

**ANALISIS DEFORMASI PERMUKAAN DAN PREDIKSI ALIRAN LAVA
DI GUNUNG TANGKUBAN PARAHU AKIBAT AKTIVITAS ERUPSI
TAHUN 2019 BERDASARKAN DATA PENGAMATAN
PERIODE 2019 - 2023**

(SKRIPSI)

Oleh

**TAUFIK RIYANSA
NPM 2015071063**



**JURUSAN TEKNIK GEODESI DAN GEOMATIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**ANALISIS DEFORMASI PERMUKAAN DAN PREDIKSI ALIRAN LAVA
DI GUNUNG TANGKUBAN PARAHU AKIBAT AKTIVITAS ERUPSI
TAHUN 2019 BERDASARKAN DATA PENGAMATAN
PERIODE 2019 - 2023**

Oleh

TAUFIK RIYANSA

SKRIPSI

**Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK GEODESI DAN GEOMATIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS DEFORMASI PERMUKAAN DAN PREDIKSI ALIRAN LAVA DI GUNUNG TANGKUBAN PARAHU AKIBAT AKTIVITAS ERUPSI TAHUN 2019 BERDASARKAN DATA PENGAMATAN PERIODE 2019 - 2023

Oleh

TAUFIK RIYANSA

Gunung Tangkuban Parahu merupakan gunung api aktif yang terletak di Jawa Barat dan telah mengalami aktivitas erupsi sejak tahun 1829, dengan erupsi terakhir tercatat pada 9 Agustus 2019. Aktivitas vulkanik gunung ini berpotensi menimbulkan bencana, sehingga diperlukan pemantauan dan mitigasi yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis deformasi permukaan Gunung Tangkuban Parahu menggunakan metode *Persistent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar* (PS-InSAR) dan menentukan jalur aliran lava Gunung Tangkuban Parahu menggunakan metode *Steepest Slope* dengan memanfaatkan data *Digital Elevation Model* (DEM).

Metode PS-InSAR digunakan untuk mengidentifikasi pergeseran permukaan Gunung Tangkuban Parahu, sementara metode *Steepest Slope* digunakan untuk mengidentifikasi wilayah yang berpotensi terdampak oleh aliran lava. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Citra Sentinel-1A dengan 20 pasang citra satelit dan data *Digital Elevation Model* (DEM).

Hasil menunjukkan bahwa Gunung Tangkuban Parahu mayoritas mengalami *deflasi* dengan *mean velocity* atau rata-rata laju deformasi Citra Sentinel-1A arah perekaman *Ascending* sebesar $-4,59$ mm/tahun, sedangkan *mean velocity* atau rata-rata laju deformasi Citra Sentinel-1A arah perekaman *Descending* sebesar $-3,86$ mm/tahun dan hasil prediksi aliran lava didapatkan sebaran jalur aliran lava pada wilayah Gunung Tangkuban Parahu yang berpotensi teraliri lava terdapat 3 Kawasan Rawan Bencana. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi deformasi permukaan di Gunung Tangkuban Parahu dan memberikan informasi wilayah yang terdampak oleh aliran lava di Gunung Tangkuban Parahu.

Kata kunci: Gunung Tangkuban Parahu, Deformasi, PS-INSAR, Prediksi Aliran lava, DEM, *Steepest Slope*

ABSTRACT

ANALYSIS OF SURFACE DEFORMATION AND LAVA FLOW PREDICTION AT MOUNT TANGKUBAN PARAHU FOLLOWING THE 2019 ERUPTION BASED ON OBSERVATIONAL DATA FROM THE PERIOD 2019 - 2023

By

TAUFIK RIYANSA

Mount Tangkuban Parahu is an active volcano located in West Java that has volcano has experienced eruptive activity since 1829, with the last eruption occurring on 9 August 2019. The volcanic activity of this mountain has the potential to cause disasters, so effective monitoring and mitigation are needed. This study aims to analyze the surface deformation of Mount Tangkuban Parahu using the Persistent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) method and determine the lava flow path of Mount Tangkuban Parahu using the Steepest Slope method by utilising Digital Elevation Model (DEM). The PS-InSAR method is used to identify the surface displacement of Mount Tangkuban Parahu, while the Steepest Slope method is used to identify areas potentially affected by lava flows. The data used in this study included Sentinel-1A imagery with 20 pairs of satellite imagery and Digital Elevation Model (DEM). The results showed that Mount Tangkuban Parahu was mostly deflationary, with the mean velocity derived from Sentinel-1A Ascending imagery measured at $-4,59$ mm/year. Conversely, the Descending direction shows a deformation rate of $-3,86$ mm/year and the results of lava flow prediction obtained the distribution of lava flow paths in the Tangkuban Parahu Mountain area which has the potential to be flowed by lava there are 3 Disaster Prone Areas. The results of this study are expected to provide information on surface deformation at Mount Tangkuban Parahu and identify areas affected by lava flows in the region.

Keywords: Tangkuban Parahu Volcano, Deformation, PS-InSAR, Lava Flow Prediction, DEM, Steepest Slope

HALAMAN PERSETUJUAN

Judul Skripsi : ANALISIS DEFORMASI PERMUKAAN DAN
PREDIKSI ALIRAN LAVA DI GUNUNG
TANGKUBAN PARAHU AKIBAT AKTIVITAS
ERUPSI TAHUN 2019 BERDASARKAN DATA
PENGAMATAN PERIODE 2019 - 2023

Nama Mahasiswa : Taufik Riyansa

NPM : 2015071063

Program Studi : S1 Teknik Geodesi

Jurusan : Teknik Geodesi dan Geomatika

Fakultas : Teknik



Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Fajriyanto, S.T., M.T
NIP. 197203022006041002

Erlan Sumanjaya, S.Si., M.Sc
NIP. 199501052023211013

2. Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika

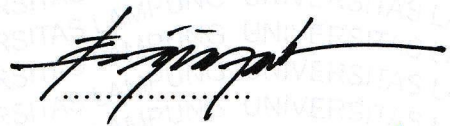
Ir. Fauzan Murdapa, M.T., IPM
NIP. 196410121992031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

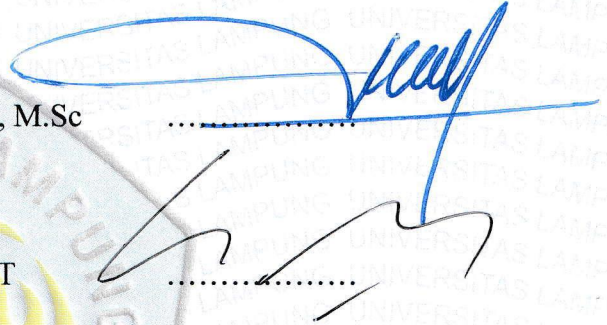
Ketua

: Dr. Fajriyanto, S.T., M.T



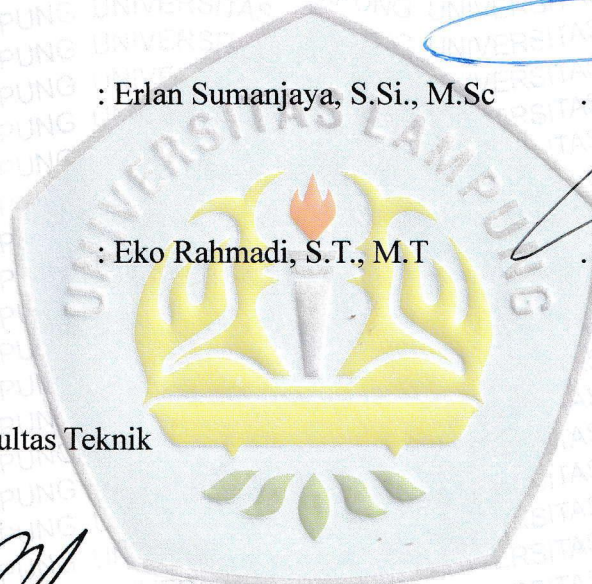
Sekretaris

: Erlan Sumanjaya, S.Si., M.Sc

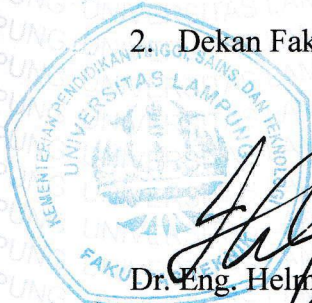


Anggota

: Eko Rahmadi, S.T., M.T



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc

NIP. 19750928 2001121002

Tanggal Lulus Ujian Akhir : 13 Juni 2025

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya Taufik Riyansa, NPM 2015071063, dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam skripsi yang berjudul “Analisis Deformasi Permukaan Dan Prediksi Aliran Lava Di Gunung Tangkuban Parahu Akibat Aktivitas Erupsi Tahun 2019 Berdasarkan Data Pengamatan Periode 2019 - 2023” adalah hasil karya saya yang dibimbing oleh Dosen Pembimbing kesatu yaitu Dr. Fajriyanto, S.T., M.T dan Dosen Pembimbing kedua yaitu Erlan Sumanjaya, S.Si., M.Sc berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah penulis dapatkan, karya ilmiah yang berisi material yang dibuat sendiri dengan hasil dari rujukan beberapa sumber lain (buku, jurnal dan lain-lain) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil plagiat karya orang lain.

Demikian pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, 13 Juni 2025

Yang membuat pernyataan



Taufik Riyansa

NPM. 2015071063

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung pada tanggal 14 Januari 2002, sebagai anak Tunggal dari bapak Sartono dan Ibu Suhar Yanti. Penulis berdomisili di Kecamatan Natar, Kabupaten Lampung Selatan. Jenjang akademis penulis dimulai dengan menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Branti Raya pada tahun 2014, Penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Natar dan lulus tahun 2017. kemudian penulis menyelesaikan Pendidikan di SMAN 1 Natar dengan jurusan Ilmu Pengetahuan Alam dan lulus pada tahun 2020. Pada tahun 2020, penulis terdaftar sebagai mahasiswa program studi S1 Teknik Geodesi di Fakultas Teknik, Universitas Lampung, selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam organisasi internal kampus seperti UKM Penelitian Unila pada tahun 2022-2023 dan menjadi anggota Departemen Pendidikan Himpunan Mahasiswa Teknik Geodesi (HIMAGES) FT Unila pada tahun 2022.

Selain organisasi penulis juga pernah mengikuti *Sharing Session Online* pada Calon Mahasiswa Lampung sebagai pemateri pada tahun 2021 dan Proyek pembelajaran antar budaya antara *Nanjing Normal University* (NNU), Rumah Inggris,, C.Etindo dan UKM Penelitian pada tahun 2022. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada bulan Juli-Agustus 2023 selama 40 hari di Desa Pardasuka Kecamatan Kota Agung Pusat. Setelah menjalankan KKN penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. Sriwijaya Bara Priharum selama 90 hari pada bulan Agustus-November 2023. Setelah melaksanakan Kerja Praktik, penulis mengerjakan skripsi dengan judul “Analisis Deformasi Permukaan Dan Prediksi Aliran Lava Di Gunung Tangkuban Parahu Akibat Aktivitas Erupsi Tahun 2019 Berdasarkan Data Pengamatan Periode 2019 - 2023” .

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil' alamin

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam. Berkat rahmat dan karunia-Nya, serta doa dan dukungan dari orang-orang tercinta, akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan. Dengan penuh rasa syukur dan kebahagiaan, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

Kepada dua sosok luar biasa dalam hidup penulis, Ibu Suhar Yanti dan Paman Adi Purnomo. Dengan penuh rasa hormat dan terima kasih, penulis mengakui bahwa tanpa dukungan, pengorbanan, serta doa-doa tulus yang senantiasa terucap, penulis tidak akan mencapai tahap ini. Segala nasihat dan bimbingan yang telah diberikan menjadi pijakan utama dalam perjalanan akademik penulis. Penulis akan selalu bersyukur atas keberadaan Ibu dan Paman sebagai orang tua yang senantiasa membimbing dan menyertai setiap langkah penulis.

Kepada Bapak/Ibu Dosen yang telah memberikan pemahaman mendalam mengenai ilmu pengetahuan serta membimbing penulis dalam mengembangkan pola pikir dan wawasan yang lebih luas, penulis sampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya. Selain itu, penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan dari Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Angkatan 2020 atas semangat, dukungan, serta motivasi positif yang telah diberikan selama perjalanan akademik ini.

MOTTO

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar”

(Qr. Ar – Ruum : 60)

“Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar. Keberhasilan adalah kepunyaan mereka yang senantiasa berusaha”

(Prof. Dr. Ing. Ir. H. Bacharuddin Jusuf Habibie, FREng.)

*“Tidak ada mimpi yang gagal, yang ada hanyalah mimpi yang tertunda.
Cuman sekiranya kalau teman-teman merasa gagal dalam mencapai mimpi,
Jangan khawatir, mimpi-mimpi lain bisa diciptakan”*

(Windah Basudara)

"Tekun berusaha, tulus berdoa, bersyukur setiap langkah."

(Taufik Riyansa)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam, yang telah memberikan rahmat-Nya berupa kesehatan, kesempatan, dan pengetahuan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik yang berjudul **“Analisis Deformasi Permukaan Dan Prediksi Aliran Lava Di Gunung Tangkuban Parahu Akibat Aktivitas Erupsi Tahun 2019 Berdasarkan Data Pengamatan Periode 2019 - 2023”**. Skripsi ini disusun untuk melengkapi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik bagi mahasiswa Program Studi S1 Teknik Geodesi Universitas Lampung.

Dalam proses penulisan dan penyusunan skripsi ini, tidak terlepas dari dukungan banyak pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Fauzan Murdapa M.T., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Romi Fadly, S.T., M.Eng. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Program Studi S1 Teknik Geodesi, Universitas Lampung.
4. Ibu Rahma Anisa, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Bapak Dr. Fajriyanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan arahan dan bantuan dalam penyusunan Skripsi ini.
6. Bapak Erlan Sumanjaya, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan bantuan dalam penyusunan Skripsi ini.
7. Bapak Eko Rahmadi, S.T., M.T.. selaku Dosen Penguji, yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun dalam penyusunan Skripsi ini.

8. Seluruh Dosen, Staf, dan karyawan Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan.
9. Ibu Suhar Yanti dan Paman Adi Purnomo yang telah memberikan dukungan materil dan moril.
10. Rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika UNILA Angkatan 2020 yang telah memberikan dukungan dan semangat bagi penulis.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan dukungan dalam proses penyelesaian Skripsi ini, dari awal hingga akhir. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam Skripsi ini, dan dengan besar hati menerima segala masukan, saran, serta kritik yang sifatnya membangun dan dapat memotivasi. Semoga Skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya masyarakat, mahasiswa, dan universitas.

