

Pengaruh Koreksi Ionosfer Terhadap Pergeseran Vertikal Pada Citra Satelit ALOS-PALSAR

Pratiwi Vaherera^{a*}

^aTeknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Research Article

DOI:

10.22146/jgst.v1i1.5746

correspondence:

pvaherera@gmail.com

Article history:

Received:

28-09-2022

Accepted:

29-11-2023

Published:

28-12-2023

ABSTRACT

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is an effective technique for changing the earth's surface with wide coverage and high accuracy. However, the accuracy of InSAR can be affected by wave propagation activity in the atmosphere. The ionospheric medium in the atmosphere contains free electrons which cause unstable waves to produce bias. Therefore, it is necessary to correct the ionosphere in SAR image processing so that it does not contain bias. This study examines the effect of ionospheric correction on vertical deformation in ALOS-PALSAR satellite imagery. The data used includes satellite image data and GNSS. Image data is processed by considering the presence or absence of ionospheric correction so that the results can be analyzed to determine the effect of the ionosphere on SAR images. GNSS data is processed by a static method to produce coordinates that can be used as a reference for validating the results of SAR image processing. The results of SAR and GNSS image processing are then visualized in the form of a vertical deformation map to facilitate the analysis of the results. The results showed that the direction of the vertical deformation in the ionospheric corrected satellite image was consistent with the direction of the vertical deformation in the GNSS. This indicates that the ionospheric correction affects the vertical deformation in the satellite image. In the process of vertical changes, there are obstacles, namely the vertical point reference has not been used as a validation of the results. In addition, there are no other satellite image references to compare the results of the ALOS-PALSAR satellite image processing.

Key words: satellite imagery, ALOS-PALSAR, InSAR, ionospheric correction, vertical displacement, Gempa Bengkulu

INTISARI

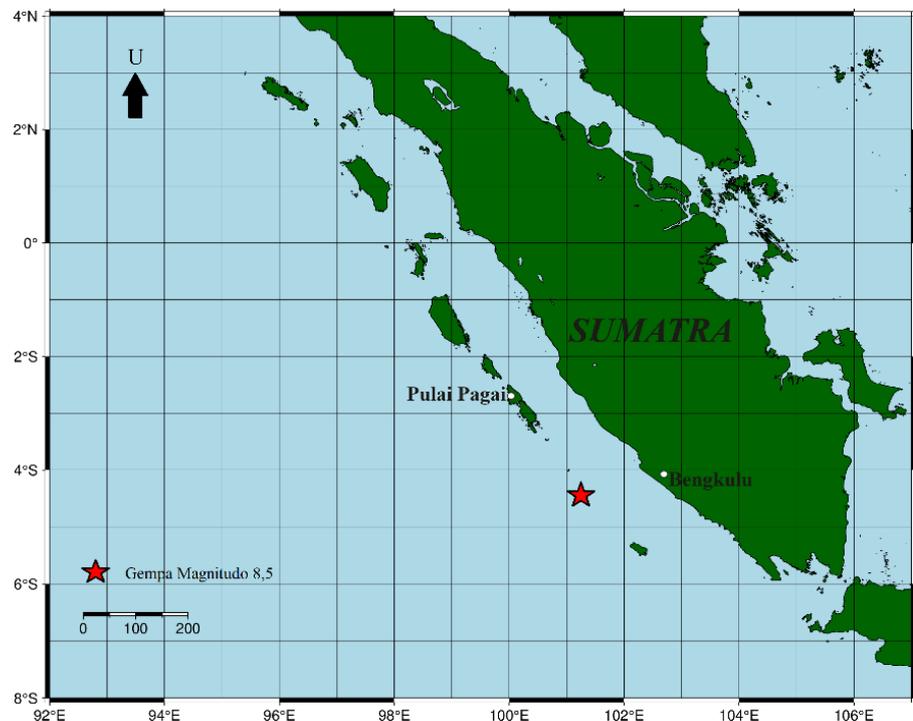
Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) adalah teknik yang efektif untuk memetakan pergeseran permukaan bumi dengan cakupan area yang luas dan ketelitian tinggi. Namun, ketelitian InSAR dapat dipengaruhi oleh aktivitas perambatan gelombang pada lapisan atmosfer. Medium ionosfer pada lapisan atmosfer mengandung elektron bebas yang menyebabkan gelombang tidak stabil sehingga menghasilkan bias. Oleh karena itu, perlu dilakukan koreksi ionosfer pada pengolahan citra SAR agar tidak mengandung bias. Penelitian ini mengkaji pengaruh koreksi ionosfer terhadap pergeseran vertikal pada citra satelit ALOS-PALSAR. Data yang digunakan meliputi data citra satelit dan GNSS. Data citra diolah dengan mempertimbangkan ada dan tidaknya koreksi ionosfer sehingga hasilnya dapat dianalisis untuk mengetahui pengaruh koreksi ionosfer pada citra SAR. Data GNSS diolah dengan metode statik sehingga menghasilkan koordinat yang dapat digunakan sebagai acuan pada validasi hasil pengolahan citra SAR. Hasil pengolahan citra SAR dan GNSS selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk gambar yang menunjukkan pergeseran vertikal untuk memudahkan analisis hasil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah pergeseran vertikal pada citra satelit yang terkoreksi ionosfer konsisten terhadap arah pergeseran vertikal pada GNSS. Hal tersebut menandakan bahwa koreksi ionosfer berpengaruh terhadap penentuan pergeseran vertikal pada citra satelit. Dalam proses penentuan pergeseran vertikal terdapat kendala yaitu belum adanya referensi titik vertikal sebagai acuan validasi hasil. Selain itu, belum terdapat referensi citra satelit lainnya sebagai pembanding hasil pengolahan citra satelit ALOS-PALSAR.

