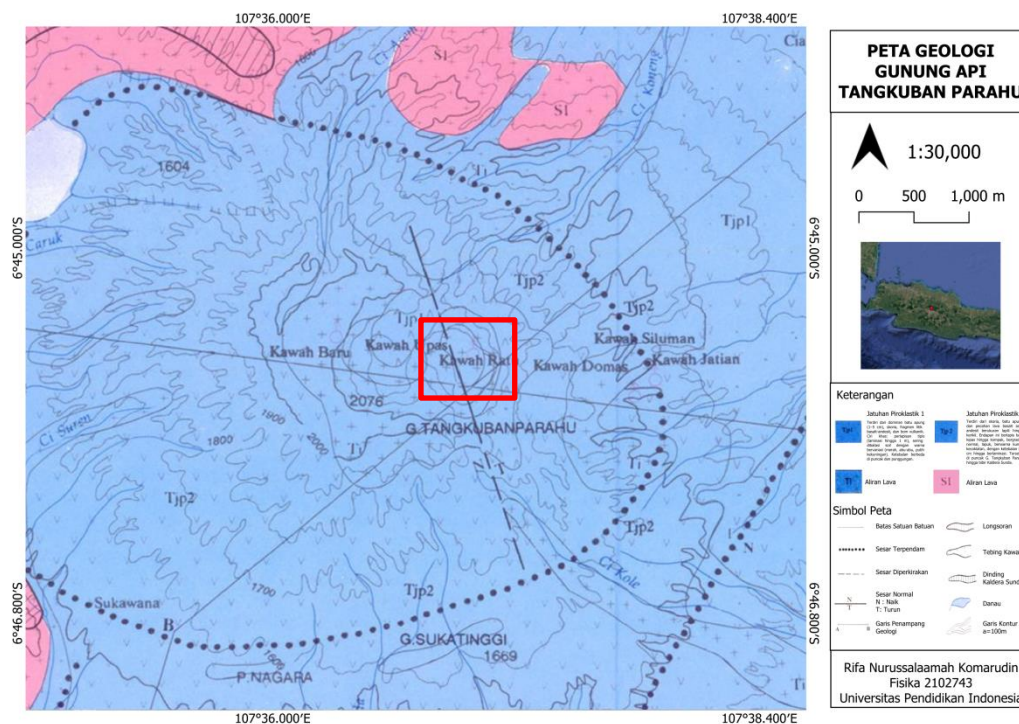


BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini mengambil data dari 1 Januari 2018 hingga 29 Februari 2024, berfokus pada bulan Juli hingga Agustus 2019. Lokasi penelitian di Gunung Tangkuban Parahu terletak pada koordinat 6°46' LS dan 107°36' BT dengan lokasi wilayah administrasi Desa Cikahuripan, Kecamatan Lembang, Kabupaten Bandung dan Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Berikut merupakan peta lokasi penelitian yang ditampilkan pada Gambar 3.1.