Bandar Lampung, 13 Juni 2025

Taufik Riyansa

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Kerangka Pemikiran.....	6
1.7 Hipotesis.....	7
II. LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Penelitian Terdahulu.....	8
2.2 Gambaran Umum Gunung Tangkuban Parahu.....	11
2.3 Bencana Erupsi.....	11
2.4 Deformasi.....	13
2.5 Kajian Geologi.....	14
2.6 Radar (<i>Radio Detection and Ranging</i>).....	15
2.7 SAR (<i>Synthetic Aperture Radar</i>).....	16
2.8 INSAR (<i>Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>).....	17
2.8.1 <i>Interferogram</i>	19
2.8.2 Koregistrasi Citra SAR.....	20
2.8.3 Koherensi Citra SAR.....	21
2.9 PS-InSAR (<i>Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>).....	21
2.10 SIG (Sistem Informasi Geografis).....	23
2.11 Kawasan Rawan Bencana Gunung Api (KRB).....	23
2.12 <i>Digital Elevation Model (DEM)</i>	25
2.13 Metode <i>Steepest Slope</i>	26
2.13.1 <i>Flow Direction</i>	27
2.13.2 <i>Flow Accumulation</i>	28

III. METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Lokasi Penelitian	29
3.2 Data yang digunakan	30
3.3 Peralatan	32
3.3.1 Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	32
3.3.2 Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	32
3.4 Metodologi Penelitian	33
3.4.1 Tahapan Penelitian	33
3.4.2 Tahapan Pengolahan Data PS-InSAR	36
3.4.3 Tahapan Pengolahan Prediksi Aliran Lava	44
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Hasil Pengolahan Data SAR	47
4.1.1 <i>Baseline Plot</i>	47
4.1.2 <i>Reflectivity Map</i>	50
4.1.3 <i>Interferogram</i>	52
4.1.4 Citra <i>Interferogram</i> Setelah <i>Unwrapping</i>	54
4.1.5 Koherensi Citra SAR	56
4.1.6 Analisis <i>Atmospheric Phase Screen (APS) Estimation</i>	57
4.1.7 <i>Scatter Plot</i>	62
4.1.8 <i>Time Series Module</i>	63
4.1.9 Rata-rata Laju Deformasi (<i>Mean Velocity</i>)	65
4.1.10 Kondisi Geologi Gunung Tangkuban Parahu	67
4.1.11 Geomorfologi Gunung Tangkuban Parahu	69
4.1.12 Keterkaitan Geologi dan Geomorfologi terhadap Laju Deformasi	70
4.2 Hasil Prediksi Aliran Lava	72
4.2.1 Hasil <i>Fill</i>	72
4.2.2 Hasil <i>Flow Direction</i>	73
4.2.3 Hasil <i>Flow Accumulation</i>	75
4.2.4 Hasil Fungsi <i>Conditional</i>	76
4.2.5 Hasil Konversi <i>Raster to Vector</i>	77
4.2.6 Hasil Analisis Prediksi Aliran Lava Desa Terdampak	78
V. PENUTUP	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN A	87
LAMPIRAN B	121

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skema Hubungan Antara Perpindahan dan Pergeseran Fase Sinyal.....	17
2. Skema Prinsip Kerja <i>Interferogram</i>	20
3. Geometri PS-InSAR.....	22
4. Algoritma metode <i>Steepest Slope</i>	26
5. Menentukan arah mengalir melalui setiap piksel.....	27
6. Akumulasi air menurun ke setiap sel berdasarkan arah aliran	28
7. Peta Lokasi Penelitian	29
8. Diagram Alir Penelitian.....	33
9. Diagram Alir Pengolahan PS-INSAR	36
10. Lanjutan Diagram Alir Pengolahan PS-INSAR.....	37
11. <i>Dataset Selection</i>	38
12. SLC Data <i>Processing</i>	39
13. <i>Site Processing</i>	40
14. Tahapan Pengolahan Prediksi Aliran Lava.....	44
15. <i>Baseline</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	48
16. <i>Baseline</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	48
17. <i>Reflectivity Map</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	51
18. <i>Reflectivity Map</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	51
19. <i>Sample Interferogram</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	53
20. <i>Sample Interferogram</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	53
21. <i>Sample Unwrapping</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	55
22. <i>Sample Unwrapping</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	55
23. <i>Sample</i> Koherensi Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	56
24. <i>Sample</i> Koherensi Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	57
25. PSC Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	58

26. PSC Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	59
27. <i>Histogram Integrated Residual Height</i> dan <i>Velocity</i> Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	60
28. <i>Histogram Integrated Residual Height</i> dan <i>Velocity</i> Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	60
29. Koherensi <i>Temporal</i> PSC sebelum <i>APS Removal</i> dan Sesudah <i>APS Removal</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	61
30. Koherensi <i>Temporal</i> PSC sebelum <i>APS Removal</i> dan Sesudah <i>APS Removal</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	61
31. <i>Scatter Plot</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	62
32. <i>Scatter Plot</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	63
33. <i>Time Series Module</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	64
34. <i>Time Series Module</i> Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	64
35. Peta Laju Deformasi Gunung Arah Perekaman <i>Ascending</i>	65
36. Peta Laju Deformasi Gunung Arah Perekaman <i>Descending</i>	66
37. Peta Geologi Gunung Tangkuban Parahu	67
38. Peta Geomorfologi Gunung Tangkuban Parahu.....	69
39. Peta <i>Fill</i>	72
40. Peta <i>Flow Direction</i>	73
41. Peta <i>Flow Accumulation</i>	75
42. Peta Fungsi <i>Conditional</i>	76
43. Peta Aliran Lava.....	77
44. Peta Prediksi Aliran Lava Gunung Tangkuban Parahu	78

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu.....	8
2. Panjang Gelombang Radar dan Frekuensinya	15
3. Data Sentinel-1A.....	30
4. Estimasi besar <i>Perpendicular</i> dan <i>Temporal Baseline</i> mengacu pada Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Ascending</i>	49
5. Estimasi besar <i>Perpendicular</i> dan <i>Temporal Baseline</i> mengacu pada Citra Sentinel-1A Arah Perekaman <i>Descending</i>	50
6. <i>Flow Direction</i>	74
7. Desa yang terdampak dan luasan desa yang terdampak	79

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gunung Tangkuban Parahu merupakan gunung berapi aktif yang terletak di Kabupaten Bandung Barat dan Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Puncak Gunung Tangkuban Parahu berada di koordinat $6^{\circ}45'34''$ Lintang Selatan dan $107^{\circ}36'56''$ Bujur Timur. Sepanjang Sejarahnya, aktivitas yang terjadi di Gunung Tangkuban Parahu telah mengakibatkan terbentuknya 13 kawah. Tiga kawah diantaranya yang populer dijadikan destinasi wisata, yaitu Kawah Ratu, Kawah Upas, dan Kawah Domas. Sementara rincian lengkap 13 kawah tersebut sebagai berikut: Kawah Upas meliputi Kawah Upas (termuda), Kawah Upas (muda), dan Kawah Upas (tua). Kawah Ratu juga memiliki Kawah Ratu (1920), Kawah Ratu (muda), dan Kawah Ratu (tua). Kemudian ada Kawah baru, Kawah Pangguyanganbadak, Kawah Badak, Kawah Ecoma, Kawah Jurig, Kawah Siluman, dan Kawah Domas (Edison, 2021).

Gunung Tangkuban Parahu telah meletus sejak tahun 1829 sampai dengan 2019. Letusan terbesar terjadi pada tahun 1829 dan merupakan letusan pertama di Gunung Tangkuban Parahu, yang menyebabkan letusan abu dan batu dari Kawah Ratu dan Kawah Domas. Pada tahun 1846 telah terjadi erupsi yang mengakibatkan peningkatan kegiatan yang menunjukkan bahwa Gunung sedang dalam keadaan yang lebih aktif. Tahun 1896 telah terjadi erupsi yang mengakibatkan terbentuknya fumarol baru yang terletak di sebelah utara Kawah Badak. Tahun 1900 telah terjadi erupsi yang menyebabkan keluarnya uap dari Kawah Ratu, erupsi ini menunjukkan bahwa Gunung dalam kondisi aktif. Tahun 1910 telah terjadi erupsi di kawah ratu yang menyebabkan kolom asap membumbung setinggi 2 km di atas dinding kawah. Tahun 1926 telah

terjadi erupsi freatik di kawah ratu yang membentuk lubang ecoma, tahun 1935 telah terjadi erupsi yang menyebabkan adanya lapangan fumarol baru yang disebut Kawah Badak yang berjarak 150 m ke arah selatan barat daya dari Kawah Ratu. tahun 1952, 1957, 1961, 1969 dan 1971 telah terjadi erupsi freatik yang didahului letusan lemah yang menghasilkan abu. Tahun 1983 telah terjadi erupsi yang menyebabkan awan abu membumbung setinggi 150 m di atas kawah ratu. Tahun 1992 telah terjadi erupsi freatik kecil yang menyebabkan terjadinya peningkatan kegiatan kuat dengan gempa *seismic* dangkal. Tahun 1994 telah terjadi erupsi freatik di bawah kawah baru. Tahun 1999 sampai dengan 2005 telah terjadi erupsi yang menyebabkan peningkatan aktivitas. Tahun 2013 telah terjadi 11 kali erupsi freatik dalam kurun waktu 4 hari, dari tanggal 5 Oktober 2013 sampai dengan 10 Oktober 2013 yang menyebabkan peningkatan aktivitas pada bulan Februari, Maret, dan Oktober, dan pada tahun 2019 telah terjadi erupsi dengan fase letusan dimulai pada 26 Juli 2019 telah terjadi letusan di Kawah Ratu dengan ketinggian kolom lumpur bercampur abu setinggi 200 meter dari dasar kawah, berwarna abu tua. Aktivitas erupsi terus-menerus dan berlanjut terpantau hingga tanggal 9 Agustus 2019 (PVMBG, 2024).

Berdasarkan aktivitas Gunung Tangkuban Parahu saat ini, kemungkinan terjadinya potensi bencana di masa yang akan datang. Untuk mengantisipasi bahaya yang diakibatkan oleh erupsi Gunung Tangkuban Parahu, maka perlu dilakukan pemantauan secara terus menerus (Febriyanti dan Anjasmara, 2017) dan mitigasi bencana . Pemantaun secara terus-menerus dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti menggunakan GPS (*Global Positioning System*) (Muvid, 2018), *seismometer* (Wulandari, 2010) dan data survei geofisika lainnya (Navalia dkk., 2023) untuk membantu mendeteksi dinamika aktivitas gunung berapi. Selain itu, dapat menggunakan teknologi satelit penginderaan jauh aktif yang menyediakan cakupan global untuk pemantauan gunung berapi.(Rivera dkk., 2016).

Kemampuan sensor penginderaan jauh dalam merekam kejadian sebelum dan sesudah terjadinya erupsi dapat digunakan untuk mengetahui historis

perubahan yang terjadi pada saat sebelum erupsi dan sesudah erupsi yang disimpan dalam bentuk citra (Nugraini dan Safitri, 2022). Sensor penginderaan jauh dapat mengetahui objek dipermukaan bumi berdasarkan saluran gelombang yang digunakan (Syahputri dkk., 2021). Dalam pemantauan deformasi gunung gelombang yang digunakan ialah gelombang mikro (Fitri Febriyanti, 2017). Gelombang mikro memiliki keunggulan dapat merekam daerah yang memiliki gangguan atmosferik seperti tutupan awan, kabut, dan ion-ion yang ada di atmosfer yang dapat berupa *noise* pada saat pengolahan data (Huda dan Fardha, 2018). Salah satu citra penginderaan jauh yang menggunakan saluran gelombang mikro adalah citra *radar* (Crosetto et al, 2016). Citra *radar* dapat digunakan dalam pemantauan deformasi gunung (Peltier dkk., 2010). Metode yang biasa digunakan dalam pengolahan citra *radar* yaitu *Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR)*, *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)*, *Multi Temporal InSAR (MT-InSAR)* yang meliputi, *Persistent Scatterers InSAR (PS-InSAR)* dan *Small Baseline Subset (SBAS)* (Salsabil dkk., 2019).

Selain dilakukan pemantauan secara terus-menerus dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh, dapat juga dilakukan upaya mitigasi bencana yang bertujuan untuk mengurangi risiko dan dampak bencana yang mungkin terjadi akibat aktivitas vulkanik Gunung Tangkuban Parahu. Sebagai gunung api aktif di Indonesia, Gunung Tangkuban Parahu memiliki potensi bahaya seperti letusan, lontaran material vulkanik, hujan abu, gas beracun, aliran lava, dan lahar yang dapat membahayakan masyarakat di sekitarnya. Terdapat berbagai langkah yang dapat dilakukan dalam mitigasi bencana, salah satunya adalah melakukan prediksi aliran lava di Gunung Tangkuban Parahu.

Penelitian ini menggunakan metode *PS-InSAR* dan prediksi aliran lava, *PS-InSAR* merupakan metode pemrosesan citra *radar* yang menggunakan teknik *Persistent Scatterer interferometry (PSI)* (Ferretti et al, 1999), yang bertujuan untuk mengidentifikasi pergerakan atau pergeseran permukaan pada suatu area secara *time series* (Darmawan dan Karyanto, 2021). *PS-InSAR* memiliki

kelebihan dalam hal pengolahan data yang mampu mengurangi efek dekorelasi (Welch and Schmidt, 2017). Sedangkan prediksi aliran lava merupakan proses untuk memperkirakan jalur dan area yang berpotensi terdampak oleh aliran lava saat terjadi letusan gunung api. Proses ini dilakukan dengan menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) dan melakukan simulasi jalur aliran lahar berdasarkan nilai kemiringan terbesar atau metode kemiringan paling curam atau metode *Steepest Slope*.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui deformasi permukaan Gunung Tangkuban Parahu dengan menggunakan metode *PS-InSAR* dan prediksi aliran lava di Gunung Tangkuban Parahu. Penelitian ini diharapkan memperoleh informasi mengenai deformasi Gunung Tangkuban Parahu melalui analisis citra *Sentinel-1A* dengan akuisisi citra dilakukan pada periode 2019 hingga 2023 dan memperoleh informasi mengenai prediksi aliran lava melalui analisis data *Digital Terrain Model* (DEM), melakukan simulasi jalur aliran lava yang terdampak di wilayah Gunung Tangkuban Parahu.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana nilai laju deformasi pada permukaan Gunung Tangkuban Parahu dengan metode *PS-InSAR* periode tahun 2019 hingga 2023.
- b. Bagaimana prediksi aliran lava yang terdampak di wilayah Gunung Tangkuban Parahu.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Mendapatkan nilai laju deformasi pada permukaan Gunung Tangkuban Parahu dengan metode *PS-InSAR* periode tahun 2019 hingga 2023.
- b. Mendapatkan hasil prediksi aliran lava yang terdampak di wilayah Gunung Tangkuban Parahu.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini adalah :

- a. Bagi mahasiswa penelitian ini dapat memberikan pengetahuan ilmu dan mengaplikasikan teori yang didapat selama perkuliahan.
- b. Bagi pengembangan ilmu penelitian ini dapat memberikan informasi dalam pemantaun metode *PS-InSAR* secara terus menerus terhadap perubahan deformasi permukaan Gunung Tangkuban Parahu dan memberikan informasi dalam mitigasi bencana di Gunung Tangkuban Parahu dengan melakukan prediksi aliran lava.
- c. Bagi pemangku kepentingan atau pemerintah penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai karakteristik Gunung Tangkuban Parahu seperti keadaan permukaan Gunung Tangkuban Parahu.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batas masalah pada penelitian ini, dengan garis besar kajian sebagai berikut :

- a. Penelitian ini memiliki lingkup wilayah di Kabupaten Bandung Barat dan Kabupaten Subang.
- b. Batasan metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode *PS-InSAR* dan prediksi aliran lava menggunakan metode *Steepest Slope*.
- c. Penelitian ini hanya berfokus untuk mengkaji laju deformasi Gunung Tangkuban Parahu terhadap Erupsi dan prediksi aliran lava di wilayah Gunung Tangkuban Parahu.
- d. Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan Citra Sentinel-1A arah Perekaman *Ascending*, Citra Sentinel-1A arah perekaman *Descending*, DEM SRTM 30 Meter.
- e. Batasan sumber daya yang tersedia untuk penelitian, seperti operasional dan periode data penelitian dari tahun 2019 sampai dengan 2023.

1.6 Kerangka Pemikiran

Berdasarkan aktivitas Gunung Tangkuban Parahu saat ini, kemungkinan terjadinya potensi bencana di masa yang akan datang. Untuk mengantisipasi bahaya yang diakibatkan oleh erupsi Gunung Tangkuban Parahu, maka perlu dilakukan pemantauan secara terus-menerus dan Mitigasi Bencana, pemantauan secara terus-menerus dapat dilakukan dengan menggunakan metode *PS-InSAR*.

Metode *PS-InSAR* bertujuan untuk mengidentifikasi pergerakan atau pergeseran permukaan pada suatu area secara *time series*, Metode *PS-InSAR* diterapkan dengan menghitung perbedaan *interferogram* dari semua akuisisi citra SAR yang memiliki areal sama berdasarkan intensitas waktu yang berbeda. *PS-InSAR* memiliki titik hamburan yang relatif stabil untuk analisis deformasi tanpa *multilock* pemrosesan, yang dapat mempertahankan koherensi tinggi untuk waktu yang lama. *PS-INSAR* digunakan untuk mendapatkan nilai besaran deformasi pada permukaan Gunung Tangkuban Parahu, sehingga dapat memberikan informasi mengenai pemantauan deformasi permukaan Gunung Tangkuban Parahu.