Kata kunci: citra satelit, ALOS-PALSAR, InSAR, koreksi ionosfer, pergeseran vertikal, Gempa Bengkulu

1. Pendahuluan

Deformasi dapat terjadi pada permukaan bumi maupun di bawah permukaan bumi. Deformasi permukaan terjadi akibat adanya gempa dengan kedalaman kurang dari 100 km di bawah permukaan bumi. Gaya yang mendesak secara tiba-tiba pada lapisan kerak bumi dapat menyebabkan deformasi (Islami, 2017). Deformasi dapat menyebabkan adanya zona patahan (fault). Menurut Tanner dan Brandes, (2019), jenis patahan yang ditemukan di zona patahan antara lain patahan turun (normal fault), patahan naik (reverse fault), dan patahan geser (strike slip fault). Patahan turun adalah kondisi dimana blok pada zona patahan bergerak turun terhadap blok lain di sekitarnya. Sedangkan, patahan naik adalah kondisi dimana blok pada zona patahan bergerak naik terhadap blok lain di sekitarnya. Patahan geser adalah kondisi dimana blok permukaan tanah bergeser ke arah kiri atau kanan terhadap blok lain. Deformasi berupa pergeseran muka bumi dapat terjadi secara vertikal maupun horizontal. Untuk memetakan pergeseran pada permukaan bumi dapat dilakukan dengan teknik InSAR (Panuntun dkk., 2022).

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) adalah teknik yang efektif untuk memetakan pergeseran permukaan bumi. InSAR mengukur perubahan gelombang fase pada area yang sama dengan rentang waktu yang berbeda untuk memperoleh nilai pergeseran (Parker, 2017). Teknik ini dapat beroperasi dalam segala kondisi cuaca dan waktu dengan cakupan area yang luas serta memiliki akurasi pengukuran yang tinggi. Dalam dua dekade terakhir teknologi InSAR telah membantu dalam monitoring aktivitas tektonik seperti pemodelan patahan lempeng akibat gempa bumi. Selain itu, InSAR juga dapat menunjukkan patahan yang berpotensi merusak jaringan lempeng dengan akurat (Biggs dan Wright, 2020).



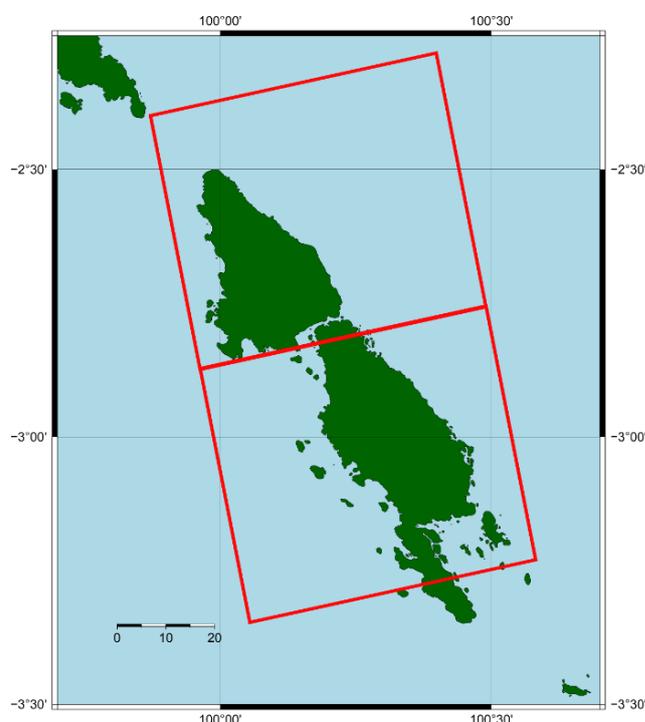
Gambar 1. Lokasi Gempa Bengkulu 12 September 2007. Bintang merah adalah lokasi terjadinya Gempa Bengkulu 12 September 2007 di koordinat 4.438° LS dan 101.367° BB.

Pengukuran InSAR yang teliti dapat terpengaruh oleh adanya bias akibat perambatan gelombang melalui lapisan atmosfer (Panuntun dkk. 2022; Zhang dkk. 2018). Pada lapisan atmosfer terdapat dua medium yaitu ionosfer dan troposfer yang dapat menyebabkan *signal delay*. Pada medium troposfer sumber bias berasal dari tekanan udara dan kadar air pada 10-20km terbawah pada lapisan atmosfer (Zhang et al., 2018). Pada medium ionosfer sumber bias berasal dari elektron bebas sehingga gelombang yang melewatinya cenderung tidak stabil dan menghasilkan bias (Zhang dkk., 2018). Penelitian ini menggunakan citra satelit ALOS-PALSAR dengan Band L dimana band tersebut cenderung lebih stabil terhadap medium troposfer tapi sangat sensitif terhadap medium ionosfer (Zhang dkk., 2018). Dampak bias yang tidak dimitigasi dapat menyebabkan hasil pengolahan *underestimated* maupun *overestimated* sehingga akan terdapat kesalahan dalam interpretasi. Penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa ionosfer merupakan medium dispersif yang mempengaruhi sinyal radar sehingga terjadi pergeseran fase hingga setengah siklus fase (Hanssen, 2018). Hal tersebut dapat menyebabkan kesalahan rentang hingga 24 m terhadap panjang

gelombang Band L (Ding dkk., 2008). Gusman (2010) menggunakan teknik InSAR untuk mendeteksi deformasi permukaan pada Gempa Bengkulu. Namun, penelitian tersebut belum mempertimbangkan mitigasi kesalahan atmosferik pada pengolahan citra SAR.

Penelitian ini bermaksud untuk memperhitungkan pengaruh kesalahan atmosferik pada pengolahan citra SAR. Pada pengolahan data citra SAR, teknik InSAR digunakan untuk mendeteksi pergeseran vertikal akibat Gempa Bengkulu (Gambar 1). Pengolahan tersebut dilakukan dengan dan tanpa mempertimbangkan koreksi ionosfer. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan hasil pengolahan nilai pergeseran vertikal dari citra satelit dengan data stasiun GNSS dengan nama BSAT dan SLBU. Tujuan utama dari kegiatan aplikatif ini adalah menganalisa pengaruh ionosfer terhadap hasil ukuran InSAR. Dalam pelaksanaannya dirumuskan beberapa tujuan khusus antara lain menganalisis pengaruh koreksi ionosfer terhadap hasil pengolahan data citra satelit, mengukur dan membandingkan besar dan arah pergeseran vertikal berdasarkan citra Satelit ALOS-PALSAR dan data GNSS pada stasiun BSAT dan SLBU dengan dan tanpa adanya koreksi efek ionosfer (kasus: Gempa Bengkulu 12 September 2007).

