Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures, JVS004*, 2432.
- Supriyana, E., Santoso, B., & Padmawidjaja, T. (2018). IDENTIFIKASI GERAKAN TANAH MELALUI KAJIAN GAYA BERAT DI SEKITAR AREA LUMPUR SIDOARJO. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 08(01), 22–28.
- Thomas, A., Holley, R., Burren, R., Shilston, D., Waring, D., & Meikle, C. (2010). Long-term differential InSAR monitoring of the Lumpur Sidoarjo mud volcano (Java, Indonesia) using ALOS PALSAR imagery. *IAHS-AISH Publication*, 339(March), 274–278.
- Tolomei, C., Salvi, S., Boncori, J. P. M., & Pezzo, G. (2015). InSAR measurement of crustal deformation transients during the earthquake preparation processes: A review. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 56(2), 151–166. <https://doi.org/10.4430/bgta0143>
- Vincent, P., Johnsen, H., & Piantanida, R. (2018). *Sentinel-1 Product Specification Prepared*. Retrieved from <https://earth.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Specification>
- Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C., & Strauss, P. (2018). Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*, 10(9), 1–19.

<https://doi.org/10.3390/rs10091396>

Washaya, P., & Balz, T. (2018). SAR COHERENCE CHANGE DETECTION OF URBAN AREAS AFFECTED BY DISASTERS USING SENTINEL-1 IMAGERY. *ISPRS TC III Mid-Term Symposium “Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing, XLII*, 7–10.

Wibowo, H. T., Prastisho, B., Prasetyadi, C., & Yudiantoro, D. F. (2018). The evolution of Sidoarjo hot mudflow (Lusi), Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012050>

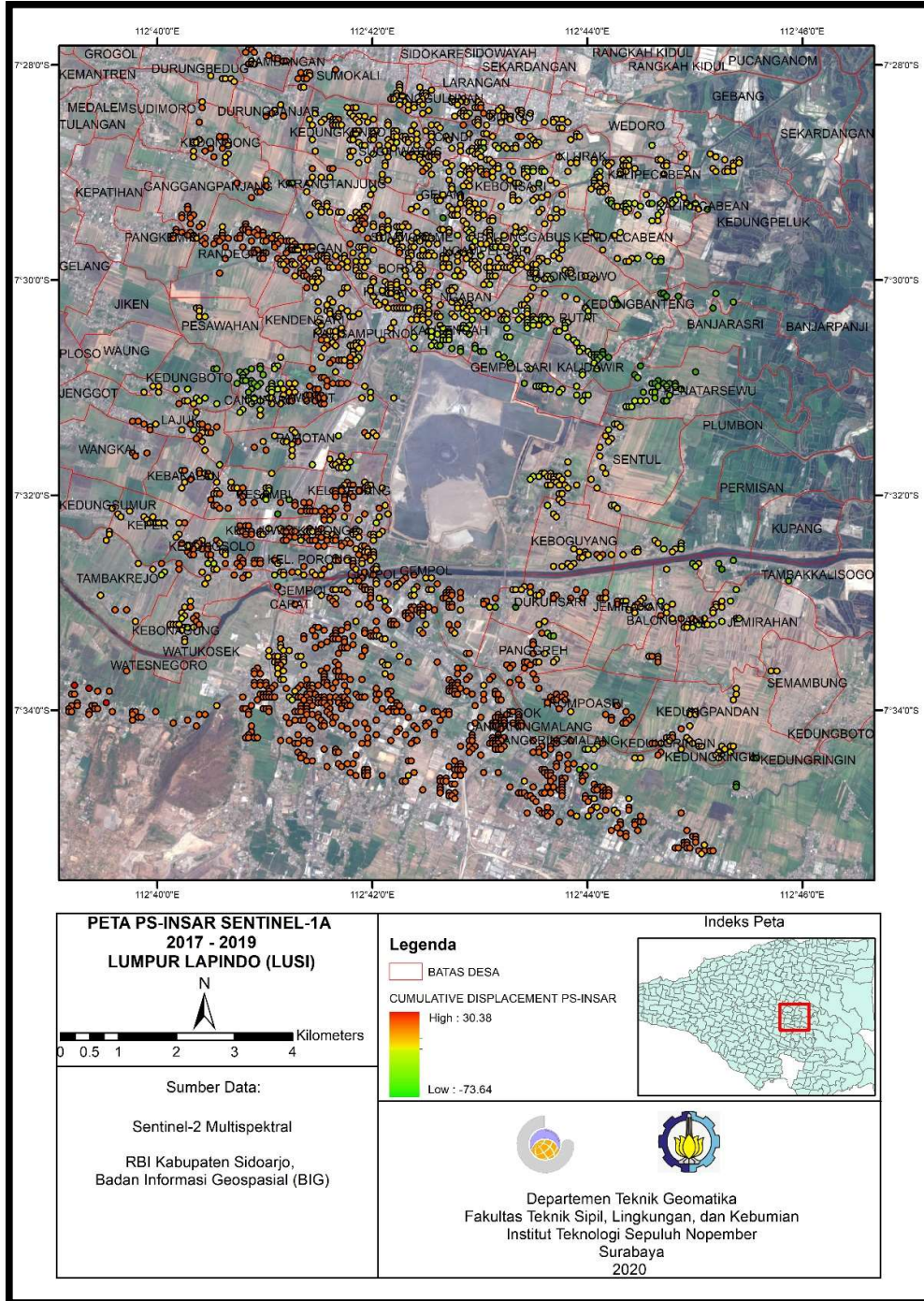
Yulyta, S. A. (2018). *APLIKASI METODE SBAS-DINSAR MENGGUNAKAN DATA SENTINEL-1A UNTUK PENGAMATAN PENURUNAN MUKA TANAH DI KOTA SURABAYA*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Yulyta, S. A., Taufik, M., & Hayati, N. (2015). STUDI PENGAMATAN PENURUNAN DAN KENAIKAN MUKA TANAH MENGGUNAKAN METODE DIFFERENTIAL INTERFEROMETRI SYNTHETIC APERTURE RADAR (DInSAR) (Studi Kasus : Lumpur Lapindo , Sidoarjo). *GEOID*, 11.

Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Kaartinen, H., & Haggren, H. (2018). A Review: Remote Sensing Sensors. *Multi-Purposeful Application of Geospatial Data*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71049>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Penulis, Saiyidinal Fikri, dilahirkan di Padang, 24 Januari 1994, merupakan anak pertama dari 5 bersaudara dari Bapak Hasnal dan Dewi Anggraini. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Raudatul Atfal 1 Kota Bengkulu, SDN 07 Kota Bengkulu, SMPN 1 Atap Baing Malalo, SMAN 2 X Koto Singkarak Kab. Solok Sumatera Barat, dan lulus pada tahun 2012. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi Negeri di Institut Teknologi Padang (ITP) dan mengambil jurusan Teknik Geodesi melalui jalur MANDIRI pada tahun 2013. Selama menjadi mahasiswa S1, penulis cukup aktif di organisasi intra kampus yaitu sebagai Ketua Himpunan Mahasiswa Teknik Geodesi (HMTG) ITP. Penulis pernah mengikuti kegiatan Kerja Praktek/ Magang di Badan Informasi Geospasial (BIG) pada Pusat Jaring Kontrol Geodesi Geodinamika (PJKGG) dengan spesifikasi Bidang Jaring Horizontal selama dua bulan. Penulis lulus jenjang pendidikan sarjana pada 2017 dengan masa pendidikan selama 2 tahun, penulis langsung melanjutkan studinya di Teknik Geomatika ITS sebagai mahasiswa S2. Penulis mengambil bidang keahlian Geodinamika, dengan Judul Tesis “Monitoring Perubahan Permukaan Tanah Di Kawasan Lumpur Sidoarjo Dan Sekitarnya Menggunakan Metode PS-InSAR Dengan Data Sentinel-1 Pada Tahun 2017 - 2019”. Jika ingin menghubungi penulis dapat menghubungi Saiyidinal.fikri@gmail.com.