Selain dilakukan pemantauan secara terus menerus juga dapat dilakukan Mitigasi bencana. Mitigasi bencana bertujuan untuk mengurangi risiko dan dampak yang dapat timbul akibat aktivitas vulkanik Gunung Tangkuban Parahu. Sebagai salah satu gunung berapi aktif di Indonesia, Gunung Tangkuban Parahu memiliki berbagai potensi ancaman, seperti erupsi, lontaran material vulkanik, hujan abu, gas beracun, aliran lava, serta lahar yang berpotensi membahayakan masyarakat sekitar. Beragam upaya dapat dilakukan sebagai langkah mitigasi bencana, salah satunya adalah dengan melakukan prediksi jalur aliran lava di wilayah Gunung Tangkuban Parahu.

1.7 Hipotesis

Hipotesis penelitian ini adalah bahwa aktivitas erupsi akan mengakibatkan perubahan deformasi pada permukaan di sekitar Gunung Tangkuban Parahu. Peneliti berasumsi bahwa menggunakan teknik pemantauan seperti *PS-INSAR* dapat memberikan informasi mengenai pergerakan permukaan Gunung Tangkuban Parahu dan hasil prediksi aliran lava yang dihasilkan dari data DEM dan analisis hidrologi dapat memetakan jalur aliran lava secara akurat. Integrasi data deformasi dengan metode *PS-INSAR* dan simulasi aliran lava dapat memperkuat perencanaan mitigasi bencana, khususnya dalam menentukan zona rawan bencana di sekitar Gunung Tangkuban Parahu.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini menggunakan beberapa kajian dari beberapa penelitian yang berkaitan dengan Kajian Deformasi Permukaan Akibat Aktivitas Erupsi Di Gunung Tangkuban Parahu tahun 2019 sampai dengan 2023. Beberapa penelitian terdahulu tersebut sebagai berikut :

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
1.	Rani Fitri Febriyanti (2017)	Analisis Deformasi Permukaan Gunung Raung Menggunakan Teknologi <i>Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (Dinsar)</i> Berdasarkan Erupsi 28 Juni 2015	1. Membandingkan metode <i>two-pass</i> dan <i>three-pass</i> untuk deformasi 2. Mengamati deformasi (<i>inflasi</i> atau <i>deflasi</i>) 3. Mendapatkan besaran nilai deformasi	Metode DInSAR	1. Penerapan metode <i>two-pass</i> dan <i>three-pass</i> pada deformasi 2. Besaran deformasi metode <i>two-pass</i> 3. Besaran deformasi metode <i>three-pass</i> 4. Hasil metode <i>two-pass</i> dan <i>three-pass</i>

Lanjutan tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
2.	Lysa Dora Ayu Nugraini dan Dika Ayu Safitri (2022)	Analisis Deformasi Gunung Agung Berdasarkan Data Citra SAR <i>Sentinel-1A</i> dan Metode <i>DInSAR</i>	Mengetahui deformasi permukaan Gunung Agung	Metode <i>DInSAR</i>	1. Deformasi Sebelum letusan Gunung 2. Nilai deformasi bervariasi 3. Rata-rata <i>subsidence</i>
3.	I Gede Boy Darmawan dan Karyanto (2021)	Pemanfaatan <i>Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar</i> (PSInSAR) Untuk Mengidentifikasi Laju Deformasi Permukaan di Lapangan Panas Bumi Ulubelu	mengidentifikasi kasi potensi laju deformasi permukaan memanfaatkan metode <i>Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar</i> (PSInSAR) di lapangan panas bumi Ulubelu	Metode <i>PS-InSAR</i>	1. Laju deformasi 2. Pola deformasi
4.	Bella Esti Ajeng Syahputri, Ira Mutiara Anjasmara, Amien Widodo (2021)	Deformasi Permukaan pada Manifestasi Gunung Lumpur di Wilayah Cekungan Jawa Timur dari Pengolahan Data SAR menggunakan Metode <i>PS-InSAR</i> .	Menganalisa pola dan nilai deformasi muka tanah akibat manifestasi gunung lumpur di wilayah Cekungan Jawa Timur.	Metode <i>PS-InSAR</i>	1. <i>Plotting</i> dengan citra <i>ALOS PALSAR</i> 2. <i>Plotting</i> dengan citra <i>Sentinel-1A</i>

Lanjutan tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
5.	Anugrah Nurul Huda, Nur Muhamma d Fardha (2018)	<i>Monitoring Deformasi Gunung Sinabung Tahun 2018 Menggunakan Teknik Persistent Scatter Interferometry (PS-InSAR) dan Citra Sentinel-1</i>	1. Nilai laju deformasi 2. Persebaran <i>inflasi</i> dan <i>deflasi</i> 3. Uji peta laju deformasi	Metode <i>PS-InSAR</i>	1. Nilai laju deformasi Gunung Sinabung 2. Nilai sebaran <i>deflasi</i> dan <i>inflasi</i> 3. Uji hasil pengolahan <i>PS-InSAR</i>

Berdasarkan uraian tabel 1 penelitian terdahulu, terdapat perbedaan dari jenis data yang digunakan dan studi kasus penelitian. Penelitian yang dilakukan (Fitri Febriyanti, 2017) dan (Nugraini dan Safitri, 2022), terdapat perbedaan dalam metode yang digunakan dalam memantau deformasi gunung, akan tetapi tujuan penelitiannya sama dengan penelitian saat ini. Sedangkan untuk penelitian terdahulu (Darmawan dan Karyanto, 2021) menggunakan metode *PS-INSAR* sama seperti metode yang digunakan penelitian saat ini, Namun, tujuan dari penelitian ini berbeda, yaitu untuk mengidentifikasi potensi laju deformasi permukaan pada wilayah lapangan panas bumi Ulubelu. Sementara itu, penelitian sebelumnya difokuskan pada aspek yang berbeda (Syahputri dkk., 2021) menggunakan metode *PS-INSAR* sama seperti penelitian saat ini, akan tetapi terdapat perbedaan pada data yang digunakan menggunakan data ALOS PALSAR dan citra Sentinel-1A dengan tujuan menganalisis pola serta nilai deformasi permukaan tanah akibat aktivitas gunung lumpur di Cekungan Jawa Timur. Pada penelitian terdahulu (Huda dan Fardha, 2018) menggunakan metode *PS-INSAR* sama seperti penelitian saat ini, tetapi terdapat perbedaan dalam penggunaan data Citra *Sentinel-1A* dengan arah perekaman *ascending* polarisasi VV, pada penelitian saat ini menggunakan data Citra *Sentinel-1A* dengan arah perekaman *ascending* dan *descending* polarisasi VV+VH.

2.2 Gambaran Umum Gunung Tangkuban Parahu

Gunung Tangkuban Parahu termasuk dalam kategori gunung api aktif yang terletak di wilayah administratif Kabupaten Bandung Barat dan Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Gunung ini memiliki ketinggian mencapai 2.084 meter di atas permukaan laut. (Irawan dkk., 2023). Puncak Gunung Tangkuban Parahu berada di pada koordinat $6^{\circ}45'34''$ Lintang Selatan dan $107^{\circ}36'56''$ Bujur Timur. Sepanjang sejarah aktivitas vulkaniknya, Gunung Tangkuban Parahu telah membentuk sebanyak 13 kawah. Tiga di antaranya, yaitu Kawah Ratu, Kawah Upas, dan Kawah Domas, dikenal sebagai destinasi wisata yang populer. Adapun ketiga belas kawah tersebut terdiri atas beberapa bagian yang mencerminkan tahapan pembentukannya, yakni Kawah Upas (termuda, muda, dan tua), Kawah Ratu (termuda, muda, dan tua), serta Kawah Baru, Kawah Pangguyanganbadak, Kawah Badak, Kawah Ecoma, Kawah Jurig, Kawah Siluman, dan Kawah Domas (Edison, 2021).

Jika diamati dari arah Kota Bandung, morfologi Gunung Tangkuban Parahu menunjukkan bentuk khas yang menyerupai perahu terbalik. Ciri geomorfologis ini, selain menjadi daya tarik visual, turut menjadikan gunung ini sebagai salah satu destinasi wisata alam yang memiliki tingkat popularitas tinggi di Provinsi Jawa Barat, di mana para wisatawan dapat melakukan pendakian serta menikmati keindahan panorama pegunungan. Selain itu, pengunjung juga dapat menyaksikan kawah aktif yang mengeluarkan mata air panas serta lumpur panas, yang menjadi daya tarik utama kawasan Gunung Tangkuban Parahu (Sentosa dkk., 2018).

2.3 Bencana Erupsi

Erupsi gunung berapi merupakan fenomena geologis yang terjadi akibat adanya pergerakan atau aktivitas magma dari dalam litosfer menuju ke permukaan bumi. Letusan gunung berapi berpotensi menimbulkan berbagai jenis bencana geologis, antara lain aliran lahar, jatuhnya piroklastik, aliran dan

gelombang piroklastik, ledakan lateral, longsoran salju vulkanik, tsunami yang dipicu oleh aktivitas vulkanik, tanah longsor, serta banjir gas berbahaya.. Alasan dasar untuk mengevaluasi bencana vulkanik melibatkan skala, gaya, frekuensi letusan, dan kedekatan gunung berapi. Dampaknya bagi masyarakat adalah kematian dan keracunan gas (Pratama dkk., 2014).

Gunung Tangkuban Parahu telah mengalami erupsi sejak tahun 1829 hingga 2019, dengan letusan terbesar terjadi pada tahun 1829 yang melontarkan abu dan batu dari Kawah Ratu dan Kawah Domas. Aktivitas vulkanik terus berlangsung, seperti terbentuknya fumarol baru pada tahun 1896, keluarnya uap dari Kawah Ratu pada tahun 1900, serta letusan tahun 1910 yang menghasilkan kolom asap setinggi 2 km. Erupsi freatik terjadi pada berbagai tahun, termasuk 1926, 1935, 1952, 1957, 1961, 1969, dan 1971, yang umumnya diawali letusan lemah dan menghasilkan abu. Erupsi signifikan lainnya terjadi pada 1983, 1992, 1994, serta periode 1999–2005 yang menunjukkan peningkatan aktivitas. Pada 2013, terjadi 11 kali erupsi freatik dalam 4 hari, sementara letusan terakhir pada 26 Juli 2019 di Kawah Ratu menghasilkan kolom lumpur dan abu setinggi 200 meter, dengan aktivitas yang terus berlanjut hingga 9 Agustus 2019 (PVMBG, 2024).

Dampak dari erupsi ini dirasakan oleh berbagai pihak, terutama masyarakat dan pelaku usaha di sekitar Gunung Tangkuban Parahu. Penduduk setempat harus menghadapi gangguan aktivitas sehari-hari akibat abu vulkanik yang mengotori lingkungan dan berisiko bagi kesehatan, terutama bagi mereka yang memiliki gangguan pernapasan. Selain itu, sektor pariwisata mengalami kerugian karena penutupan sementara destinasi wisata yang menjadi sumber mata pencaharian bagi banyak pedagang, pemandu wisata, serta pengelola fasilitas di sekitar gunung. Erupsi ini juga memengaruhi pertanian di kawasan sekitarnya, karena material vulkanik yang jatuh ke lahan pertanian dapat merusak tanaman dan menurunkan hasil panen.

2.4 Deformasi

Deformasi permukaan gunung berapi merupakan perubahan morfologi atau struktur permukaan yang umumnya terjadi sebagai respons terhadap aktivitas vulkanik, baik sebelum maupun sesudah terjadinya erupsi (Wismaya dkk., 2016). Perubahan atau pergeseran permukaan pada gunung berapi dapat terjadi sebagai respons terhadap pergerakan material internal, seperti aliran magma maupun fluida hidrotermal atau magmatik, yang berlangsung di dalam sistem vulkanik (Benyamin dkk., 2013). Peningkatan deformasi pada permukaan gunung berapi sering kali menjadi indikator awal dari kemungkinan terjadinya erupsi vulkanik yang baru. Deformasi dapat terbagi menjadi dua jenis, yaitu inflasi dan deflasi. Inflasi merupakan peningkatan elevasi permukaan bumi akibat tekanan internal dari akumulasi magma dalam sistem magmatik gunung api. Sementara itu, deflasi adalah penurunan elevasi permukaan yang terjadi pasca erupsi, disebabkan oleh berkurangnya tekanan internal akibat keluarnya material vulkanik (Huda dan Fardha, 2018).

Pemantauan deformasi permukaan gunung berapi menjadi aspek penting dalam mitigasi bencana vulkanik. Berbagai teknologi digunakan untuk mengukur perubahan permukaan secara akurat, seperti PS InSAR. PS InSAR memanfaatkan citra radar satelit untuk memantau deformasi dalam skala luas. Dengan menggunakan PS-INSAR dalam menganalisis pola deformasi dalam jangka panjang, memahami dinamika aktivitas vulkanik, Serta berperan dalam memberikan peringatan dini kepada masyarakat guna meminimalkan potensi risiko bencana yang ditimbulkan oleh aktivitas erupsi gunung berapi.

Analisis deflasi dan inflasi melalui metode PS InSAR didasarkan pada nilai displacement. Deformasi dikategorikan sebagai inflasi jika nilai displacement bernilai positif, sedangkan deflasi terjadi apabila nilai displacement bernilai negatif. Penginderaan jauh tidak hanya dimanfaatkan untuk analisis deformasi dari displacement hasil citra radar, tetapi juga untuk mengetahui sebaran spasial deformasi yang terjadi, baik inflasi maupun deflasi. (Huda dan Fardha, 2018).

2.5 Kajian Geologi

Gunung Tangkuban Parahu termasuk dalam fase termuda dari evolusi sistem vulkanik Sunda–Tangkuban Parahu, yang ditandai oleh sejarah geologi yang panjang serta kompleksitas proses pembentukannya. Menurut Soetoyo dan Hadisantono pada tahun 1999 dalam (Yuniardi dkk., 2019), Membagi batuan penyusun Gunung Tangkuban Parahu dikelompokkan ke dalam tujuh satuan vulkanik utama berdasarkan urutan umur dari yang tertua hingga termuda yaitu Gunung Api Tersier, Gunung Api Pra Sunda, Gunung Api Sunda, Gunung Api Kandangapi, Gunung Dano, Bukitunggul – Manglayang dan kelompok Kerucut Tangkuban Parahu. Selain itu terdapat batuan sungai dan sedimen danau yang merupakan endapan batuan *non* vulkanik. Batuan vulkanik yang diduga berasal dari zaman Tersier tersingkap pada lereng bawah bagian barat daya dan lereng tengah di timur laut. Batuan ini membentuk morfologi bergelombang, Dengan demikian, wilayah tersebut tetap terbuka karena tidak mengalami pelapisan oleh endapan vulkanik dari periode yang lebih muda.

Stratigrafi kompleks Gunung Tangkuban Parahu menunjukkan bahwa aktivitas vulkaniknya telah berlangsung dalam beberapa tahap pembentukan. Proses erupsi yang berulang menyebabkan terbentuknya berbagai lapisan batuan dengan karakteristik yang berbeda, mencerminkan perubahan dalam dinamika magma serta kondisi lingkungan pada masa lalu. Material vulkanik yang dihasilkan mencakup aliran lava, endapan piroklastik, serta lahar yang tersebar di berbagai bagian gunung. Selain itu, keberadaan batuan non-vulkanik seperti sedimen sungai dan danau mengindikasikan bahwa pada suatu periode, aktivitas vulkanik mengalami penurunan, memungkinkan proses sedimentasi berlangsung (Yuniardi dkk., 2019).

Struktur geologi Gunung Tangkuban Parahu juga dipengaruhi oleh berbagai faktor tektonik yang berperan dalam pembentukan morfologi gunung ini. Aktivitas sesar dan rekahan di sekitar gunung memungkinkan pergerakan magma menuju permukaan, yang kemudian menghasilkan letusan dengan karakteristik berbeda pada setiap tahapnya.