Diharapkan dengan adanya penelitian ini, dapat memberikan informasi pengaruh koreksi efek ionosfer untuk menghindari bias dalam pengolahan citra SAR, serta untuk meningkatkan kualitas interferogram sehingga nilai pergeseran vertikal dari LOS (*Line of Sight*) menjadi akurat.



Gambar 2. Cakupan area Wilayah Pulau Pagai pada citra Satelit ALOS-PALSAR. Garis merah adalah batas area yang dapat dicakup oleh satu lembar citra Satelit ALOS-PALSAR.

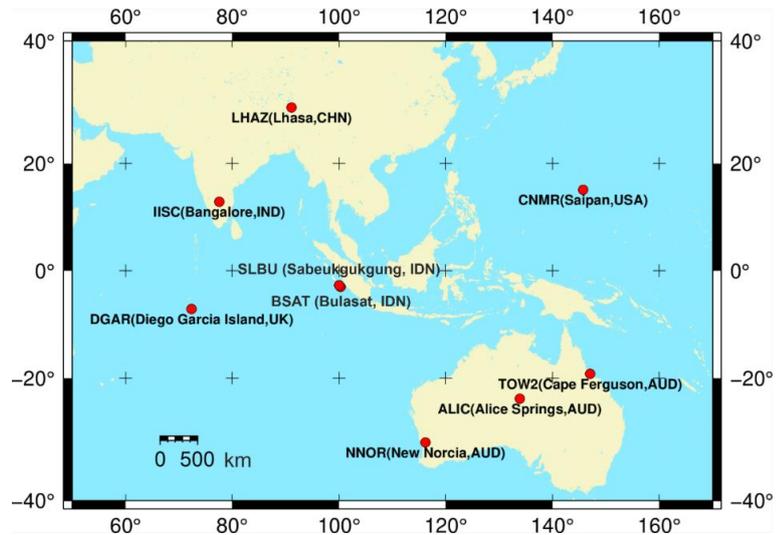
2. Data

2.1. Data Citra SAR

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data citra satelit ALOS-PALSAR pada wilayah Pulau Pagai pada tanggal 21 Juni 2007 dan 21 September 2007 yang dapat diunduh melalui <https://search.asf.alaska.edu/>. Data tersebut diperlukan untuk memperoleh nilai pergeseran vertikal dari citra satelit dengan mempertimbangkan ada dan tidaknya koreksi ionosfer. Selain itu, diperlukan data DEM dalam pengolahan data citra untuk melakukan konversi dari elevasi digital (*longitude, latitude*) menjadi elevasi yang sesuai dengan keadaan muka bumi (*range, azimuth*) (Sandwell dkk., 2016). Gambar 2 menunjukkan cakupan area pada data ALOS. Data DEM pada wilayah Pulau Pagai dapat diunduh melalui website: <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>.

2.2. Data GNSS

Data GNSS pada stasiun SuGAR dan IGS diunduh sesuai pada tanggal 21 Juni 2007 dan 21 September 2007 melalui website SOPAC (<http://sopac-csrc.ucsd.edu/>) dengan menggunakan aplikasi GAMIT. Data GNSS diperlukan untuk melakukan validasi terhadap hasil pengolahan data citra SAR dalam penentuan nilai dan arah pergeseran vertikal. Gambar 3. menunjukkan lokasi titik GNSS yang digunakan pada proyek akhir ini.



Gambar 3. Sebaran lokasi stasiun GNSS. Titik merah adalah lokasi stasiun GNSS yang digunakan dalam penelitian.

3. Metodologi

3.1. Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dilakukan dengan mengolah data citra satelit ALOS-PALSAR dan data GNSS. Data citra SAR diolah untuk memperoleh citra interferogram sebagai dasar penentuan pergeseran vertikal. Data citra diolah dengan mempertimbangkan ada dan tidaknya koreksi ionosfer saat pengolahan data dilakukan. Selanjutnya, dilakukan pengolahan data GNSS untuk memperoleh data koordinat sebagai data acuan untuk validasi hasil pengolahan data citra SAR. Dari hasil pengolahan data baik dari citra SAR maupun data GNSS kemudian dilakukan perhitungan nilai pergeseran vertikal dan penentuan arah pergeserannya.

3.1.1. Pengolahan Data Citra SAR

Pengolahan data citra SAR menggunakan metode InSAR dilakukan dengan aplikasi GMTSAR (Sandwell et al., 2016). Citra yang digunakan memiliki dua temporal yang berbeda, yaitu citra *master* merupakan data sebelum terjadi gempa dan citra *slave* merupakan data setelah terjadi gempa. Pada penelitian ini, citra *master* yang digunakan pada tanggal 21 Juni 2007 dan citra *slave* pada tanggal 21 September 2007 seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi citra Satelit ALOS-PALSAR

Arah perekaman	Citra Master	Citra Slave	Scene
<i>Ascending</i>	21/07/2007	21/09/2007	1
<i>Ascending</i>	21/07/2007	21/07/2007	2

Kedua citra tersebut digabungkan untuk menghasilkan citra interferogram yang dapat diekstraksi menjadi nilai pergeseran vertikal. Untuk melakukan pengolahan data perlu menjalankan file konfigurasi dengan beberapa perintah berbasis UNIX. Gambar 4 menunjukkan tahapan lengkap proses pengolahan data citra satelit disajikan dalam bentuk pada diagram alir.

Setelah diperoleh hasil pengolahan data berupa citra interferogram, dilakukan perhitungan nilai pergeseran vertikal untuk mengetahui adanya pengaruh koreksi ionosfer terhadap pergeseran vertikal. Perhitungan nilai pergeseran vertikal dilakukan dengan persamaan (1) (Ali dkk., 2021).