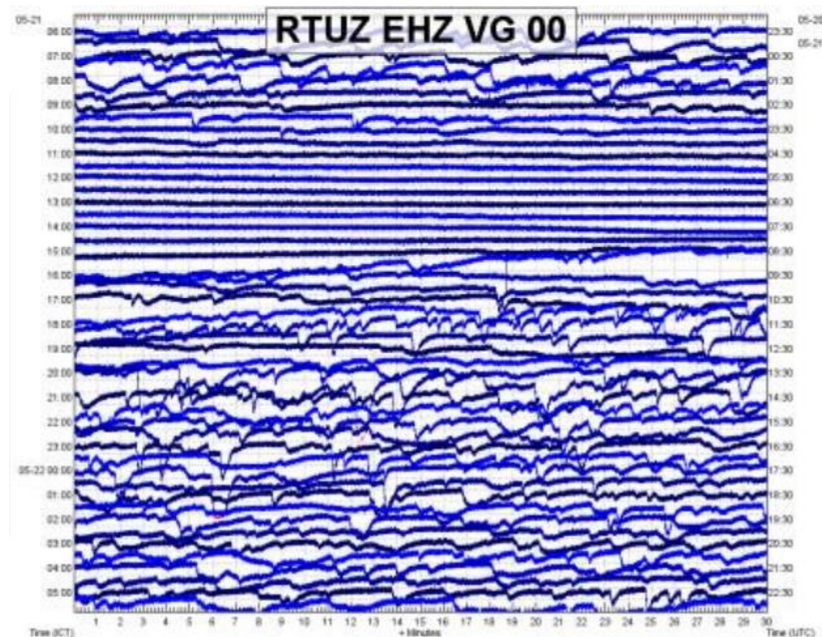


Gambar 3. 1 Peta Geologi Gunung Api Tangkuban Parahu

3.2 Data Penelitian

Dalam penelitian ini, penulis mengumpulkan beberapa jenis data utama yang digunakan untuk analisis, yaitu data seismik dan data deformasi. Data seismik yang digunakan merupakan data yang diperoleh dari PVMBG dalam

format MSEED, yang bersumber dari seismogram Stasiun Kawah Ratu (RTUZ) untuk periode 1 Januari 2018 hingga 29 Februari 2024. Data seismik ini merupakan komponen vertikal yang terekam pada seismometer tipe short period (frekuensi natural = 1 Hz) tipe L4C dengan laju sampling 100 Hz.



Gambar 3. 2 Data Seismik yang belum diolah

Tahapan awal pengolahan data seismik ini meliputi :

- Pengurangan nilai rata-rata (*demean*) : Mengurangi sinyal dengan nilai rata-rata untuk menghilangkan offset sehingga nilai rata-rata sinyal kembali ke nol.
- Penggabungan (*merging*) : Menggabungkan sinyal menjadi durasi 24 jam. Jika durasi sinyal kurang dari 24 jam, ditambahkan nilai nol untuk mengisi kekosongan data; jika lebih dari 24 jam, sinyal dipotong menjadi 24 jam.
- Penyaringan (*filtering*) : Menggunakan filter bandpass Butterworth dengan rentang frekuensi 0,01–8 Hz untuk menghindari frekuensi rendah akibat variasi suhu dan tekanan.
- Pengambilan ulang sampel (*resampling*): Mengubah laju sampling data dari 100 Hz menjadi 20 Hz untuk mengurangi ukuran data dan mempercepat proses pengolahan.

- Normalisasi dalam domain waktu dan frekuensi : Mengurangi atau menghilangkan sinyal gempa bumi, gangguan, atau sinyal non-stasioner lainnya. Dalam domain waktu, dilakukan dengan memotong sinyal pada ambang tiga kali RMS (*Root Mean Square*) sinyal; dalam domain frekuensi, diterapkan pemutihan (*whitening*) pada rentang frekuensi 0,1–1,0 Hz (Limbong, 2020; Suparman, 2019).