2.6 Radar (*Radio Detection and Ranging*)

Radar (*radio detection and ranging*) merupakan suatu metode atau perangkat yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek di sekitarnya dengan memanfaatkan gelombang radio sebagai media penghantar (Bagnardi et al., 2013). Radar bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik, khususnya dalam spektrum gelombang radio dan mikro, untuk mendeteksi dan memetakan objek, yang kemudian dipantulkan kembali oleh objek di sekitarnya sebagai respons terhadap sinyal yang diterima tersebut dimanfaatkan untuk mendeteksi keberadaan dan karakteristik objek, sehingga, Sistem ini diklasifikasikan sebagai penginderaan jauh aktif karena memanfaatkan pemancaran sinyal sendiri. Panjang gelombang elektromagnetik secara signifikan memengaruhi kemampuan penetrasi terhadap objek di permukaan bumi; semakin panjang gelombangnya, semakin besar daya tembusnya. Klasifikasi panjang gelombang didasarkan pada pita frekuensi tertentu. Pemilihan panjang gelombang dalam sistem radar disesuaikan dengan tujuan dan karakteristik aplikasi yang direncanakan. Dalam kegiatan penginderaan jauh, radar dapat memanfaatkan satu atau lebih pita frekuensi. Radar beroperasi pada spektrum gelombang elektromagnetik dengan rentang frekuensi antara 300 MHz hingga 30 GHz (Yusrina dkk., 2019).

Tabel 2. Panjang Gelombang *Radar* dan Frekuensinya

<i>Band</i>	Panjang Gelombang (cm)	Frekuensi (MHz)
Ka	0,8 - 1,1	40.000 – 26.500
K	1,1 – 1,7	26.500 – 18.000
Ku	1,7 -2,4	18.000 – 12.500
X	2,4 – 3,8	12.500 – 8.000
C	3,8 -7,5	8.000 – 4.000
S	7,5 – 15,0	4.000 – 2.000
L	15,0 – 30,0	2.000 – 1.000
P	30,0 -100,0	1.000 - 300

2.7 SAR (*Synthetic Aperture Radar*)

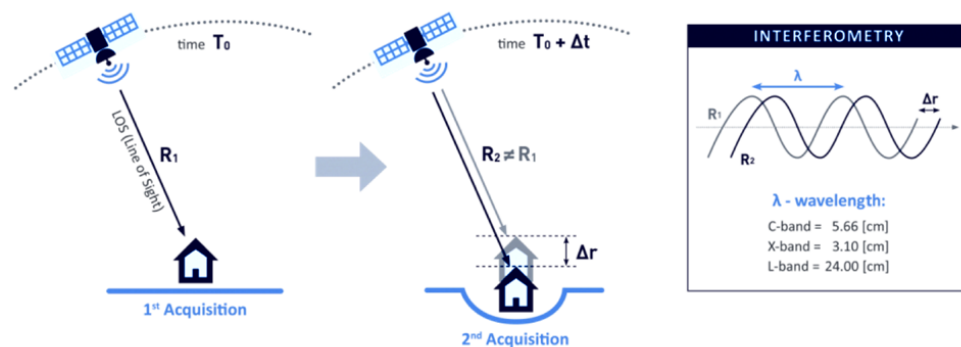
SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Merupakan sistem radar berbasis citra penginderaan jauh beresolusi tinggi yang memiliki kemampuan akuisisi data secara efektif baik pada siang maupun malam hari (Yusrina dkk., 2019). Hal ini disebabkan karena SAR memanfaatkan gelombang radio (mikro) untuk melakukan pengamatan terhadap permukaan bumi. Teknologi SAR dikembangkan sebagai alternatif untuk mengatasi keterbatasan yang terdapat pada sistem *Real Aperture Radar* (RAR).

Pencitraan SAR terdiri dari dua komponen utama, yaitu amplitudo dan fase. Amplitudo mengukur intensitas sinyal radar yang dipantulkan kembali ke satelit, yang mencerminkan variasi sifat reflektif permukaan dan menggambarkan elemen-elemen lanskap seperti jalan, pegunungan, bangunan, serta fitur permukaan lainnya (Sneed et al., 2013). Sementara itu, Komponen fase memiliki hubungan proporsional dengan jarak *Line of Sight* (LOS) antara permukaan bumi dan satelit (*range*), sehingga berfungsi untuk mendeteksi serta mengukur deformasi pada permukaan tanah.

Keunggulan dalam pengamatan permukaan bumi tanpa terpengaruh kondisi cuaca dan pencahayaan, SAR (*Synthetic Aperture Radar*) juga memiliki berbagai aplikasi di berbagai bidang. Dalam studi geologi dan mitigasi bencana, SAR digunakan untuk memantau pergerakan tanah, aktivitas vulkanik, serta pergeseran lempeng tektonik dengan metode *Interferometric SAR* (InSAR). Selain itu, dalam bidang lingkungan, SAR dimanfaatkan untuk pemantauan perubahan hutan, deteksi banjir, serta pengawasan garis pantai. Di sektor pertanian, SAR dapat digunakan untuk mengamati kelembaban tanah dan kondisi tanaman, yang berperan penting dalam perencanaan produksi pangan. Dengan kemampuan menghasilkan data resolusi tinggi dalam berbagai kondisi, SAR menjadi teknologi yang sangat andal dalam pemetaan, pengawasan, serta analisis perubahan permukaan bumi secara luas dan akurat (Sneed et al., 2013).

2.8 INSAR (*Interferometry Synthetic Aperture Radar*)

Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) adalah metode penginderaan jauh yang diterapkan untuk mengukur deformasi permukaan tanah dengan memanfaatkan informasi geometris yang terkandung dalam fase dari minimal dua citra SAR interferometri yang diambil pada area yang sama. (Raventós dkk., 2017).



Gambar 1. Skema Hubungan Antara Perpindahan dan Pergeseran Fase Sinyal

(Sumber : Raventós et al., 2017)

Prinsip kerja InSAR didasarkan pada perbandingan fase gelombang antara dua citra yang diperoleh dari area yang sama namun pada waktu yang berbeda. Pergerakan suatu titik objek akan menyebabkan perubahan jarak antara sensor dan titik tersebut, sehingga memengaruhi nilai fase yang direkam oleh sensor pada citra.

Persamaan yang dapat menunjukkan berbagai komponen fase yang diukur dengan interferometri SAR dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elev} + \Delta\varphi_{displ} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise} \dots \dots \dots (1)$$

1. $\Delta\varphi_{flat}$ adalah fase bumi datar yang merupakan kontribusi fase akibat kelengkungan bumi. Efek ini dapat dihilangkan dengan menggunakan koreksi informasi orbit.

$$\frac{4\pi B_n S}{\lambda R \tan \theta} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

B_n = *Baseline* normal (jarak antara dua posisi radar).

S = Jarak proyeksi.

λ = Panjang gelombang radar.

R = Jarak antara radar dan target.

θ = Sudut insidensi radar.

2. $\Delta\varphi_{elevation}$ adalah kontribusi topografi pada fase interferometri.

$$\frac{\Delta q B_n}{\sin \theta R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

Δq = Perubahan elevasi.

R_0 = Jarak dari radar ke titik referensi.

3. $\Delta\varphi_{displacement}$ adalah kontribusi deformasi permukaan terhadap fase interferometri. Jika interval pencitraan cukup pendek, tidak ada fase deformasi.

$$\frac{4\pi}{\lambda} d \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

d = Pergeseran yang terjadi antara dua gambar SAR yang diambil pada waktu yang berbeda.

4. $\Delta\varphi_{atmosphere}$ adalah kontribusi atmosfer terhadap fase interferometri. diperkenalkan karena kelembaban atmosfer, suhu dan perubahan tekanan antara kedua akuisisi tersebut. Segala jenis perubahan kondisi atmosfer menyebabkan distorsi fase *interferogram*.

$$\frac{4\pi}{\lambda} \int_{R_2}^{R_1} n(r) dr \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

$n(r)$ = Indeks bias atmosfer pada jarak r dari radar.

R_1 dan R_2 = Jarak dari radar ke target di dua waktu pengukuran yang berbeda.

λ = Panjang gelombang radar.

5. $\Delta\varphi_{noise}$ adalah kebisingan fase yang ditimbulkan oleh perubahan temporal dari penghambur, tampilan berbeda sudut, dan hamburan volume. Masalah ini dapat diatasi dengan menerapkan *interferogram* metode penyaringan dalam beberapa model, kebisingan fase sering kali diasumsikan sebagai distribusi normal dengan rata-rata nol:

$$\Delta\varphi_{noise} \sim N(0, \sigma^2) \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan :

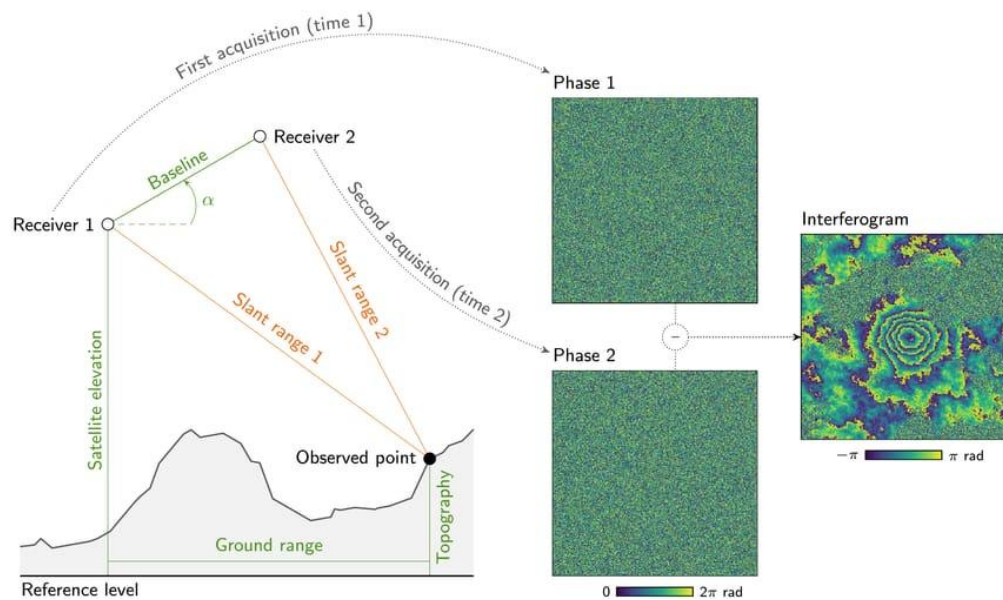
σ^2 = varians dari kebisingan fase, yang dapat bervariasi tergantung pada kualitas data dan kondisi pengukuran.

Untuk menentukan deformasi dengan benar, melihat efek posisi, kelengkungan bumi, efek topografi dan kondisi atmosfer harus dipertimbangkan. Ketika efek-efek tersebut dihilangkan, maka inilah yang terjadi persamaan dapat ditulis : $\Delta\varphi = \varphi_{deformation}$

2.8.1 *Interferogram*

Interferogram SAR diperoleh melalui kombinasi dua citra SAR yang diambil pada lokasi yang sama namun pada waktu yang berbeda, sehingga menghasilkan perbedaan fase antara kedua data tersebut (Rongier et al., 2019). Pembentukan *Interferogram* bertujuan untuk mengetahui beda fase dan *amplitude* dari dua citra radar yang ditampilkan dan saling berkorelasi.

hasil dari proses InSAR divisualisasikan dalam bentuk *interferogram* yang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Skema Prinsip Kerja *Interferogram*

(Sumber: Rongier et al., 2019)

Pada proses pembuatan *interferogram*, terlihat pola garis-garis tepi yang dikenal sebagai *fringes*. *Fringes* tersebut merupakan representasi visual rentang fase antara -2π hingga 2π yang ditampilkan dalam bentuk variasi warna pada *interferogram*.

2.8.2 Koregistrasi Citra SAR

Koregistrasi citra adalah proses penyalarsan posisi geometris antara satu citra dengan citra lainnya. Proses ini bertujuan untuk mengoreksi perbedaan geometri slant range, sehingga setiap piksel pada kedua citra yang ditumpangtindihkan memiliki kesesuaian spasial yang tepat. Piksel kompleks dapat direpresentasikan sebagai vektor, di mana magnitudo vektor tersebut menunjukkan amplitudo (a), sedangkan arah atau orientasinya merepresentasikan fase (ϕ).

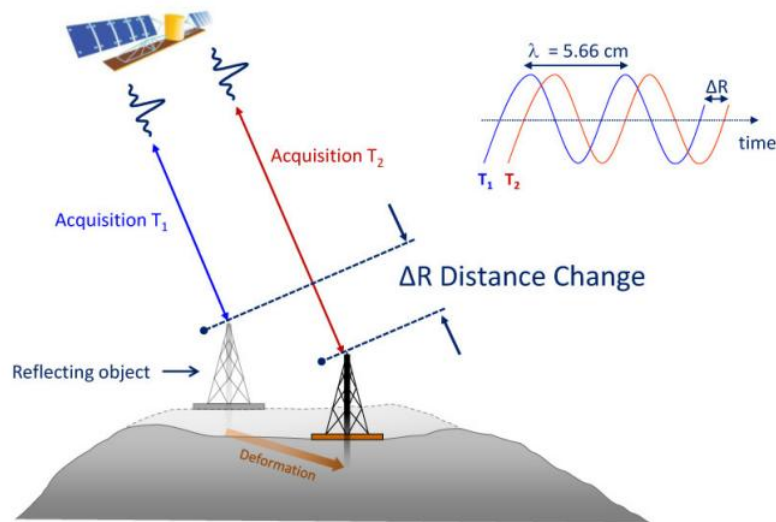
2.8.3 Koherensi Citra SAR

Koherensi atau korelasi antar kedua citra merupakan parameter krusial yang perlu diperhitungkan dalam proses pembentukan *interferogram*. Koherensi didefinisikan sebagai koefisien korelasi antara citra SAR pada wilayah dengan resolusi terkecil. Berdasarkan *European Space Agency* (ESA) Nilai minimum koherensi yang dipersyaratkan dalam pembentukan model tinggi permukaan digital adalah sebesar 0,20. Menurut (Rivera et al., 2016) ; (Gourmelen et al., 2010) ; (Chaussard et al., 2013) nilai batas koherensi yang digunakan untuk deformasi gunung api yaitu 0,70. Sedangkan menurut (Bagnardi et al., 2013) batas nilai koherensi 0,4 juga dapat diterapkan untuk deformasi gunung api. Nilai koherensi merepresentasikan tingkat kesamaan antara citra master dan citra slave. Semakin mendekati nilai 1, maka kedua citra tersebut semakin identik. Sebaliknya, apabila nilai koherensi mendekati 0, maka tingkat kesamaan antara citra semakin rendah atau tidak identik.

2.9 *PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar)*

PS-InSAR merupakan metode pemrosesan citra radar yang menggunakan teknik *Persistent Scatterer interferometry* (PSI) (Ferretti et al., 1999), yang bertujuan untuk mendeteksi pergerakan atau perpindahan permukaan di suatu wilayah secara berurutan dalam rentang waktu tertentu (*time series*) (Darmawan dan Karyanto, 2021). Metode *PS-InSAR* diterapkan dengan menghitung perbedaan *interferogram* dari semua akuisisi citra SAR yang memiliki areal sama (Ferretti et al., 1999), berdasarkan intensitas waktu yang berbeda. *PS-InSAR* memiliki titik hamburan yang relatif stabil untuk analisis deformasi tanpa *multilock* pemrosesan, yang dapat mempertahankan koherensi tinggi untuk waktu yang lama (Babu and Kumar, 2019). Hubungan fungsi antara deformasi dan perbedaan nilai fase ditentukan oleh titik PS, dan kesalahan topografi serta atmosfer dihilangkan dengan data eksternal atau metode penyaringan terkait, sehingga informasi deformasi permukaan pada titik PS dapat diperoleh (Yao et al., 2022).

Gambaran teknik *PS-InSAR* dapat dilihat sebagai berikut. Visualisasi ini merupakan model matematika yang menghitung perbedaan ketinggian (ΔR) serta menggambarkan geometri pola deformasi pada setiap titik pengamatan.