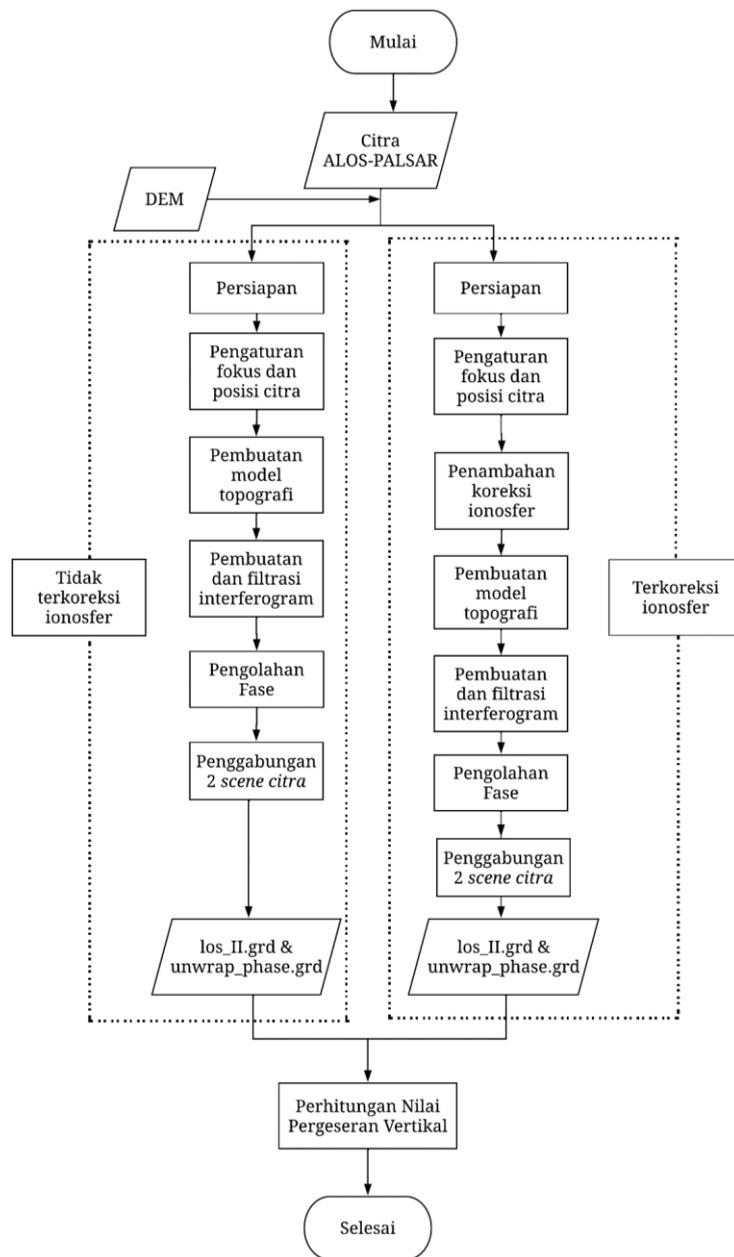
$$\text{Pergeseran Vertikal} = \frac{unw * \lambda}{-4\pi * \cos\theta} \quad (1)$$

Dalam hal ini, unw : nilai unwrapped phase, λ : panjang gelombang, dan θ : sudut insiden. Nilai unw merupakan vektor pergeseran yang diperoleh dari ekstraksi file `unwrap_mask_ll.grd`. Nilai panjang gelombang yang digunakan pada perhitungan sudut insiden adalah 23,6 cm sesuai dengan spesifikasi panjang gelombang pada citra satelit ALOS-PALSAR. Hasil perhitungan pergeseran vertikal memiliki satuan centimeter.

3.1.2. Pengolahan Data GNSS

Pengolahan data GNSS dilakukan dengan menggunakan mode statik pada aplikasi TBC (*Trimble Business Center*). Data GNSS yang digunakan memiliki dua tanggal pengamatan yang berbeda, yaitu

tanggal 21 Juni 2007 dan 21 September 2007 sesuai tanggal akuisisi data citra master dan slave. Informasi terkait data GNSS disajikan pada Tabel 2.



Gambar 4. Diagram alir pengolahan data citra SAR.

Tabel 2. Spesifikasi Data GNSS

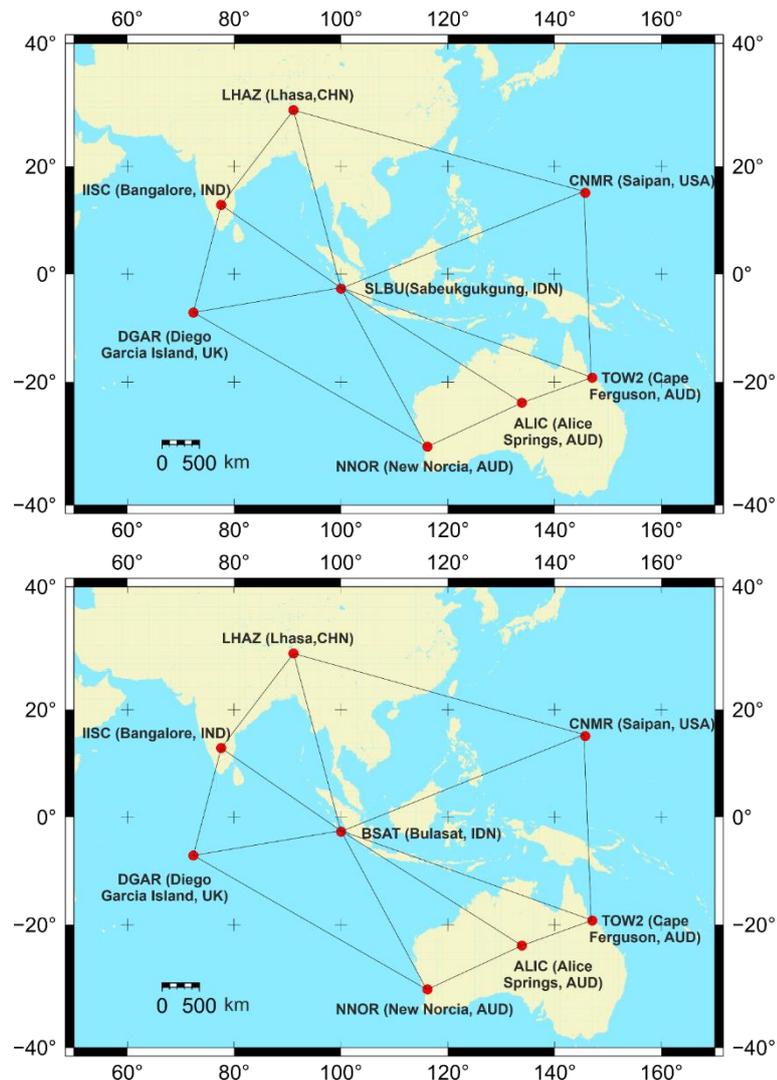
Stasiun	Tanggal Pengamatan	DOY (Day of Year)
BSAT	21/07/2007	197
BSAT	21/09/2007	264
SLBU	21/07/2007	197
SLBU	21/09/2007	264