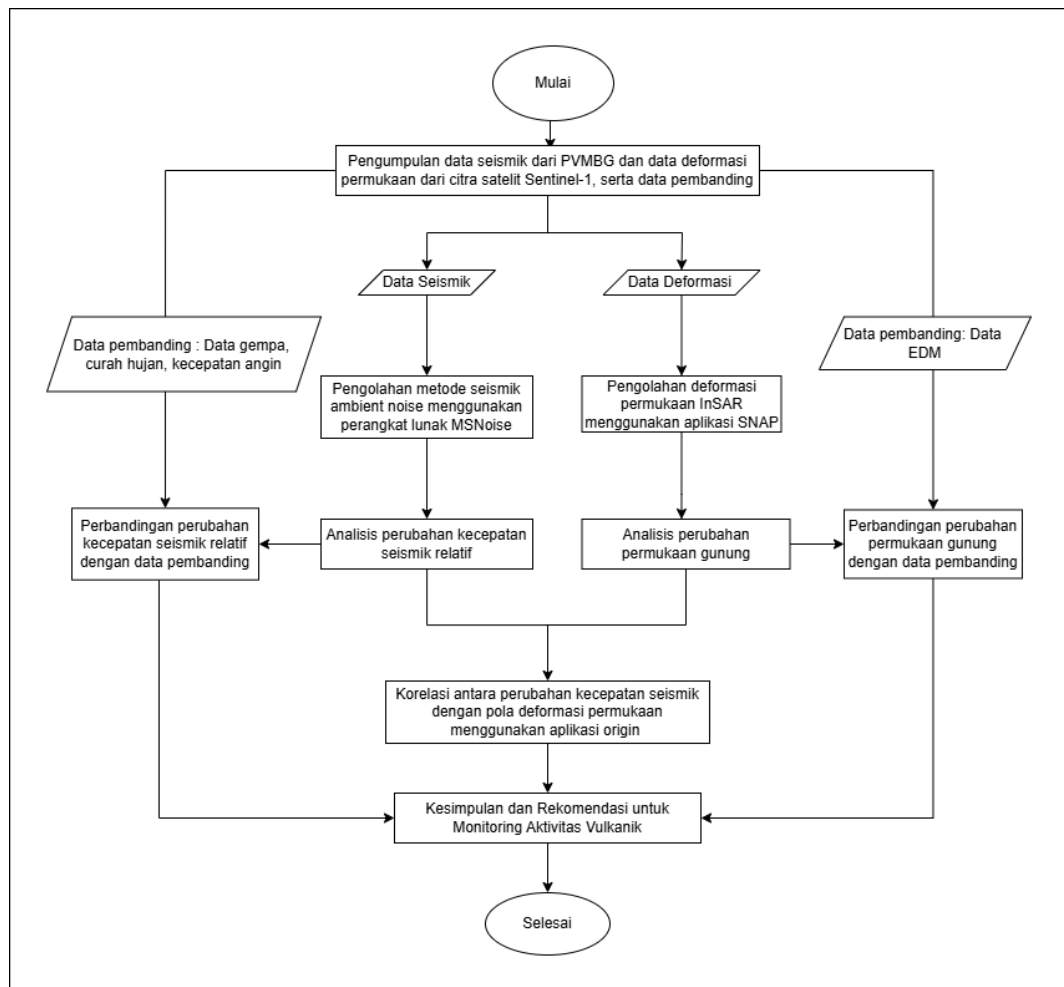
Sedangkan untuk data deformasi, penulis menggunakan data penginderaan jauh dengan satelit Sentinel-1 bertipe *Single-Look Complex* (SLC) mode IW (*Interferometric Wide*), dan polarisasi VV (*Vertical Transmit, Vertical Receive*), yang mencakup dua tanggal pengamatan, yaitu 19 Juli 2019 dan 11 Agustus 2019. Data ini dapat diakses melalui situs resmi <https://search.asf.alaska.edu>, dengan wilayah penelitian yang ditentukan berdasarkan koordinat poligon berbentuk persegi panjang dengan batas-batas rentang longitude 107.5968 hingga 107.6338 dan latitude -6.7807 hingga -6.7345.

Selain data utama tersebut, penelitian ini juga menggunakan beberapa data pembanding untuk memvalidasi data utama. Data gempa yang diperoleh dari PVMBG dalam bentuk data seismik real-time turut digunakan dalam analisis, bersama dengan data deformasi EDM yang juga bersumber dari PVMBG. Sebagai tambahan, data curah hujan bulanan dan kecepatan angin rata-rata yang diperoleh dari BMKG melalui situs <https://dataonline.bmkg.go.id/>. Semua data yang dikumpulkan dianalisis secara komprehensif untuk menggali hubungan antara faktor-faktor tersebut dalam memahami dinamika internal Gunung Api Tangkuban Parahu.

3.3 Prosedur Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian, diperlukan langkah-langkah yang sistematis sesuai dengan metode penelitian yang digunakan. Penjelasan lebih

rinci dapat dilihat pada diagram alir yang terdapat pada Gambar 3.3.