Gambar 3. Geometri PS-InSAR

(Sumber : Prasetyo, 2014)

Proses PS-InSAR diawali dengan identifikasi seluruh titik PS (*Persistent Scatterers*), kemudian dilanjutkan dengan analisis deformasi dua dimensi pada titik-titik tersebut. Pendekatan ini mampu mengatasi kelemahan utama yang terdapat pada metode DInSAR konvensional. Manfaat *PS-InSAR* yaitu *PS-InSAR* memiliki kelebihan dalam hal pengolahan data yang mampu mengurangi efek dekorelasi (Welch and Schmidt, 2017). Saat ini, algoritma PS-InSAR telah dikembangkan dan diimplementasikan dalam berbagai variasi dan bentuk yang beragam. Beberapa metode yang paling dikenal antara lain adalah *Stanford Method for Persistent Scatterers* (StaMPS), *DePSI system* dari Delft University, *Permanent Scatterers*TM dari TeleRilevamento Europa (TRE), *Interferometric Point Target Analysis* dari GAMMA, *GENESIS-PSI* yang dikembangkan oleh DLR (*German Aerospace Center*), serta *Spatio-Temporal Unwrapping Network* (Bouraoui, 2014).

2.10 SIG (Sistem Informasi Geografis)

Sistem Informasi Geografis merupakan teknologi yang mengintegrasikan aspek geografi dengan metode analisis data untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap berbagai fenomena. SIG tidak hanya berfungsi dalam pembuatan peta, tetapi juga memungkinkan pengguna untuk menganalisis data spasial serta mengekstraksi informasi penting yang terkandung di dalamnya. Komponen utama dalam Sistem Informasi Geografis adalah data spasial, yang meliputi informasi terkait lokasi geografis spesifik, termasuk koordinat serta data topografi wilayah tersebut (Mukhlis, 2023).

Teknologi ini memanfaatkan data tersebut untuk menghasilkan visualisasi yang informatif serta melakukan analisis spasial tingkat lanjut, sehingga dapat mengungkap pola dan keterkaitan yang tidak tampak dalam format data konvensional. SIG terdiri dari beberapa elemen penting, antara lain Perangkat keras seperti komputer dan alat GPS, serta perangkat lunak yang berfungsi untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data, merupakan elemen penting dalam sistem SIG. Selain itu, data geografis sebagai basis informasi juga memegang peranan sentral. Keberadaan sumber daya manusia yang memiliki keahlian khusus di bidang SIG sangat diperlukan untuk memastikan interpretasi dan pemanfaatan data dapat dilakukan secara optimal.

2.11 Kawasan Rawan Bencana Gunung Api (KRB)

Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunung Api merupakan representasi spasial yang menggambarkan tingkat potensi bahaya di suatu wilayah apabila terjadi erupsi gunung berapi. Peta ini memuat informasi mengenai jenis dan karakteristik ancaman vulkanik, zona rawan bencana, jalur evakuasi, lokasi tempat pengungsian, serta pos-pos penanggulangan bencana. Berdasarkan Peraturan Pemerintah ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral) Nomor 15

Tahun 2011, peta KRB berfungsi sebagai acuan dalam upaya mitigasi dan respons terhadap risiko bencana gunung api. Tangkuban Parahu dibagi menjadi 3 tingkatan dari rendah ke tinggi yaitu KRB I, KRB II, KRB III.

1. Kawasan Rawan Bencana I (Radius 5km dari pusat erupsi)

Kawasan Rawan Bencana (KRB) I merupakan wilayah yang memiliki potensi terdampak oleh lahar, banjir, serta kemungkinan penyebaran awan panas dan aliran lava. Area ini umumnya terletak di sepanjang atau dekat aliran sungai yang berhulu di puncak gunung berapi. Pada erupsi besar, kawasan ini juga berisiko mengalami hujan abu tebal dan lontaran material pijar. KRB I dibagi menjadi dua subzona berdasarkan tingkat risiko.

- a. Kawasan rawan terhadap aliran massa seperti lahar dan banjir, serta potensi perluasan awan panas dan lava, umumnya berada di sepanjang atau dekat lembah sungai yang berhulu di puncak Gunung Tangkuban Parahu. Daerah yang berisiko antara lain permukiman di sekitar hulu Sungai Ciasem, Cimuja, Bojong Rangkas, serta seluruh area berwarna kuning pada peta KRB.
- b. Kawasan rawan terhadap jatuhnya abu vulkanik dan lontaran material pijar, tanpa bergantung pada arah angin. Wilayah terdampak dapat meluas lebih dari 5 km hingga puluhan kilometer dari pusat erupsi.

2. Kawasan Rawan Bencana II (Radius 3 km dari pusat erupsi)

Secara umum yang disebut KRB II dibagi 2 :

- a. Kawasan ini berisiko terdampak aliran lava, gas beracun, awan panas, dan lahar. Jika awan panas terjadi, dampaknya diperkirakan terbatas di sekitar kawah, mengalir melalui lembah Cikoneng dan Cipangasahan hingga radius $\pm 5,5$ km. Potensi aliran lava terdapat di lereng timur laut (Cipangasahan), meskipun kecil kemungkinannya. Adapun potensi lahar terdapat pada hulu Sungai Cikoneng (utara) dan Cipangasahan (timur laut), yang ditandai warna merah muda pada peta KRB.

- b. Kawasan rawan bencana terhadap jatuhnya piroklastik seperti jatuhnya lontaran batu (pijar) dan hasil erupsi freatik. Semua daerah pada radius 5km dari pusat erupsi berpotensi dilanda hujan abu lebat.
3. Kawasan Rawan Bencana III (Radius 1 km dari pusat erupsi)
 Kawasan Rawan Bencana (KRB) III merupakan area yang berdekatan dengan pusat erupsi dan memiliki tingkat ancaman tinggi terhadap bahaya seperti gas beracun, lontaran batu pijar, aliran lava, erupsi freatik, serta potensi awan panas. Wilayah ini mencakup area parkir hingga kawasan hutan di sekitar Gunung Tangkuban Parahu, yang ditandai dengan warna ungu pada peta KRB.

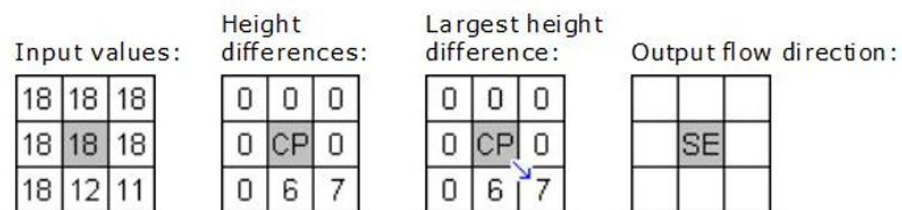
2.12 *Digital Elevation Model (DEM)*

Digital Elevation Model (DEM) adalah representasi digital yang menggambarkan variasi ketinggian permukaan bumi yang diperoleh melalui berbagai teknik akuisisi data. DEM dapat diperoleh melalui beberapa metode, yaitu pengukuran langsung di lapangan (terestris), pemetaan menggunakan wahana udara melalui teknik fotogrametri, serta digitasi dari peta analog. Selain itu, pembentukan DEM juga dapat dilakukan dengan memanfaatkan citra satelit yang direkonstruksi dalam bentuk model stereo (Hidayat dkk., 2016). Secara umum, *Digital Elevation Model (DEM)* adalah representasi digital yang menggambarkan morfologi permukaan bumi dalam bentuk tiga dimensi (3D). DEM juga dapat didefinisikan sebagai dokumen atau basis data yang menyimpan titik-titik ketinggian suatu wilayah. *Digital Elevation Model (DEM)* terbagi menjadi dua jenis utama, yakni *Digital Surface Model (DSM)* dan *Digital Terrain Model (DTM)*. DSM merepresentasikan elevasi seluruh objek di atas permukaan bumi, termasuk vegetasi, bangunan, dan elemen lainnya. Sebaliknya, DTM menyajikan data ketinggian permukaan tanah yang bebas dari pengaruh vegetasi maupun struktur buatan manusia (Amanda, 2023).

2.13 Metode *Steepest Slope*

Pola aliran hidrologi suatu wilayah dapat diidentifikasi melalui analisis arah aliran serta akumulasi aliran pada setiap sel dalam data raster, dengan menerapkan metode analisis spasial yang sesuai. (Arianto, 2015). Metode *Steepest Slope* digunakan dalam analisis hidrologi digital untuk mengidentifikasi arah aliran berdasarkan data dari Model Elevasi Digital (*Digital Elevation Model* atau DEM). Metode ini menghitung perbedaan elevasi antara suatu sel dengan delapan sel di sekitarnya dan menentukan arah aliran menuju sel dengan penurunan elevasi terbesar.

Metode *Steepest Slope* menentukan arah aliran dengan mengarahkannya ke piksel dengan nilai elevasi terendah di sekitarnya. Dalam perhitungannya, metode ini mempertimbangkan delapan sel tetangga terdekat serta faktor kemiringan sudut tangensial pada keempat sudut diagonalnya (Ilwis, 2009).



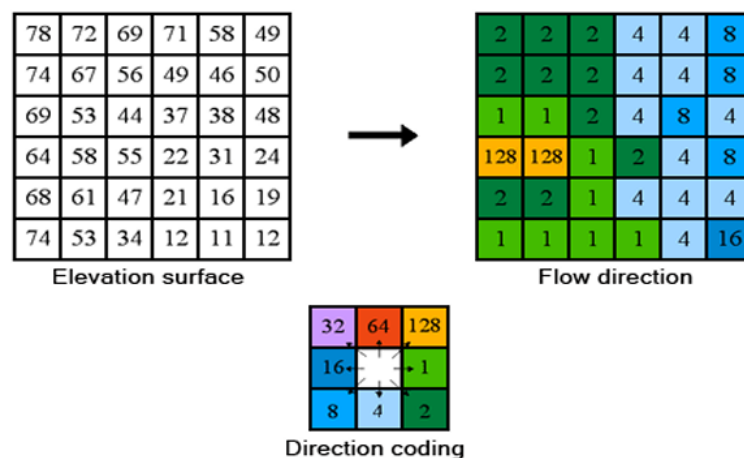
Gambar 4. Algoritma metode *Steepest Slope*

Sumber : (Ilwis, 2009)

Setiap blok dianalisis dengan menggunakan matriks berukuran 3x3 piksel, dimana operasi tersebut menghitung perbedaan ketinggian antara piksel pusat (*Central Pixel* atau CP) dengan delapan piksel tetangga di sekitarnya. Jika terdapat perbedaan ketinggian positif, yaitu ketika nilai piksel pusat lebih tinggi dibandingkan dengan tetangga tertentu, maka arah aliran akan ditentukan berdasarkan posisi tetangga dengan selisih ketinggian terbesar sebagai *output* untuk piksel pusat tersebut (Arianto, 2015).

2.13.1 Flow Direction

Penetapan arah aliran pada setiap sel dalam data raster merupakan salah satu faktor kunci dalam menentukan karakteristik hidrologi permukaan. Algoritma *Flow Direction* secara luas digunakan untuk mengidentifikasi arah aliran pada suatu permukaan (Gunawan, 2011). Algoritma ini menentukan arah aliran antar piksel dengan membandingkan ketinggian satu piksel terhadap delapan piksel di sekelilingnya. Arah aliran ditetapkan berdasarkan kemiringan paling curam dari piksel pusat ke piksel yang lebih rendah di sekitarnya. Setiap piksel dievaluasi dengan mempertimbangkan delapan tetangganya untuk menentukan jalur aliran. Secara prinsip, aliran bergerak dari area dengan elevasi lebih tinggi ke yang lebih rendah. Penentuan arah aliran dilakukan dengan menggunakan angka sebagai simbol untuk setiap arah mata angin, misalnya angka 64 mewakili arah utara, angka 4 untuk selatan, dan seterusnya, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5 di halaman berikutnya (Amanda, 2023).

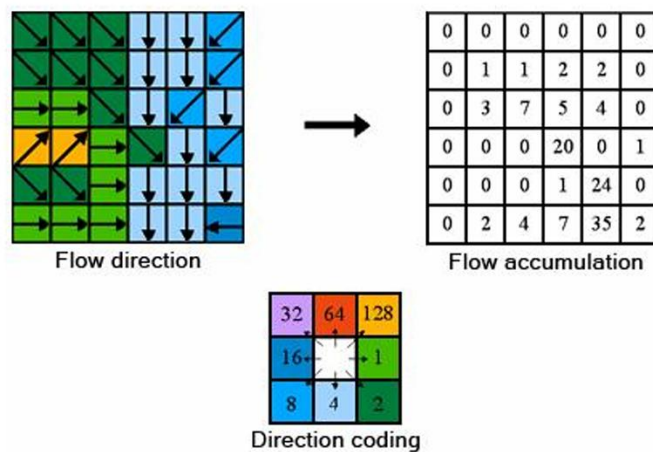


Gambar 5. Menentukan arah mengalir melalui setiap piksel

Sumber : (Esri, 2011)

2.13.2 *Flow Accumulation*

Fungsi ini merepresentasikan jumlah akumulasi aliran air yang terjadi dalam suatu area tertentu berdasarkan cakupan wilayah yang dianalisis. Hasil dari pemodelan ini berupa nilai akumulasi aliran yang umumnya merepresentasikan jaringan sungai yang ada di kondisi nyata di lapangan (Purwanto, 2013).



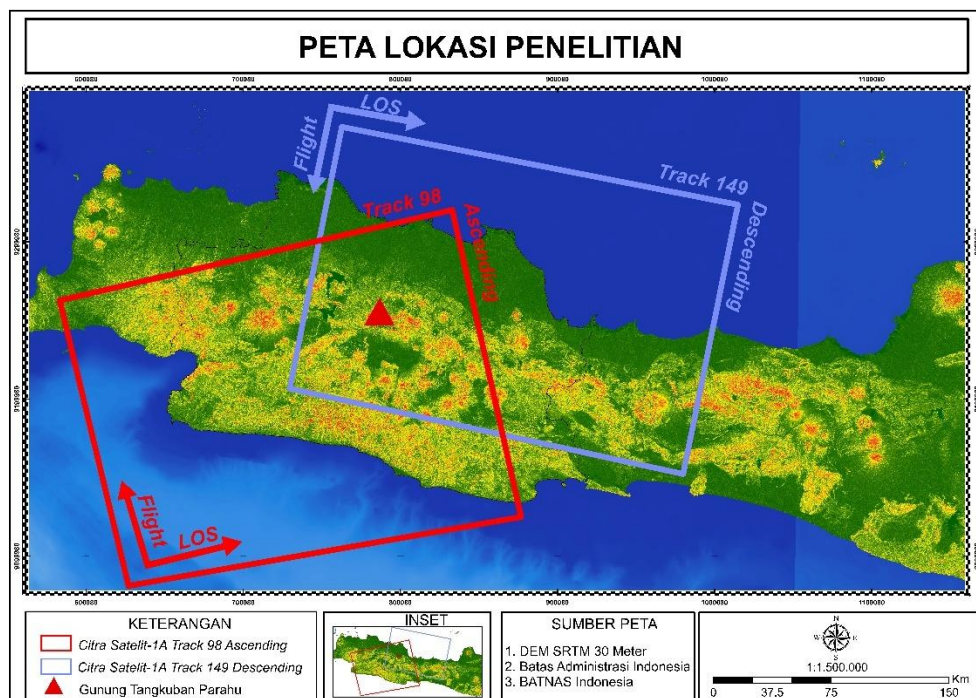
Gambar 6. Akumulasi air menurun ke setiap sel berdasarkan arah aliran

Sumber : (Esri, 2011)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak Gunung Tangkuban Parahu, secara geografis Gunung api Tangkuban perahu terletak pada koordinat $6^{\circ}45'34''$ Lintang Selatan dan $107^{\circ}36'56''$ Bujur Timur, secara administratif Gunung Tangkuban Parahu terletak di Kabupaten Bandung Barat dan Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat.