Pengolahan data GNSS dilakukan untuk memperoleh koordinat titik stasiun SuGAR yaitu BSAT dan SLBU. Nilai koordinat dari hasil pengolahan data GNSS digunakan sebagai data acuan untuk dibandingkan dengan nilai koordinat hasil pengolahan citra satelit. Pengolahan GNSS dilakukan dengan menggunakan mode statik dengan jaring pengolahan seperti pada Gambar 5a dan 5b. Hasil pengolahan data GNSS berupa nilai koordinat latitude, longitude, dan ketinggian. Untuk memperoleh nilai pergeseran vertikal, nilai ketinggian saat DOY 264 dikurangkan dengan nilai ketinggian saat DOY 197. Nilai pergeseran vertikal tersebut dijadikan acuan dalam validasi hasil pengolahan citra satelit.

4. Hasil

4.1. Hasil Pengolahan Data Citra Satelit ALOS-PALSAR

Hasil pengolahan data citra Satelit ALOS-PALSAR dengan teknik InSAR adalah citra interferogram. Citra interferogram kemudian diekstraksi menghasilkan data fase seperti pada Gambar 6a dan 6b. Berdasarkan Gambar 6, fase yang diekstraksi dari citra interferogram memiliki informasi berupa fringe dengan siklus warna ungu menuju merah. Jika siklus warna dimulai dari warna ungu menuju merah menandakan bahwa telah terjadi uplift (kenaikan muka tanah). Sedangkan, jika siklus warna dimulai dari warna merah menuju ungu maka telah terjadi subsidence (penurunan muka tanah).

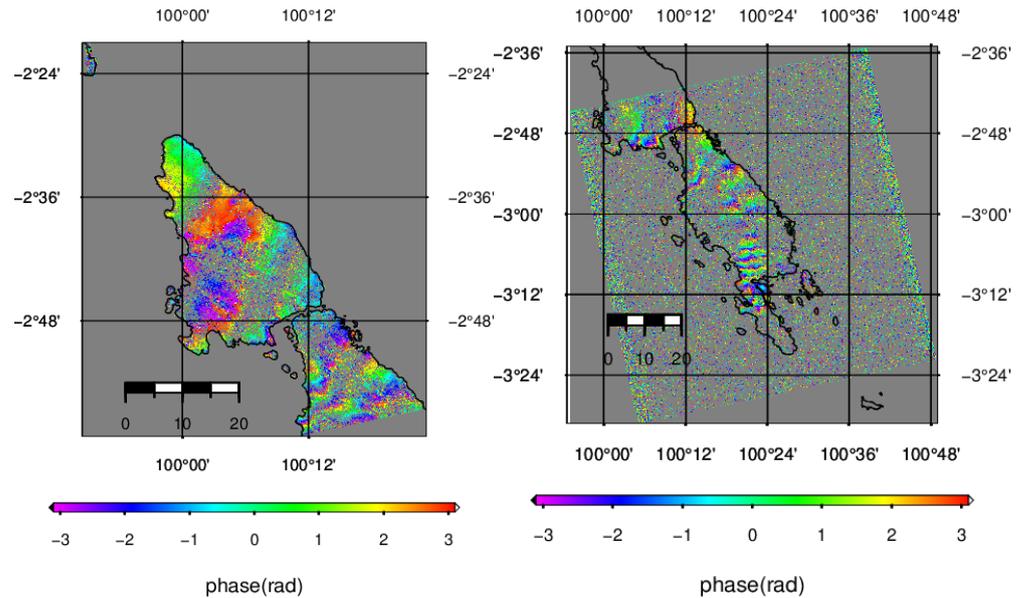


Gambar 5. Jaring Pengolahan Data GNSS. Titik merah merupakan lokasi stasiun GNSS.

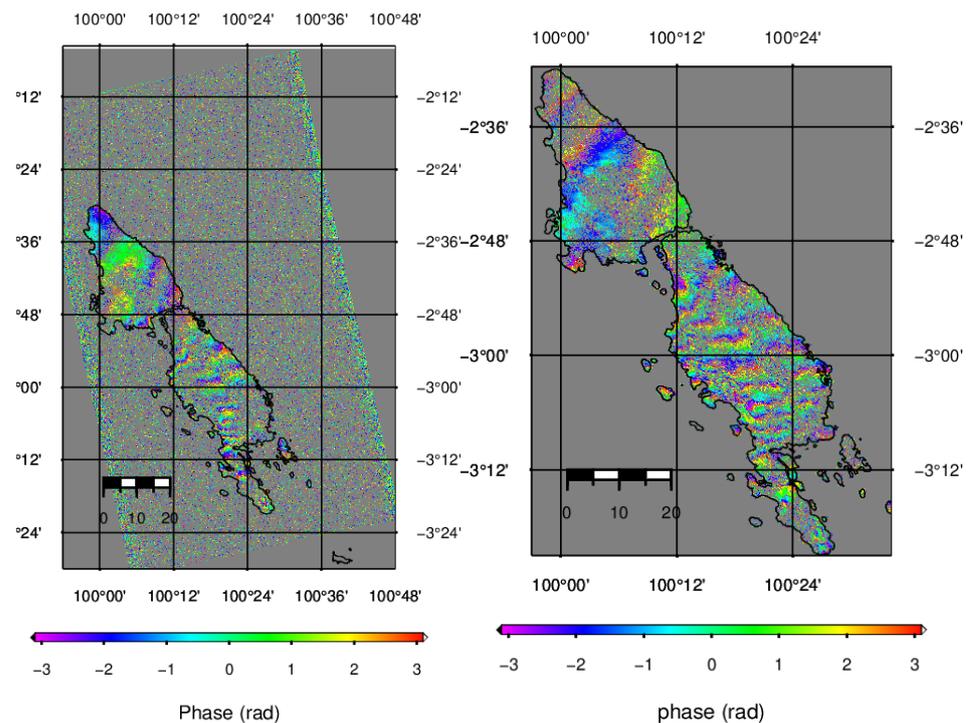
Area pada penelitian dicakup oleh dua lembar citra (Lihat Gambar 2). Dengan demikian dua lembar citra interferogram tersebut perlu digabungkan menjadi satu lembar citra untuk memudahkan dalam analisis nilai pergeseran vertikal. Hasil penggabungan dua lembar citra dapat dilihat pada Gambar 8.