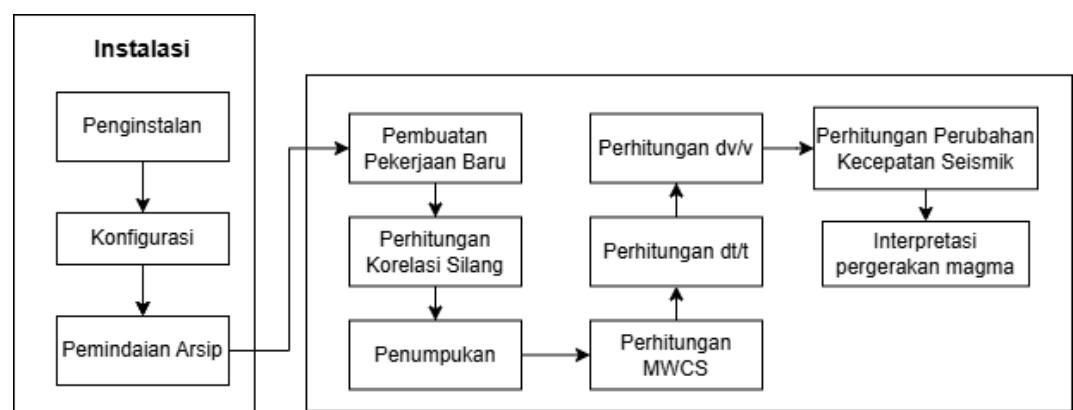
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar, penelitian ini terdiri dari empat tahap utama, yaitu : pengolahan data seismik *ambient noise* untuk perubahan kecepatan seismik relatif ($\delta v/v$), pengolahan data penginderaan jauh Sentinel-1 untuk memperoleh data deformasi permukaan, perbandingan dengan data pembandingan untuk validasi data, korelasi antara nilai ($\delta v/v$) dan deformasi permukaan, serta interpretasi dan identifikasi peningkatan aktivitas Gunung api.

3.3.1 Perubahan Kecepatan Seismik Relatif

Perubahan kecepatan seismik relatif ($\delta v/v$) dihitung dengan memanfaatkan data seismik yang direkam melalui metode seismik

ambient noise, yang diolah menggunakan perangkat lunak MSNoise. Proses ini melibatkan teknik korelasi silang antara pasangan stasiun seismik, di mana perbedaan antara korelasi saat ini dan korelasi referensi digunakan untuk menentukan perubahan dalam kondisi media (Clarke et al., 2011). Teknik ini memungkinkan rekonstruksi *Green's Function* (GF) yang merepresentasikan respon impuls sistem antara dua stasiun seismik (Shapiro & Campillo, 2004). Dengan menggunakan data seismik *ambient noise*, perubahan kecepatan seismik dapat diidentifikasi sebagai hasil dari proses geologis seperti peretakan batuan, perubahan tekanan, atau pergerakan fluida dalam kerak bumi. Diagram alir pengolahan data dengan MSNoise dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 4 Diagram alir pengolahan perubahan kecepatan seismik relatif (dv/v) dengan MSNoise

Data yang digunakan adalah data seismik komponen vertikal EHZ yang diperoleh dari seismometer tipe *short period* (frekuensi natural = 1 Hz) tipe L4C dengan *sampling rate* 100 Hz dan di *resample* menjadi 20 Hz, di Gunung Api Tangkuban Parahu. Data seismik tersebut telah disimpan dalam format miniSEED, yang merupakan format standar untuk data seismik. Data yang dianalisis menggunakan satu stasiun, yaitu RTUZ, sehingga dapat dilakukan perhitungan autokorelasi.

(a) Instalasi dan Konfigurasi Awal

Proses dimulai dengan *installation* menggunakan *installer* untuk memasang perangkat lunak MSNoise pada sistem. Setelah itu, tahap berikutnya adalah *configurator*, di mana pengguna mengonfigurasi parameter dasar proyek, seperti pengaturan database dan parameter pemrosesan.