Gambar 7. Peta Lokasi Penelitian

3.2 Data yang digunakan

Pada penelitian ini menggunakan beberapa data. berikut data yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Data citra satelit Sentinel-1A yang digunakan berupa tipe *Single Look Complex* (SLC) level 1 dengan polarisasi VV pada mode operasional *Interferometry Wide Swath Mode* (IW) sebanyak 40 citra, 20 citra dengan arah perekaman *Ascending* dan 20 citra arah perekaman *Descending* yang ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 3. Data Sentinel-1A

No.	Data	Tanggal Akuisisi	Arah Terbang	Path
1.	Sentinel-1A (Master)	20 Maret 2019	<i>Ascending</i>	98
2.	Sentinel-1A (Slave)	13 April 2019	<i>Ascending</i>	98
3.	Sentinel-1A (Slave)	19 Mei 2019	<i>Ascending</i>	98
4.	Sentinel-1A (Slave)	12 Juni 2019	<i>Ascending</i>	98
5.	Sentinel-1A (Slave)	18 Juli 2019	<i>Ascending</i>	98
6.	Sentinel-1A (Slave)	23 Agustus 2019	<i>Ascending</i>	98
7.	Sentinel-1A (Slave)	16 September 2019	<i>Ascending</i>	98
8.	Sentinel-1A (Slave)	09 Desember 2019	<i>Ascending</i>	98
9.	Sentinel-1A (Slave)	14 Maret 2020	<i>Ascending</i>	98
10.	Sentinel-1A (Slave)	18 Juni 2020	<i>Ascending</i>	98
11.	Sentinel-1A (Slave)	10 September 2020	<i>Ascending</i>	98
12.	Sentinel-1A (Slave)	15 Desember 2020	<i>Ascending</i>	98
13.	Sentinel-1A (Slave)	21 Maret 2021	<i>Ascending</i>	98
14.	Sentinel-1A (Slave)	13 Juni 2021	<i>Ascending</i>	98

Lanjutan Tabel 3. Data Citra Sentinel-1A

No.	Data	Tanggal Akuisisi	Arah Terbang	Path
15.	Sentinel-1A (Slave)	17 September 2021	<i>Ascending</i>	98
16.	Sentinel-1A (Slave)	12 Desember 2021	<i>Ascending</i>	98
17.	Sentinel-1A (Slave)	16 Maret 2022	<i>Ascending</i>	98
18.	Sentinel-1A (Slave)	12 September 2022	<i>Ascending</i>	98
19.	Sentinel-1A (Slave)	17 Desember 2022	<i>Ascending</i>	98
20.	Sentinel-1A (Slave)	11 Maret 2023	<i>Ascending</i>	98
21.	Sentinel-1A (Master)	11 Maret 2019	<i>Descending</i>	149
22.	Sentinel-1A (Slave)	16 April 2019	<i>Descending</i>	149
23.	Sentinel-1A (Slave)	10 Mei 2019	<i>Descending</i>	149
24.	Sentinel-1A (Slave)	15 Juni 2019	<i>Descending</i>	149
25.	Sentinel-1A (Slave)	09 Juli 2019	<i>Descending</i>	149
26.	Sentinel-1A (Slave)	14 Agustus 2019	<i>Descending</i>	149
27.	Sentinel-1A (Slave)	19 September 2019	<i>Descending</i>	149
28.	Sentinel-1A (Slave)	12 Desember 2019	<i>Descending</i>	149
29.	Sentinel-1A (Slave)	17 Maret 2020	<i>Descending</i>	149
30.	Sentinel-1A (Slave)	09 Juni 2020	<i>Descending</i>	149
31.	Sentinel-1A (Slave)	13 September 2020	<i>Descending</i>	149
32.	Sentinel-1A (Slave)	18 Desember 2020	<i>Descending</i>	149
33.	Sentinel-1A (Slave)	12 Maret 2021	<i>Descending</i>	149
34.	Sentinel-1A (Slave)	16 Juni 2021	<i>Descending</i>	149
35.	Sentinel-1A (Slave)	08 September 2021	<i>Descending</i>	149
36.	Sentinel-1A (Slave)	13 Desember 2021	<i>Descending</i>	149

Lanjutan Tabel 3. Data Citra Sentinel-1A

No.	Data	Tanggal Akuisisi	Arah Terbang	Path
37.	Sentinel-1A (Slave)	19 Maret 2022	<i>Descending</i>	149
38.	Sentinel-1A (Slave)	15 September 2022	<i>Descending</i>	149
39.	Sentinel-1A (Slave)	08 Desember 2022	<i>Descending</i>	149
40.	Sentinel-1A (Slave)	14 Maret 2023	<i>Descending</i>	149

2. Data Orbit Satelit Radar rentang waktu tahun 2019 sampai dengan 2023.
3. Data DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) 30 meter.
4. Data Batas Administrasi Desa/Kelurahan.
5. Data Batas Administrasi Kabupaten/Kota.
6. Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Tangkuban Parahu.

3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.3.1 Perangkat Keras (*Hardware*)

Perangkat Keras (*Hardware*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Laptop Acer 13th Gen Intel *Core i5-1335U*, RAM 16 GB.
2. *Hardisk Eksternal* 1TB digunakan untuk proses pengolahan data dan penulisan laporan.

3.3.2 Perangkat Lunak (*Software*)

Perangkat Lunak (*Software*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

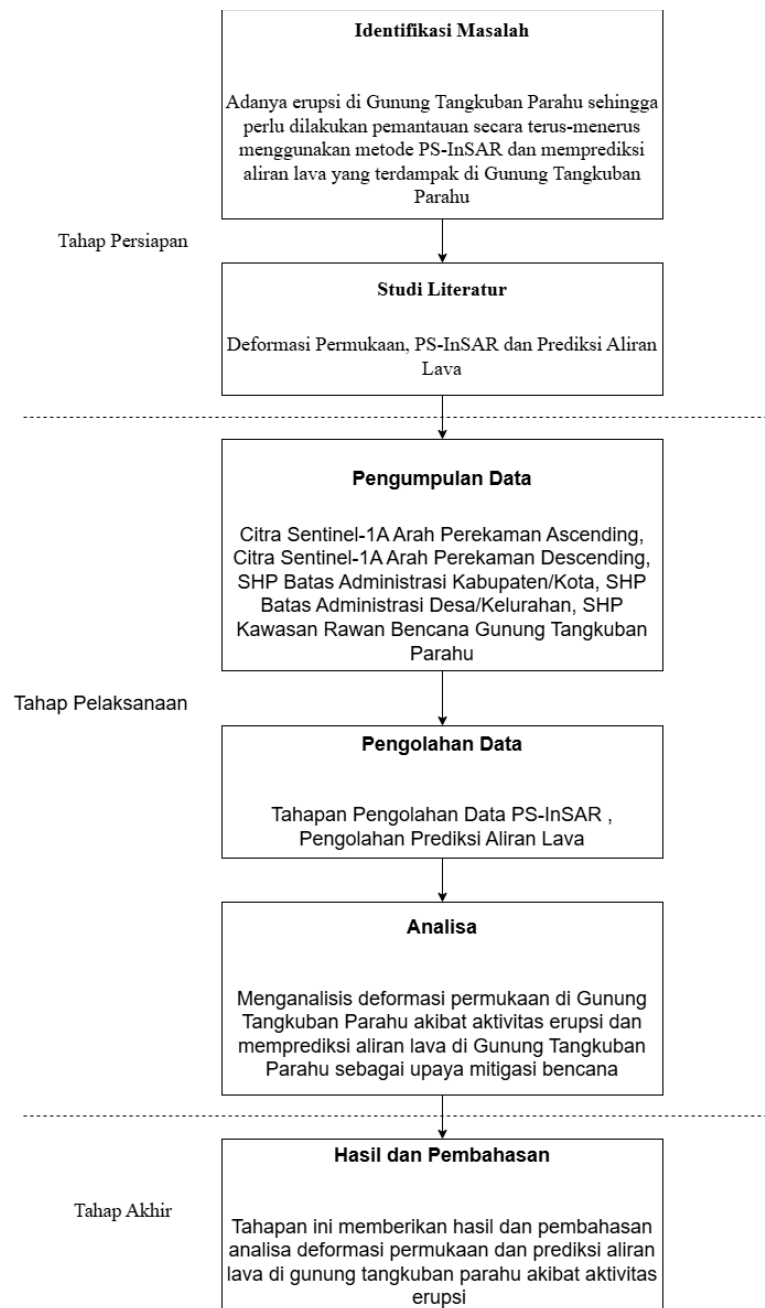
1. Sistem operasi Windows 11 yang digunakan untuk menjalankan *software* SARPROZ dan pembuatan laporan.
2. SARPROZ digunakan untuk pengolahan data *PS-InSAR*.
3. Matlab 9.2 digunakan untuk menjalankan *software* SARPROZ.
4. *Software* Pengolahan GIS digunakan untuk pengolahan prediksi aliran lava.

3.4 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian terdiri dari beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut:

3.4.1 Tahapan Penelitian

Berikut diagram alir metodologi pada penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan mengenai tahapan-tahapan dalam diagram alir penelitian yang telah disajikan di atas.

1. Tahapan Persiapan

Tahap persiapan merupakan langkah awal yang dilakukan oleh peneliti sebelum pelaksanaan penelitian, dengan tujuan untuk menjamin bahwa seluruh proses penelitian dapat berlangsung sesuai dengan prosedur yang telah dirancang. Tahap ini mencakup beberapa kegiatan sebagai berikut.

a. Identifikasi Masalah

Permasalahan pada penelitian ini adalah bagaimana cara mendapatkan informasi deformasi di Gunung Tangkuban Parahu akibat erupsi dan prediksi aliran lava di Gunung Tangkuban Parahu.

b. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan referensi yang relevan dengan penelitian ini, meliputi deformasi permukaan, pengolahan data PS-InSAR, serta prediksi aliran lava.

c. Pengumpulan data

Pengumpulan data bertujuan untuk memperoleh data yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian, pada penelitian ini menggunakan data Citra Sentinel-1A tipe SLC level 1 dengan polarisasi VV mode operasional IW (*Interferometric Wide Swath Mode*), Data Orbit Satelit, DEM SRTM, Batas Administrasi

Desa/Kelurahan, Batas Administrasi Kabupaten/Kota, SHP Kawasan Rawan Bencana Gunung Tangkuban Parahu.

2. Tahapan Pelaksanaan

a. Pengolahan PS-InSAR

Pada tahap ini, pengolahan data citra Sentinel-1A dilakukan menggunakan metode PS-InSAR yang diimplementasikan melalui perangkat lunak SARPROZ.

b. Pengolahan Prediksi Aliran Lava

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data DEM SRTM 30 Meter dengan menggunakan perangkat lunak GIS untuk membuat prediksi aliran lava.

c. Tahap Analisa Data.

Tahap ini dilakukan untuk menganalisis deformasi permukaan dan prediksi aliran lava di Gunung Tangkuban Parahu.

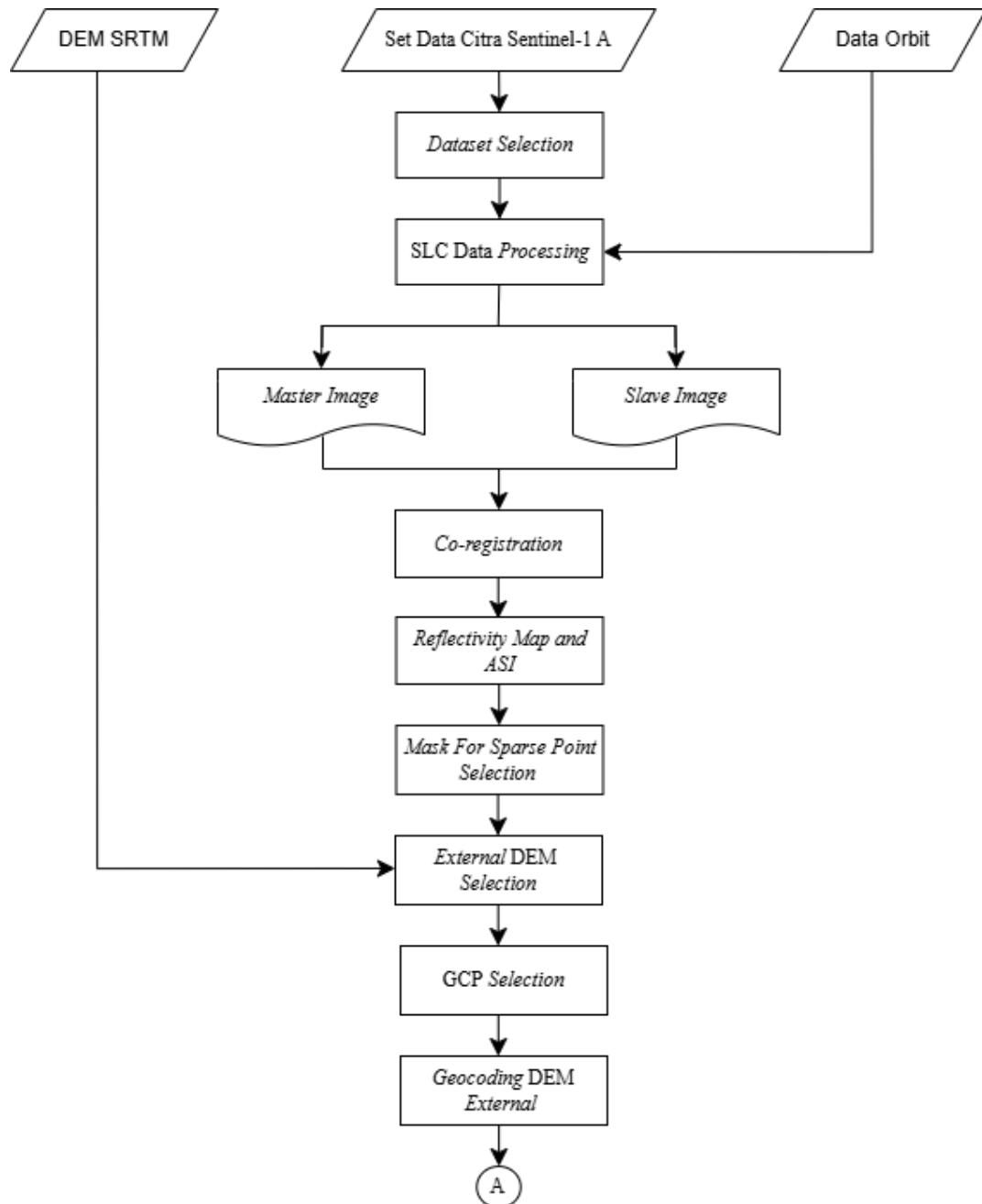
3. Tahapan Akhir

a. Hasil dan Pembahasan

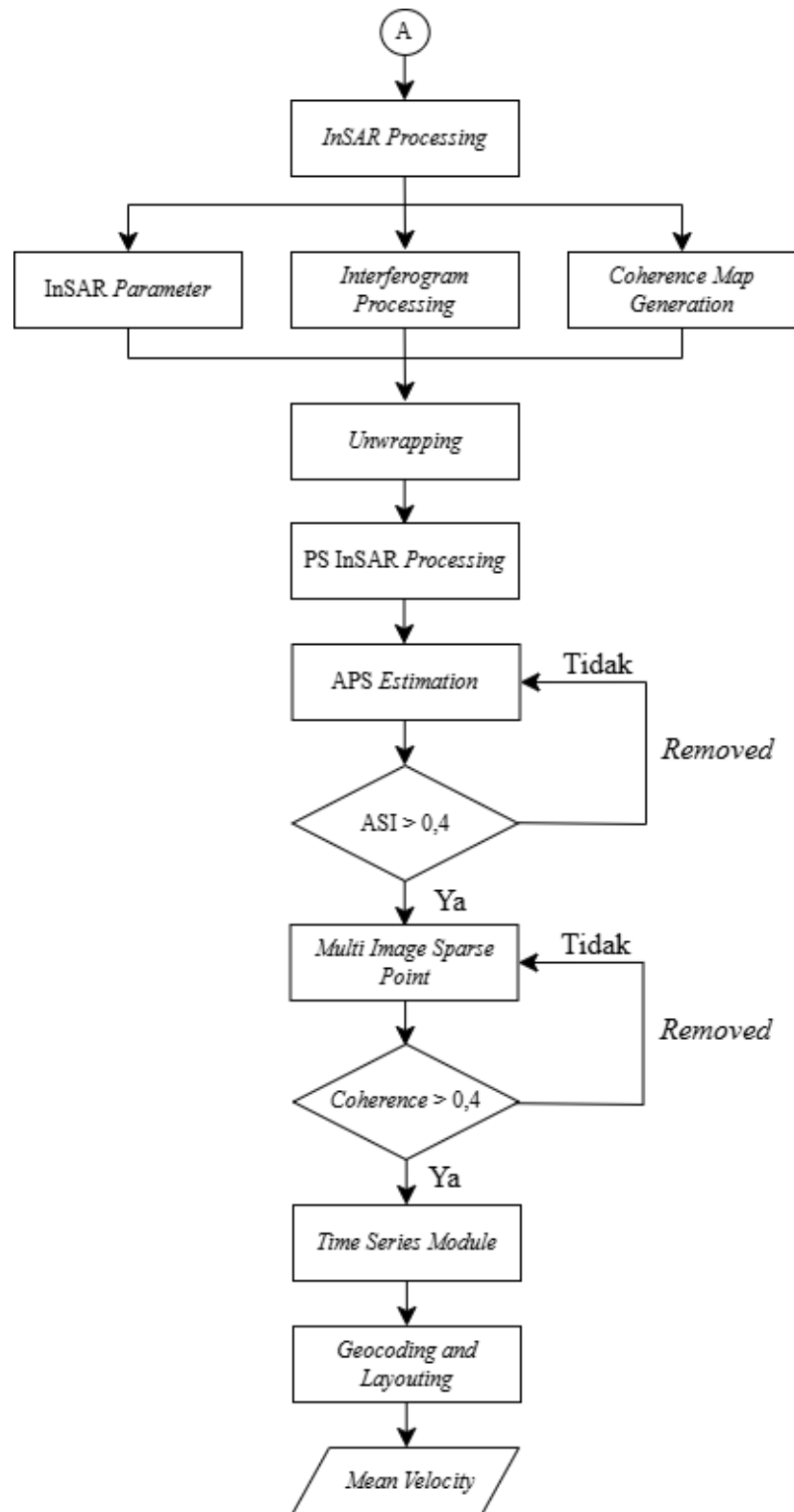
Tahapan ini memberikan hasil dan pembahasan analisis deformasi permukaan dan prediksi aliran lava di Gunung Tangkuban Parahu akibat aktivitas erupsi.