Pada penelitian ini dilakukan pengolahan data citra satelit dengan melakukan dua pendekatan yaitu dengan mempertimbangkan ada dan tidaknya koreksi ionosfer. Kontribusi fase yang muncul dari lapisan ionosfer dimodelkan dan dihilangkan dengan menggunakan metode split-spectrum (Panuntun 2023). Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh koreksi ionosfer terhadap nilai pergeseran vertikal. Kedua hasil pengolahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8(a) dan Gambar 8(b).

Berdasarkan Gambar 7(a) fase yang tidak terkoreksi ionosfer memiliki sedikit *fringe* sebanyak 9 *fringe*, sedangkan fase yang terkoreksi ionosfer seperti pada Gambar 7(b) memiliki *fringe* yang jumlahnya lebih banyak yaitu 12 *fringe*. Semakin banyak jumlah *fringe* memiliki arti bahwa area tersebut memiliki nilai pergeseran yang lebih besar memiliki. Hal ini menandakan bahwa fase yang terkoreksi ionosfer lebih sensitif terhadap pergeseran vertikal.



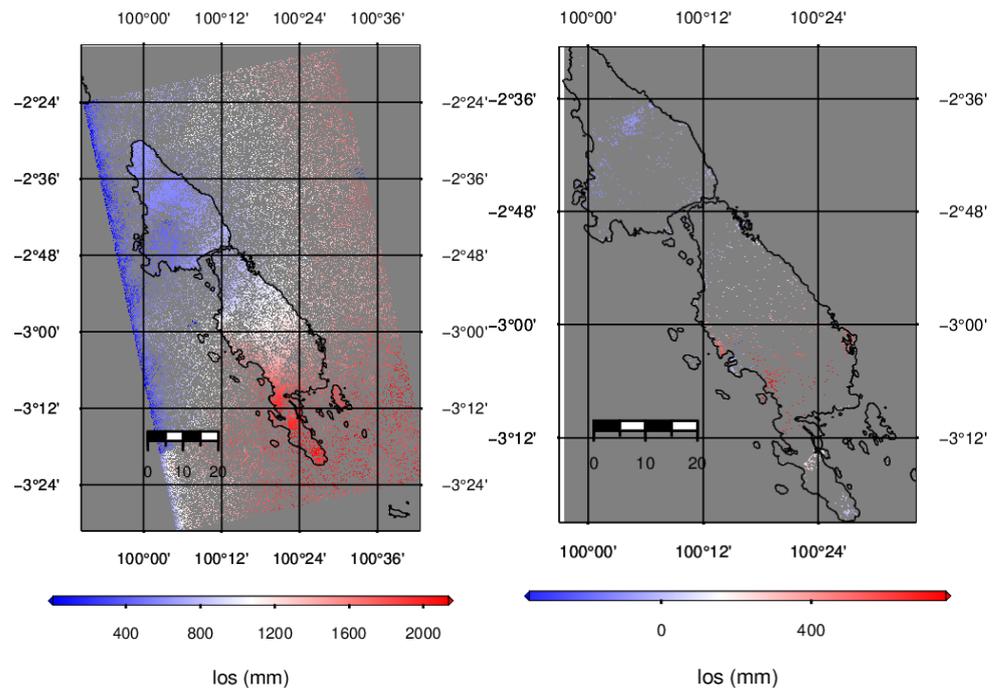
Gambar 6. Gambar 6(a) merupakan fase yang tercakup pada scene 1 citra satelit yaitu di Wilayah Pulau Pagai Utara dan gambar 6(b) menunjukkan fase yang tercakup pada scene 2 citra satelit yaitu di Wilayah Pulau Pagai Selatan.



Gambar 7. (a) Fase tidak terkoreksi dan (b) Fase terkoreksi

Fase yang diperoleh dari citra interferogram kemudian diekstraksi untuk menghitung berapa besar LOS displacement. komponen look vector yang terdapat pada LOS displacement digunakan untuk menghitung besar sudut insiden. Sudut insiden menjadi salah satu komponen yang diperlukan dalam perhitungan nilai pergeseran vertikal. LOS displacement yang dihasilkan ada 2 yaitu LOS displacement yang tidak terkoreksi ionosfer seperti pada Gambar 8(a) dan terkoreksi ionosfer seperti pada Gambar 8(b).

Berdasarkan Gambar 8(a) LOS displacement yang tidak terkoreksi ionosfer memiliki banyak noise, sedangkan fase yang terkoreksi ionosfer seperti pada Gambar 8(b) memiliki sedikit noise. Noise yang dimaksud adalah point cloud yang terlalu banyak pada area pengamatan. Hal ini menandakan bahwa LOS displacement yang terkoreksi ionosfer lebih terhindar dari bias sehingga memberikan kualitas nilai tiga dimensi untuk perhitungan nilai pergeseran vertikal yang lebih akurat.



Gambar 8. (a) LOS *displacement* tidak terkoreksi (b) LOS *displacement* terkoreksi. Warna merah menunjukkan area mengalami kenaikan muka tanah atau *uplift*. Warna biru menunjukkan area mengalami penurunan muka tanah atau *subsidence*.