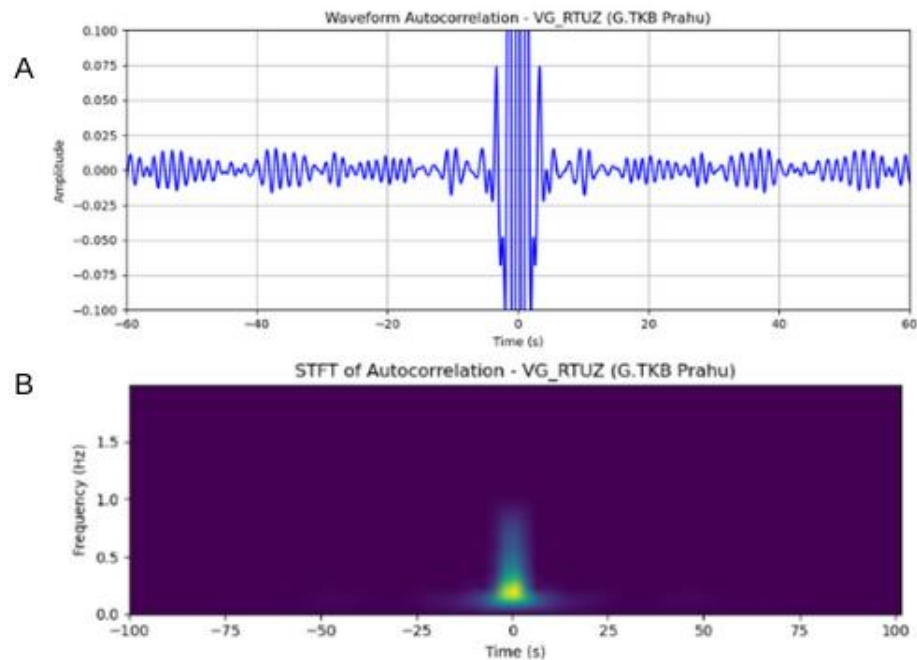
(b) Pemindaian Arsip dan Pembuatan Pekerjaan Baru

Setelah langkah tersebut selesai, diikuti dengan langkah *scan archive*, yang berfungsi untuk memindai arsip data seismik dan mendeteksi file yang baru atau yang telah dimodifikasi. Proses ini memastikan bahwa semua data yang relevan tersedia untuk langkah analisis selanjutnya. Setelah arsip data dipindai, proses berlanjut ke *new jobs*. Pada tahap ini, MSNoise memeriksa file yang memiliki status "New" atau "Modified" untuk setiap tanggal yang telah ditentukan. Pekerjaan baru yang perlu diproses akan ditandai dan dimasukkan ke dalam tabel *jobs* di dalam database MSNoise. Langkah ini sangat penting untuk mempersiapkan data yang akan digunakan dalam analisis berikutnya.

(c) Perhitungan korelasi silang

Setelah pekerjaan baru selesai, langkah berikutnya adalah *compute cross-correlation*. MSNoise akan menghitung korelasi silang antara pasangan stasiun yang dipilih, dalam hal ini stasiun RTUZ mengkorelasikan dirinya sendiri. Proses ini dilakukan baik dalam domain waktu maupun frekuensi, untuk memperoleh informasi mengenai propagasi gelombang seismik antar stasiun. MSNoise akan menentukan hari-hari mana yang perlu diproses dan untuk pasangan stasiun mana saja. Untuk satu set N stasiun, M akan ditentukan oleh persamaan, sebagai berikut:

$$M = N \times \frac{N - 1}{2} + N \quad \text{III.1}$$



Gambar 3. 5 A) Fungsi korelasi silang dengan autokorelasi (B) *Short Time Fourier Transform*.

Gambar 3.4 A menunjukkan fungsi korelasi silang pada stasiun RTUZ yaitu dilakukan autokorelasi, hasilnya seperti invers dari satu sama lain, karena memang mengkorelasikan dirinya sendiri. Gambar 3.4 B menunjukkan bahwa kandungan frekuensinya berada pada rentang 0,2-1 Hz. Hal tersebut sesuai dengan frekuensi narutal seismogram *short period* yaitu 1 Hz, dan tipe L4C, *respons* instrumen menurun pada frekuensi di bawah 0,5 Hz . Hasil ini kemudian dibandingkan dengan referensi stabil selama periode tertentu untuk mendeteksi fluktuasi relatif pada kecepatan gelombang.

(d) Penumpukan (*Stacking*)

Selanjutnya, hasil korelasi silang dihitung setiap potongan data dan kemudian di *stacking*. *Stacking* bertujuan untuk merata-ratakan hasil korelasi dari beberapa interval waktu untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap *noise*. Proses ini menghasilkan *daily stack*, yang memungkinkan stabilitas sinyal seismik lebih baik dan lebih

mudah dianalisis. Parameter untuk *moving stack*, dengan panjang jendela 5 detik dan langkah 10 detik.