3.4.2 Tahapan Pengolahan Data PS-InSAR

Diagram alir pengolahan PS-InSAR dengan menggunakan perangkat lunak SARPROZ dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 9. Diagram Alir Pengolahan PS-INSAR

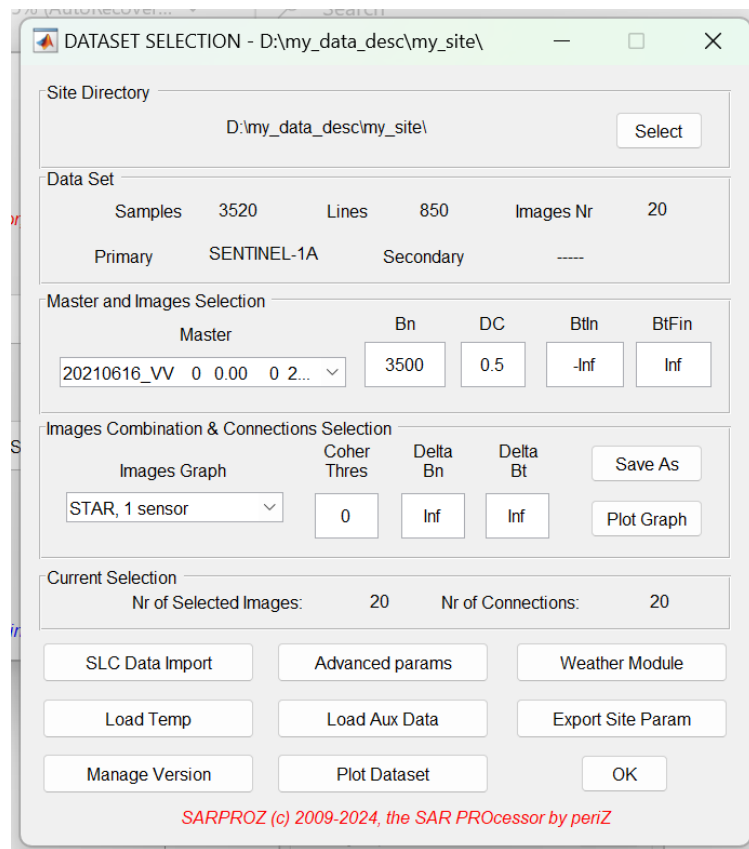


Gambar 10. Lanjutan Diagram Alir Pengolahan PS-INSAR

Berikut ini merupakan penjelasan dari diagram alir pengolahan PS-InSAR yaitu :

a. *Dataset Selection*

Dataset Selection merupakan langkah awal dalam proses pengolahan data SAR menggunakan perangkat lunak *SARPROZ*. Pada tahap ini, dilakukan seleksi berkas yang berisi dataset citra SAR berformat *Single Look Complex* (SLC) yang akan digunakan untuk analisis. Informasi terkait berkas data tersebut dapat diakses melalui kolom *Data Site*.

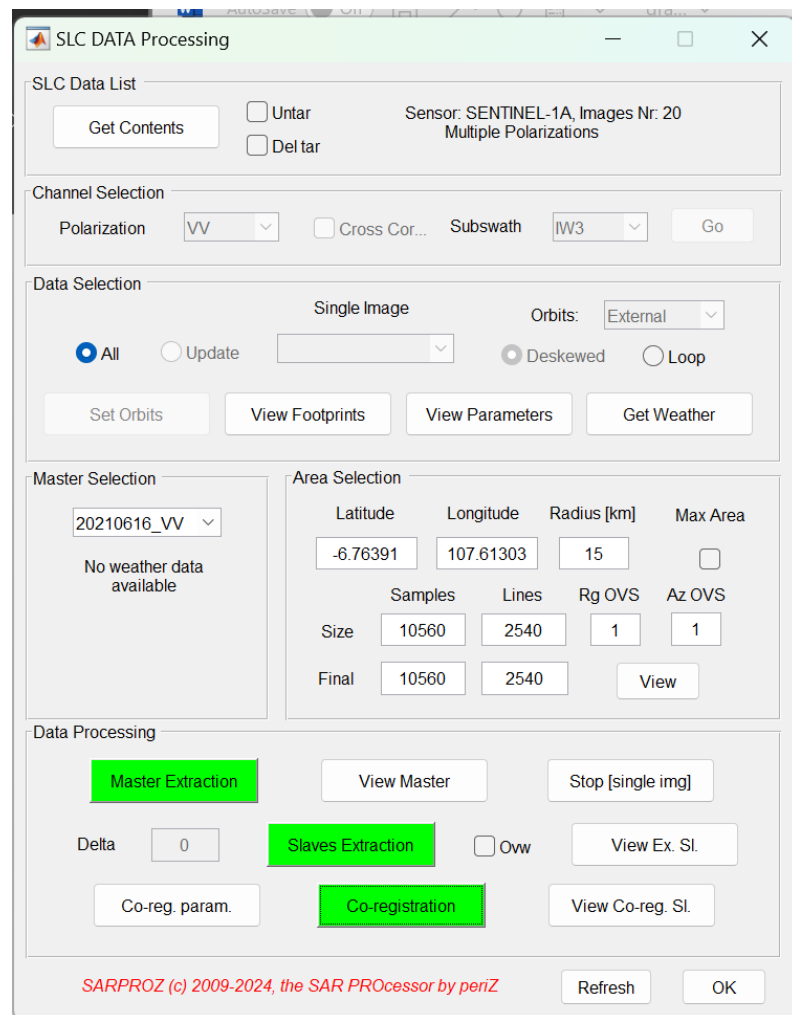


Gambar 11. *Dataset Selection*

b. *SLC Data Processing*

Tahap ini dilakukan pemilihan parameter dari data citra yang akan digunakan pada proses pengolahan data SAR. Parameter tersebut berupa polarisasi dan *subswath* citra sesuai dengan daerah yang akan dianalisa. Berdasarkan parameter yang telah ditetapkan, tahap selanjutnya meliputi pengunduhan data orbit satelit dan data kondisi

cuaca, serta verifikasi kesesuaian *footprint* citra menggunakan *Google Earth*. Selanjutnya, dilakukan penentuan *Area of Interest* (AOI) dari citra dengan cara memasukkan koordinat wilayah yang akan dianalisis, disertai dengan penetapan radius area pengolahan citra yang akan digunakan.



Gambar 12. SLC Data Processing

c. Coregistration

Tahap *coregistration* dilakukan untuk menentukan hubungan antara dua citra SAR yang dapat didefinisikan sebagai citra *master* dan citra *slave*.



Gambar 13. Site Processing

d. *Reflectivity Map and Amplitudo Stability Index*

Tahap ini melibatkan perhitungan nilai *Amplitude Stability Index* untuk setiap piksel citra, yang menghasilkan peta reflektivitas sebagai representasi pantulan objek di permukaan bumi berdasarkan rata-rata temporal dari kumpulan dataset citra terpilih.

e. *Mask for PS Sparse Point Selection*

Tahap ini bertujuan untuk memilih *sparse points* yang akan digunakan dalam identifikasi *point scatterers*.

f. *External DEM Selection*

Tahap ini bertujuan untuk memilih sumber DEM eksternal.

g. *GCP Selection*

Pada tahap ini bertujuan untuk menentukan *Ground Control Point* (GCP) serta mengkombinasikan *synthetic amplitude* dan eksternal DEM pada koordinat SAR guna mentransformasikan data SAR dari geometri *range-azimuth* ke sistem koordinat geografis permukaan bumi.

h. *Geocoding DEM External*

Tahap ini bertujuan untuk memproses DEM *eksternal* dan citra *amplitudo* sintetik ke dalam sistem koordinat SAR, atau dikonversi ke dalam bentuk geometri *slant range*.

i. *InSAR Processing*

1. *Insar Parameters*

Tahap ini mencakup sejumlah parameter penting dalam pengolahan data InSAR, antara lain *flattening* untuk memproyeksikan perbedaan fase ke bidang dua dimensi, penghilangan komponen fase topografi melalui DEM *removal*, penerapan *Multi-Looking* guna mereduksi *noise* dan *speckle*, serta penggunaan *Goldstein Mod* untuk mengurangi gangguan akibat dekorrelasi dan kesalahan pemrosesan dengan penyesuaian jendela analisis.

2. *Full Graph Coherence Estimation*

Tahap ini dilaksanakan untuk memproses koefisien *phase-to-height* dan *phase-to-flat* yang berfungsi sebagai parameter penting dalam koreksi *interferogram*. Pengolahan koefisien tersebut bertujuan untuk meningkatkan akurasi dan kualitas *interferogram* pada berbagai kondisi topografi, baik pada medan datar maupun wilayah dengan kemiringan ekstrem atau curam, sehingga

memungkinkan analisis deformasi permukaan yang lebih tepat dan andal.

3. *Interferogram Processing*

Proses pembentukan *interferogram* dari masing-masing citra menghasilkan perbedaan fase, yang dapat dimanfaatkan sebagai indikasi awal terhadap potensi perubahan pada permukaan bumi.

4. *Coherence Map Generation*

Pada tahap ini, dilakukan interpretasi terhadap hasil *interferogram* melalui visualisasi citra grafis, disertai dengan perhitungan nilai koherensi spasial, yaitu nilai rata-rata tingkat koherensi dari seluruh *interferogram* yang telah dihasilkan.

5. *Unwrapping*

Unwrapping merupakan proses integrasi dan konversi perubahan fase relatif pada *interferogram* dengan memanfaatkan algoritma numerik, yang bertujuan untuk mengoreksi ambiguitas fase akibat kelipatan 2π guna memperoleh nilai fase absolut atau metrik yang merepresentasikan kondisi aktual. Tahapan ini bertujuan untuk menghasilkan representasi bidang perpindahan yang mencerminkan deformasi rata-rata yang terjadi di area studi.

j. *PSInSAR Processing*

1. *APS (Atmospheric Phase Screen) estimation*

Tahap ini bertujuan untuk mengoreksi pengaruh atmosfer terhadap sinyal radar yang dipancarkan oleh satelit, karena gangguan atmosfer dapat menyebabkan munculnya artefak pada *interferogram*. Dalam proses ini, tersedia beberapa metode

estimasi *Atmospheric Phase Screen* (APS), antara lain *inverted parameters*, *inverted residuals*, *triangulation inverted residuals*, dan *stratified*. Apabila data yang digunakan memiliki kestabilan tinggi dan nilai koherensi yang baik, maka metode *inverted residuals* dapat dipilih untuk memperoleh estimasi APS yang optimal.

2. *Multi Image Sparse Points processing*

Tahap ini memiliki kesamaan dengan proses *APS estimation*, di mana parameter-parameter yang diperoleh dari tahap sebelumnya di *input* ke dalam menu yang tersedia. Parameter tersebut mencakup nilai ambang (*threshold*) untuk *Amplitude Stability Index* hingga jenis *APS estimation* yang digunakan. Hasil yang diperoleh dari tahap *Sparse Points Processing* meliputi histogram *temporal coherence*, estimasi kecepatan, *cumulative displacement*, estimasi elevasi dan *residual height* untuk masing-masing titik sparse, serta *residual phase* berdasarkan pilihan metode APS dan parameter estimasi yang digunakan.

3. *Time Series Module*

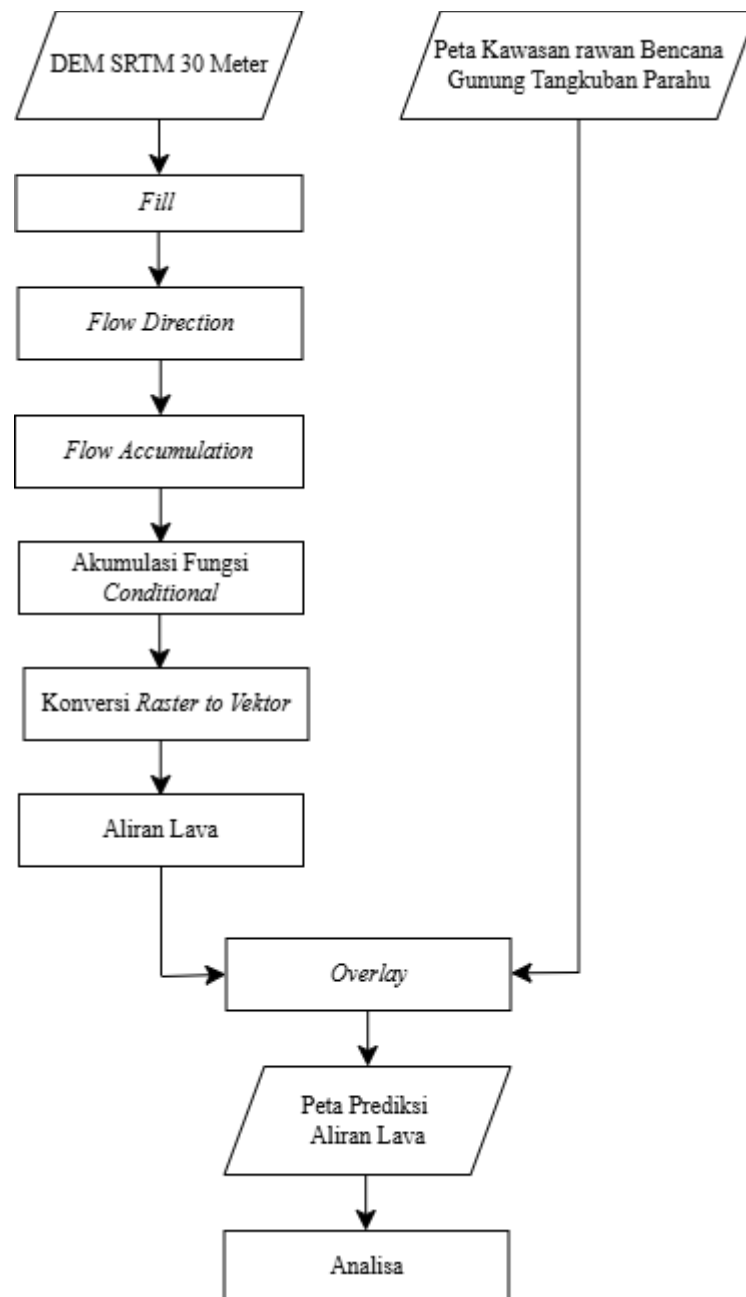
Tahap ini merupakan proses pembentukan hasil dari APS *estimation* dan *Sparse Point Processing*, Dimana akan membentuk *Sparse Point* yang akan memiliki informasi permukaan tanah yang terjadi.