Tabel 3. Pergeseran vertikal dari citra Satelit ALOS-PALSAR

Stasiun	Terkoreksi ionosfer (m)	Tidak terkoreksi ionosfer (m)
BSAT	-0,071	1,382
SLBU	-0,021	0,072

Berdasarkan Tabel 3. dapat diketahui bahwa terdapat pergeseran vertikal dari citra yang terkoreksi ionosfer pada stasiun BSAT sejauh -0,071 m. Sedangkan nilai pergeseran vertikal dari citra yang tidak koreksi ionosfer sejauh 1,382 m sehingga memiliki selisih pergeseran vertikal sejauh 1,311 m. Pergeseran vertikal dari citra terkoreksi ionosfer pada stasiun SLBU dengan sejauh -0,021 m. Sedangkan nilai pergeseran vertikal dari citra yang tidak koreksi ionosfer sejauh 0,072 m sehingga memiliki selisih pergeseran vertikal sebesar 0,050 m. Validasi hasil pengolahan data citra dilakukan dengan membandingkan hasil pengolahan nilai pergeseran vertikal dari citra satelit dengan data stasiun GNSS dengan nama BSAT dan SLBU.

4.2. Hasil Pengolahan Data GNSS

Hasil pengolahan data GNSS berupa koordinat pada stasiun BSAT dan SLBU. Kedua stasiun tersebut merupakan stasiun SuGAR yang terletak pada area penelitian sehingga dapat digunakan sebagai acuan penentuan nilai pergeseran vertikal. Dua stasiun tersebut diolah dengan diikatkan pada tujuh buah titik stasiun IGS dan menghasilkan nilai koordinat pada Tabel 4.

Tabel 4. Koordinat titik BSAT dan SLBU dari pengolahan data GNSS

Stasiun	Tanggal	Longitude (derajat)	Latitude (derajat)	Height (m)	Simpangan Baku (m)
BSAT	21/07/07	3,07669	100,28456	5,812	0,061
BSAT	21/09/07	3,07669	100,28456	5,779	0,041
SLBU	21/07/07	-2,76639	100,00972	3,663	0,030
SLBU	21/09/07	-2,76639	100,00972	2,981	0,046

Berdasarkan Tabel 4. dapat diketahui bahwa ketinggian titik stasiun BSAT sebelum gempa terjadi 5,812 m dan setelah terjadi gempa 5,779 m. Ketinggian titik stasiun SLBU sebelum gempa terjadi 3,663 m dan setelah terjadi gempa 2,981 m. Pergeseran vertikal dari hasil pengolahan data GNSS diperoleh dengan melakukan perhitungan sederhana yaitu mengurangi nilai ketinggian stasiun GNSS sesudah gempa dengan ketinggian stasiun GNSS sebelum gempa. Tabel 5 merupakan hasil perhitungan nilai pergeseran vertikal saat Gempa Bengkulu. Penelitian ini hanya berfokus pada aspek

penentuan posisi vertikal saja, sehingga hanya pergeseran secara vertikal yang dihitung. Nilai tersebut akan dibandingkan dengan nilai pergeseran vertikal pada citra satelit.

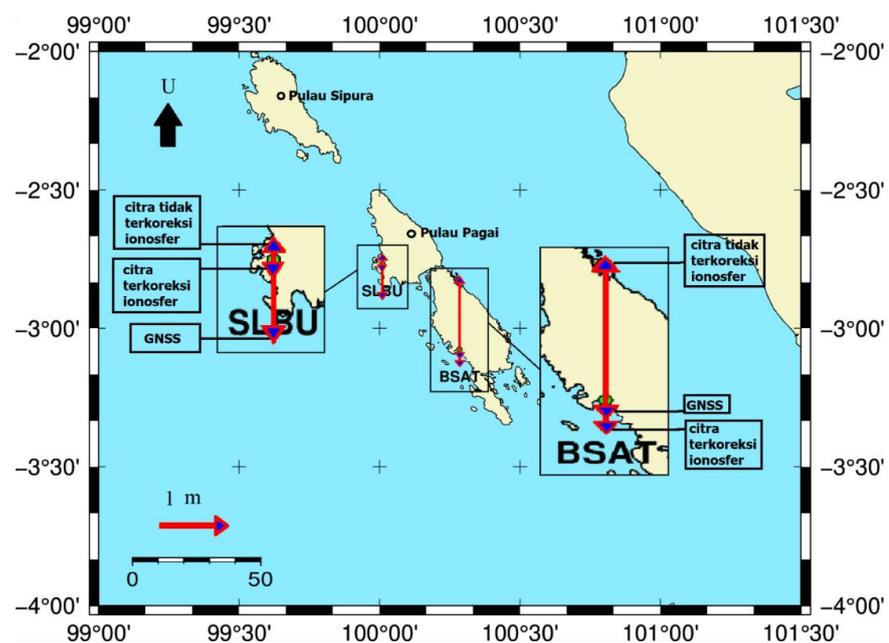
Tabel 5. Perbandingan nilai pergeseran vertikal

Stasiun	Pergeseran Vertikal (m)
BSAT	-0,033
BSAT	-0,682

Berdasarkan Tabel 5. dapat diketahui bahwa titik stasiun BSAT bergeser sejauh -0,033 m dan titik stasiun SLBU bergeser sejauh -0,682 m. Pergeseran vertikal dari hasil pengolahan data GNSS digunakan sebagai data acuan titik koordinat untuk dibandingkan dengan nilai pergeseran vertikal dari hasil pengolahan citra satelit dengan dan tanpa koreksi ionosfer.

4.3. Hasil Analisa Data

Dari hasil pengolahan data citra satelit dan GNSS dilakukan analisis data dengan membandingkan nilai pergeseran vertikal. Tabel 6. menunjukkan perbandingan nilai pergeseran vertikal dari data pengolahan GNSS serta nilai pergeseran vertikal dari data citra satelit yang terkoreksi dan tidak terkoreksi ionosfer. Untuk memudahkan dalam analisis data hasil pengolahan, dilakukan visualisasi data seperti gambar 9.