(e) Perhitungan *Moving Window Cross-Spectrum* (MWCS)

Proses compute MWCS dilakukan untuk menganalisis keterlambatan fase antara dua sinyal dengan menggunakan spektrum sinyal dalam domain frekuensi. Pada tahap ini, filter dengan panjang jendela analisis (MWCS W_{len}) sebesar 5 detik dan langkah perpindahan jendela (MWCS Step) sebesar 2.5 detik diterapkan. Dengan membagi data menjadi jendela waktu yang tumpang tindih, MWCS dapat mengidentifikasi perbedaan waktu atau keterlambatan fase antar sinyal untuk menentukan dinamika sumber gelombang.

(f) Perhitungan dt/t

Setelah melakukan analisis MWCS, langkah berikutnya adalah *compute* dt/t . Di tahap ini, perubahan waktu perjalanan gelombang seismik dihitung berdasarkan hasil dari analisis MWCS. Hasilnya memberikan informasi mengenai perbedaan waktu (δt) relatif terhadap waktu perjalanan (t), yang merupakan indikasi dari perubahan kecepatan gelombang seismik di bawah permukaan.

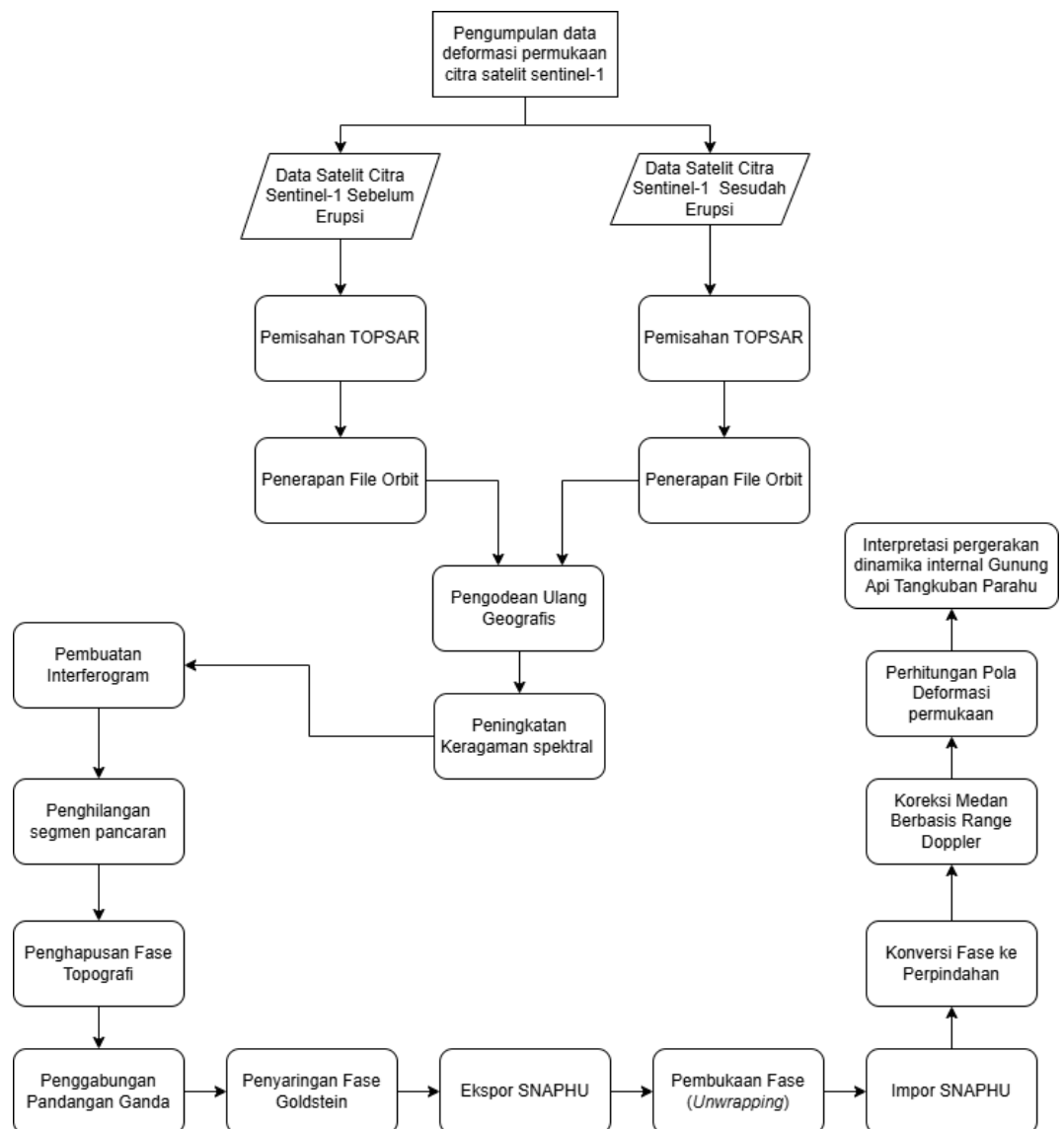
(g) Perhitungan $\delta v/v$

Langkah terakhir dalam rangkaian ini adalah *compute* $\delta v/v$, yang menghitung perubahan kecepatan gelombang seismik ($\delta v/v$) dari hasil perhitungan ($\delta t/t$). Proses ini bertujuan untuk memonitor perubahan kondisi dinamis di bawah permukaan bumi, seperti pergerakan fluida atau perubahan tekanan magma yang dapat mempengaruhi kecepatan gelombang seismik.

3.3.2 Deformasi Permukaan InSAR Sentinel-1

Deformasi permukaan dihitung berdasarkan data interferometri radar aperture sintetis (InSAR) dari citra Sentinel-1 yang diproses menggunakan perangkat lunak SNAP. Proses ini melibatkan analisis perbedaan fase relatif antara pasangan citra sebelum (*master*) dan sesudah (*slave*) kejadian untuk mengukur perubahan jarak garis pandang (*line-of-sight displacement*). Teknik ini memungkinkan deteksi deformasi dengan resolusi spasial tinggi dan sensitivitas yang cukup untuk memantau perubahan kecil pada permukaan bumi.