4. *Geocoding and Layouting*

Tahap ini bertujuan untuk mengonversi titik-titik *Persistent Scatterer* (PS) ke dalam sistem koordinat geografis. Setelah proses konversi dilakukan, titik-titik PS tersebut dapat divisualisasikan menggunakan *platform Google Earth*.

3.4.3 Tahapan Pengolahan Prediksi Aliran Lava

Diagram alir pengolahan prediksi aliran lava Gunung Tangkuban Parahu



Gambar 14. Tahapan Pengolahan Prediksi Aliran Lava

Berikut ini merupakan penjelasan dari diagram alir pengolahan Mitigasi Bencana Gunung Tangkuban Parahu.

a. *Fill*

Fill merupakan proses yang dilakukan untuk memperbaiki kesalahan pada data *Digital Elevation Model* (DEM) yang disebabkan oleh gangguan (*noise*) dari citra satelit, seperti ketidaksesuaian sinyal yang diterima. Oleh karena itu, proses *fill* diperlukan guna menghilangkan ketidakakuratan pada data DEM. Berikut ini merupakan tahapan dalam proses *fill*.

b. *Flow Direction*

Flow Direction merupakan proses penentuan jalur aliran lava yang menghasilkan informasi arah aliran pada setiap piksel, yang disesuaikan dengan arah mata angin. Arah aliran ini mencakup delapan orientasi utama, yaitu *North* (N), *East* (E), *West* (W), *South* (S), *Northeast* (NE), *Northwest* (NW), *Southeast* (SE), dan *Southwest* (SW).

c. *Flow Accumulation*

Flow Accumulation merupakan proses pemodelan untuk menghitung jumlah aliran lava yang terjadi di suatu wilayah. Proses ini menghasilkan nilai akumulasi aliran, yang umumnya merepresentasikan kondisi aliran hidrologis di lapangan. Hasil dari proses ini disajikan dalam bentuk dua dimensi.

d. Akumulasi Fungsi *Conditional*

Akumulasi Fungsi *Conditional If/Else* menggunakan Metode *Steepest Slope*. Proses akumulasi fungsi *conditional if/else* untuk memperjelas arah aliran air dari arah puncak.

e. *Konversi Raster to Vektor*

Setelah diperoleh hasil akumulasi aliran air dalam format raster, dilakukan konversi ke format vektor dengan menggunakan alat *stream order* dan *stream to feature*. Proses ini menghasilkan data vektor yang merepresentasikan jalur aliran air, di mana aliran tersebut bergerak dari daerah puncak gunung menuju wilayah dengan elevasi yang lebih rendah.

f. Aliran Lava

Pemodelan aliran lava digunakan sebagai salah satu parameter untuk menganalisis dampak erupsi Gunung Tangkuban Parahu yang terletak di Kawasan Wisata Gunung Tangkuban Parahu.

g. *Overlay*

Tahap ini merupakan tahap akhir sebelum melakukan analisis peta prediksi aliran lava, data yang sudah diolah menggunakan *software* GIS kemudian di gabungkan dengan Peta Kawasan Rawan Bencana, Dengan ketentuan bahwa sistem proyeksi data hasil olahan harus disesuaikan agar identik dengan sistem proyeksi yang digunakan pada Peta Kawasan Rawan Bencana Gunung Tangkuban Parahu.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitain yang telah dilakukan , dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil pengolahan metode PS-INSAR yang dilakukan menggunakan perangkat lunak SARPROZ. Gunung Tangkuban Parahu mayoritas mengalami *deflasi* dengan *mean velocity* atau rata-rata laju deformasi *Citra Sentinel-1A* arah perekaman *Ascending* sebesar $-4,59$ mm/tahun. Nilai *deflasi* tertinggi di Gunung Tangkuban Parahu mencapai $-9,91$ mm/tahun. Sedangkan *mean velocity* atau rata-rata laju deformasi *Citra Sentinel-1A* arah perekaman *Descending* sebesar $-3,86$ mm/tahun. Nilai *deflasi* tertinggi di Gunung Tangkuban Parahu mencapai $-9,98$ mm/tahun.
2. Hasil pengolahan prediksi aliran lava didapatkan sebaran prediksi aliran lava pada wilayah Gunung Tangkuban Parahu yang berpotensi teraliri lava terdapat 3 Kawasan Rawan Bencana, meliputi sebagai berikut :
 - a. Kawasan Rawan Bencana I dengan desa yang terdampak yaitu Desa Kertawangi, Desa Karyawangi, Desa Babakan, Desa Cipancar, Desa Sukamandi, Desa Cicadas, Desa Ciater, Desa Nagrak, Desa Palasan, Desa Cikidang, Desa Cikole, Desa Jayagiri, Desa Cikahuripan, Desa Sukajaya, Desa Cihideung, Desa Cihanjuangrahayu, Desa Wanayasa, dan Desa Cibeusi. Sedangkan luas terdampak pada Kawasan rawan bencana I mencapai 7.853 hektar.

- b. Kawasan Rawan Bencana II dengan desa yang terdampak yaitu Desa Karyawangi, Desa Sukajaya, Desa Cikahuripan, Desa Jayagiri, Desa Cikole, Desa Ciater, Desa Cicadas, Desa Sukamandi. Sedangkan luas terdampak pada Kawasan Rawan Bencana II mencapai 2.827 hektar.
- c. Kawasan Rawan Bencana III dengan desa yang terdampak yaitu Desa Sukajaya, Desa Cikahuripan, Desa Jayagiri, Desa Ciater, Desa Cicadas, Desa Sukamandi. Sedangkan luas terdampak pada Kawasan Rawan Bencana III mencapai 314 hektar.

5.2 Saran

Adapun saran yang ingin disampaikan oleh penulis terhadap penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan citra satelit dengan panjang gelombang yang lebih panjang, seperti *L-band*, sangat dianjurkan karena memiliki kemampuan penetrasi vegetasi yang lebih efektif dibandingkan dengan *C-band*.
2. Disarankan menambahkan data dengan informasi pendukung terkait pemukiman, seperti data jumlah penduduk, kondisi rumah tinggal, dan usia penduduk. Penambahan data tersebut bertujuan untuk menganalisis potensi dampak yang mungkin timbul akibat erupsi gunung tersebut.
3. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai komponen dalam sistem peringatan dini bencana gunung api dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG).

DAFTAR PUSTAKA

- Amanda, W. 2023. Tugas Akhir Studi Penentuan Jalur Aliran Lava Dengan Metode *Steepest Slope* Dari Data Dem Insar Dan Peta Rupa Bumi Indonesia (Studi Kasus: Gunung Merapi, Yogyakarta).
- Arianto, B. B. 2015. Studi Penentuan Jalur Aliran Lava Metode *Steepest Slope* Dari Data Dem Insar Dan Peta Rupa Bumi Indonesia (Studi Kasus : Gunung Semeru , Jawa Timur).
- Babu, A., and Kumar, S. 2019. *PSInSAR Processing for Volcanic Ground Deformation Monitoring Over Fogo Island. MDPI.*
- Bagnardi, M., Amelung, F., and Poland, M. P. 2013. *A new model for the growth of basaltic shields based on deformation of Fernandina volcano , Galápagos Islands. Earth and Planetary Science Letters, 377–378, 358–366.*
- Benyamin, Burhannudinnur, M., dan Setiorini, D. A. 2013 . *Buku Ajar Vulkanologi.* CV Muhammad Fahmi Al Azizy.
- Bouraoui, S. 2014. *Time series analysis of SAR images using persistent scatterer (PS), small baseline (SB) and merged approaches in regions with small surface deformation.*
- Chaussard, E., Amelung, F., and Aoki, Y. 2013. *Characterization of open and closed volcanic systems in Indonesia and Mexico using InSAR time series. Journal of Geophysical Research, 118(August), 3957–3969.*
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-gonzález, M., Devanthéry, N., and Crippa, B. 2016. *Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89.*
- Darmawan, I. G. B., dan Karyanto, K. 2021. Pemanfaatan *Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR)* Untuk Mengidentifikasi Laju Deformasi Permukaan di Lapangan Panas Bumi Ulubelu. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering, 4(2), 86.*
- Edison, A. J. 2021. Analisis Deformasi Gunung Api Tangkuban Perahu Berdasarkan Data Gps Kontinyu Pada Tahun 2019.
- ESDM. 2011. Pedoman Mitigasi Bencana Gunungapi, Gerakan Tanah, Gempa Bumi dan Tsunami. Jakarta : Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM).

- Esri. 2011. *An Overview of Hydrology tools*. Redlands, CA, USA, ArcGIS Help 9.3. http://webhelp.esri.com/arcgis_desktop/9.3/index.cfm?TopicName=An_-_%0Aoverview_of_the_Hydrology_tools.
- Febriyanti, R. F., dan Anjasmara, I. M. 2017. Analisis Deformasi Gunung Raung Menggunakan Teknologi *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR). *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), 624–629.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. 1999. *Permanent Scatterers in SAR interferometry*. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2, 1528–1530. h
- Fitri Febriyanti, R. 2017. Analisis Deformasi Permukaan Gunung Raung Menggunakan Teknologi *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) Berdasarkan Erupsi 28 Juni 2015. *In Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Gourmelen, N., Amelung, F., and Lanari, R. 2010. *Interferometric synthetic aperture radar – GPS integration : Interseismic strain accumulation across the Hunter Mountain fault in the eastern California shear zone*. *Journal of Geophysical Research*, 115, 1–16.
- Gunawan, G. 2011. Deliniasi Das Berbasis Sistem Informasi Geografis Dalam Rangka Mendukung Pengelolaan Das Terpadu Studi Kasus : DAS Manjuto Provinsi Bengkulu-Indonesia. 3(1), 7–15.
- Hidayat, P. I., Subiyanto, S., dan Sasmito, B. 2016. Analisis Kualitas Dem Dengan Membandingkan Metode *Orthorektifikasi* Memakai Citra Resolusi Tinggi (Studi Kasus: Kecamatan Limbangan, Kabupaten Kendal, Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip*, 5, 22–31.
- Huda, A. N., dan Fardha, N. M. 2018. Monitoring Deformasi Gunung Sinabung Tahun 2018 Menggunakan *Teknik Persistent Scatter Interferometry (PS InSAR)* dan *Citra Sentinel-1*.
- Ilwis. 2009. *Hydrology Flow. Basic concepts*, ITC, Netherland.
- Irawan, J., Nuryani, S., dan Pandin, R. M. 2023. Penentuan Jalur Evakuasi Terbaik Bencana Gunung Tangkuban Perahu Menggunakan Algoritma Dijkstra. *CICES (Cyberpreneurship Innovative and Creative Exact and Social Science)*, 9(2), 174–184.
- Mukhlis, I. R. 2023. Sistem Informasi Geografis (Sig) (Issue December).
- Muvid, N. Y. 2018. Analisis Deformasi Gunung Merapi Menggunakan Data GPS Tahun 2015.
- Navalia, A. I., Realita, A., dan Prastowo, T. 2023. Analisis Anomali Gravitasi Gunung Semeru Pasca Erupsi 4 Desember 2021. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 12 (December 2021), 63–74.
- Nugraini, L. D. A., dan Safitri, D. A. 2022. Analisis Deformasi Gunung Agung Berdasarkan Data Citra SAR Sentinel-1A dan Metode D-InSAR. *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea*, 9 (1sp), 33.

- Peltier, A., Bianchi, M., Kaminski, E., Komorowski, J. C., Rucci, A., and Staudacher, T. 2010. *PSInSAR as a new tool to monitor pre - eruptive volcano ground deformation : Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise*. 37, 1–5.
- Prasetyo, Y. 2014. Analisis Optimisasi dan Estimasi Penentuan Penurunan Muka Tanah Menggunakan Teknik *Light Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (LPS-InSAR)* (Studi Kasus: Cekungan Bandung). Institut Teknologi Bandung.
- Pratama, A., N., A. L., dan W., A. P. 2014. Pemodelan Kawasan Rawan Bencana Erupsi Gunung Api Berbasis Data Penginderaan Jauh (Studi Kasus Di Gunung Api Merapi). *Jurnal Geodesi Undip*, 3(April), 117–123.
- Purwanto, T. H. 2013. Ekstraksi Morfometri Daerah Aliran Sungai dari Data Digital Surface Model. *Yogyakarta: UGM Press*.
- PVMBG. 2024. Siaran Pers Aktivitas Vulkanik Gunung Tangkuban Parahu 22 Maret 2024.
- Raventós, J., Couso, C., and García, J. 2017. *The use of InSAR technology to monitor ground and structural displacements. INGeo, International Conference on Engineering Surveying*.
- Rivera, A. M. M., Amelung, F., and Eco, R. 2016. *Volcano deformation and modeling on active volcanoes in the Philippines from ALOS InSAR time series. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 17, 2–7*.
- Rongier, G., Rude, C., Herring, T., and Pankratius, V. 2019. *Generative Modeling of InSAR Interferograms. Advancing Earth and Space Science*.
- Salsabil, S., Anjasmara, I. M., dan Kriswati, E. 2019. Penerapan Metode *Permanent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR)* untuk Analisis Deformasi Gunungapi (Studi Kasus : Gunungapi Sinabung). *Jurnal Teknik ITS*, 8(2), 156–161.
- Sentosa, R. A., Sulaksana, N., Haryanto, A. D., Gentana, D., Aglomerat, B., dan Silitonga, A. 2018. *Land Surface Temperature Pada Manifestasi Permukaan Panasbumi : Studi Kasus Gunung Tangkuban Parahu , Jawa Barat Gunung Tangkuban Parahu adalah salah satu kawasan wisata alam . Gunung ini kota Bandung serta kawasan wisata Lembang menjadikan gunung ini sel. PADJADJARAN GEOSCIENCE JOURNAL*, 2, 376–386.
- Sneed, M., Brandt, J., and Solt, M. 2013. *Land Subsidence along the Delta-Mendota Canal in the Northern Part of the San Joaquin Valley, California, 2003–10. Prepared in Cooperation with U.S. Bureau of Reclamation and the San Luis and Delta-Mendota Water Authority*.
- Syahputri, B. E. A., Anjasmara, I. M., dan Widodo, A. 2021. Deformasi Permukaan pada Manifestasi Gunung Lumpur di Wilayah Cekungan Jawa Timur dari Pengolahan Data SAR menggunakan Metode PS-InSAR. *Geoid*, 16(2), 204–214.

- Welch, M. D., and Schmidt, D. A. 2017. *Separating Volcanic Deformation and Atmospheric Signals at Mount St. Helens Using Persistent Scatterer InSAR*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Wismaya, Y. G., Anjasmara, I. M., dan Sulistiyani. 2016. Analisis Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Data Pengamatan GPS Februari-. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), 427–431.
- Wulandari, H. T. 2010. Analisis Sinyal Seismik Gunungapi Merapi Berdasarkan Identifikasi Gempa *Multiphase* Sebelum dan Sesudah Letusan 14 Juni 2006.
- Yao, J., Yao, X., and Liu, X. 2022. *Landslide Detection and Mapping Based on SBAS-InSAR and PS-InSAR: A Case Study in Gongjue County, Tibet, China*. *MDPI*, 14, 2–19.
- Yuniardi, Y., Hendarmawan, Isnaniawardhani, V., Abdurrokhim, dan Ridwan, P. 2019. Stratigrafi Vulkanik Di Lereng Utara Gunung Tangkuban Perahu, Daerah Cisolok, Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 17(December), 173–186.
- Yusrina, A., Suratman, F. Y., dan Arseno, D. 2019. Pembentukan Citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR) Menggunakan Metode *Backprojection*. *E-Proceeding of Engineering*, 6(2), 4268–4274.