Tahapan pemrosesan meliputi pra-pemrosesan untuk menyelaraskan data, pembuatan interferogram, koreksi pengaruh topografi, pengurangan noise, hingga konversi fase menjadi deformasi. Diagram alir pengolahan data yang dilakukan menggunakan SNAP ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 6 Diagram alir pengolahan Deformasi InSAR Sentinel-1 dengan SNAP

Data Sentinel-1 dari ASF Data Search sesuai parameter tertentu, data sebelum dan sesudah erupsi dengan kriteria SLC, IW, polarisasi VV, dan waktu perekaman berbeda yaitu 24 juni 2019, 18 Juli 2019 dan 11 Agustus 2019. Dengan wilayah penelitian yang ditentukan berdasarkan koordinat poligon tertentu yang mengarah ke Gunung Api Tangkuban Parahu.

Kedua data (sebelum dan sesudah erupsi) masing-masing melakukan *running*.

(a) Pemisahan TOPSAR dan Penerapan File Orbit

Topsar split adalah memisahkan subset data Sentinel-1 berdasarkan IW3 sesuai dengan area kajian dan *burst* 4-9 agar tepat di wilayah Gunung Api Tangkuban Parahu. Selanjutnya adalah mengaplikasikan orbit file untuk meningkatkan akurasi geometris dengan memperbaiki posisi satelit memilih sentinel *precise* dengan polynomial degree 3.

(b) Pengodean Ulang Grafis dan Meningkatkan keragaman spektral

Back-geocoding adalah koregistrasi data *master* dan data *slave* dengan menggunakan DEM SRTM 1 Sec HGT, teknik interpolasi Bicubic_Interpolation dan *Resampling type* Bisinc_5_point_Interpolation. *Enhanced-Spectral Diversity* diterapkan untuk mengurangi distorsi geometris pada *sub-swath* dan *burst* yang tumpang tindih.

(c) Membuat Interferogram dan Penghilangan segmen pancaran (*Topsar Deburst*)

Interferogram menghitung perbedaan fase antara pasangan citra (*master* dan *slave*) untuk menghasilkan interferogram yang menggambarkan perubahan fase akibat deformasi permukaan. Mengubah ukuran jendela koherensi menjadi 18. *Topsar-Deburst* berfungsi menghilangkan celah antar *burst* untuk menghasilkan citra kontinu yang lebih mudah dianalisis.

(d) Penghapusan Fase Topografi dan Penggabungan pandangan ganda

Topo phase removal berfungsi menghapus komponen fase topografi menggunakan DEM SRTM 1 Sec HGT, memastikan bahwa informasi yang tersisa hanya deformasi permukaan. *Multilook* meningkatkan *signal-to-noise* (SNR) dengan mereduksi resolusi spasial, menghasilkan citra yg bersih dan berkualitas tinggi.

(e) Penyaringan Fase Goldstein dan Ekspor SNAPHU

Goldstein phase filtering berfungsi mereduksi *noise* pada interferogram dengan filter Goldstein, untuk meningkatkan kualitas data fase. Snaphu export mengeksport data interferogram yang sudah difilter ke format SNAPHU untuk proses *unwrapping* fase. Mengatur *Statistical-cost mode* menjadi DEFO dan *Initial method* MCF.

(f) Pembukaan Fase (Unwrapping) dan Konversi Fase ke Perpindahan (*displacement*)

Dengan SNAPHU (*Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*), fase kontinu dihitung untuk menghilangkan ambiguitas fase. *Phase to displacement* mengonversi fase kontinu menjadi nilai deformasi dalam milimeter berdasarkan panjang gelombang radar.

(g) Koreksi Medan Berbasis *Range Doppler*

Tahapan ini digunakan koreksi distorsi geometris yang disebabkan oleh sudut pandang radar untuk memperoleh peta deformasi yang akurat.

Untuk mengetahui dari *displacement value* yang dihasilkan, dilakukan perhitungan perubahan fase ($\Delta\phi$) yang diperoleh dari interferogram. Nilai ini kemudian dikonversi menjadi pergeseran atau *displacement* dalam satuan panjang, seperti meter atau milimeter. Sentinel-1 menggunakan radar C-band dengan panjang gelombang (λ) sebesar 0,056 meter. Rumus untuk menghitung *displacement* berdasarkan perubahan fase adalah sebagai berikut:

$$Displacement (LOS) = \frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{4\pi} \quad \text{III.2}$$

dengan *displacement (LOS)* adalah pergeseran permukaan dalam satuan meter, $\Delta\phi$ perbedaan fase dalam satuan radian dan λ panjang gelombang radar dalam meter. Rumus ini menggambarkan hubungan

antara perbedaan fase ($\Delta\phi$) yang terdeteksi oleh radar dengan panjang gelombang (λ) untuk menghasilkan nilai *displacement*.

3.3.3 Korelasi Penurunan Kecepatan Seismik Ambient terhadap Deformasi Permukaan

Korelasi perubahan kecepatan seismik relatif dan deformasi permukaan dihitung setelah data seismik dan data deformasi telah selesai diolah dengan prosedur 3.3.1 dan 3.3.2. Langkah selanjutnya adalah melakukan korelasi antara perubahan kecepatan seismik relatif ($\delta v/v$) dan deformasi permukaan menggunakan aplikasi origin. Korelasi ini dilakukan untuk memahami hubungan antara perubahan internal di dalam gunung api dengan respons permukaan yang terukur. Ketika fluida panas, naik ke permukaan, tekanan di bawah permukaan meningkat, menyebabkan perubahan sifat elastis material batuan di sekitarnya. Akibatnya, batuan menjadi lebih lemah atau retak, sehingga gelombang seismik merambat lebih lambat, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai dv/v . Di saat yang sama, deformasi permukaan, seperti inflasi, meningkat akibat tekanan dari fluida yang terus mendorong ke atas. Oleh karena itu, semakin besar deformasi yang teramati, semakin signifikan pula penurunan dv/v , yang mencerminkan proses naiknya fluida panas menuju permukaan. Grafik korelasi antara kedua parameter ini dibuat untuk mengidentifikasi pola perubahan yang terjadi.