Gambar 9. Pergeseran Vertikal Gempa Bengkulu 12 September 2007. Panah berwarna merah merupakan pergeseran vertikal. Panah merah dengan arah utara menunjukkan pergeseran vertikal dari citra satelit yang tidak terkoreksi efek ionosfer. Panah merah dengan arah selatan merupakan pergeseran vertikal dari citra satelit yang terkoreksi efek ionosfer dan pergeseran vertikal dari GNSS. Titik berwarna hijau merupakan lokasi stasiun GNSS.

Tabel 6. Perbandingan nilai pergeseran vertikal

Stasiun	Pergeseran vertikal pada GNSS (m)	Pergeseran vertikal pada citra terkoreksi ionosfer (m)	Pergeseran vertikal pada citra tidak terkoreksi ionosfer (m)
BSAT	-0,033	-0,071	1,382
SLBU	-0,682	-0,021	0,072

Berdasarkan hasil pengolahan, terdapat perbedaan nilai dan arah pergeseran vertikal dari citra satelit terkoreksi dan tidak terkoreksi ionosfer. Nilai pergeseran vertikal pada stasiun BSAT dari hasil pengolahan data GNSS sebesar -0,033 meter, sedangkan dari hasil pengolahan citra dengan koreksi sebesar -0,071 meter dan tanpa koreksi ionosfer sebesar 1,382 meter. Hal ini menunjukkan bahwa arah pergeseran vertikal dari citra satelit terkoreksi ionosfer konsisten terhadap hasil pengolahan GNSS yaitu *subsidence*. Sedangkan, pergeseran vertikal pada citra satelit tidak terkoreksi ionosfer arah pergeserannya berbanding terbalik dengan hasil pengolahan GNSS yaitu *uplift*.

5. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengolahan, terdapat perbedaan nilai dan arah pergeseran vertikal dari citra satelit terkoreksi dan tidak terkoreksi ionosfer. Gambar 10 menunjukkan pergeseran vertikal yang terjadi saat Gempa Bengkulu 12 September 2007 pada stasiun BSAT dan SLBU. Nilai pergeseran vertikal pada stasiun BSAT dari hasil pengolahan data GNSS sebesar -0,033 meter, sedangkan dari hasil pengolahan citra dengan koreksi sebesar -0,071 meter dan tanpa koreksi ionosfer sebesar 1,382 meter. Hal ini menunjukkan bahwa arah pergeseran vertikal dari citra satelit terkoreksi ionosfer konsisten terhadap hasil pengolahan GNSS yaitu *subsidence*. Sedangkan, pergeseran vertikal pada citra satelit tidak terkoreksi ionosfer arah pergeserannya berbanding terbalik dengan hasil pengolahan GNSS yaitu *uplift*.

Hal serupa juga terjadi pada nilai pergeseran vertikal di stasiun BSAT, dari hasil pengolahan data GNSS sebesar -0,682 meter, sedangkan dari hasil pengolahan citra dengan koreksi sebesar -0,021 meter dan tanpa koreksi ionosfer sebesar 0,072. Artinya pergeseran vertikal pada citra satelit terkoreksi ionosfer konsisten terhadap arah pergeseran vertikal dari hasil pengolahan GNSS yaitu *subsidence* sejauh 0,021 meter. Sedangkan, pergeseran vertikal pada citra satelit tidak terkoreksi ionosfer arah pergeserannya berbanding terbalik dengan hasil pengolahan GNSS yaitu *uplift* sejauh 0,072 meter.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa koreksi ionosfer berpengaruh terhadap hasil pengolahan data citra satelit. Koreksi ini perlu dilakukan untuk menghilangkan bias sehingga hasil pengolahan nilai pergeseran vertikal tidak mengandung kesalahan. Terdapat perbedaan nilai dan juga arah pergeseran vertikal dari citra yang tidak terkoreksi dan terkoreksi ionosfer karena lapisan ionosfer menyebabkan percepatan perambatan yang tidak stabil pada gelombang sehingga bisa menyebabkan anomali gelombang yang sampai ke permukaan.

6. Kesimpulan

Noise yang disebabkan oleh ionosfer berpengaruh terhadap hasil pengolahan InSAR. Hal ini tunjukkan dengan banyaknya *point cloud* pada *fase* yang tidak terkoreksi. Yang berarti citra mengandung bias sehingga menyebabkan kesalahan interpretasi nilai pergeseran vertikal. Arah pergeseran vertikal dari hasil pengolahan citra SAR dengan koreksi ionosfer berlawanan arah terhadap arah pergeseran dari hasil pengolahan citra SAR tanpa koreksi ionosfer. Pergeseran vertikal pada stasiun BSAT dari hasil pengolahan citra dengan koreksi ionosfer sebesar -0,071 meter dan tanpa koreksi ionosfer sebesar 1,382 meter, sedangkan dari hasil pengolahan data GNSS sebesar -0,033 meter. Pergeseran vertikal pada stasiun SLBU dari hasil pengolahan citra dengan koreksi ionosfer sebesar -0,021 meter dan tanpa koreksi ionosfer sebesar 0,072 meter, sedangkan dari hasil pengolahan data GNSS sebesar -0,682 meter. Arah pergeseran vertikal dari hasil pengolahan citra SAR dengan koreksi ionosfer konsisten terhadap arah pergeseran vertikal dari hasil pengolahan GNSS, sedangkan arah pergeseran vertikal dari hasil pengolahan citra SAR tanpa koreksi ionosfer tidak konsisten terhadap GNSS. Hasil ini menunjukkan bahwa koreksi ionosfer perlu dilakukan dalam pengolahan citra SAR untuk penentuan pergeseran vertikal agar hasil pengolahannya tidak mengandung bias.

7. Acknowledgment

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Pratika Linoria dan Professor Xiaohua Xu atas bantuannya sehingga peneliti dapat menyusun penelitian ini dengan baik.

8. Daftar Pustaka

- Ali, M., Muhammad Imran Shahzad, M. N., Mahmood, I., & Zia, I. (2021). Estimation of surface deformation due to Pasni earthquake using RADAR interferometry. *Geocarto International*, 36(14), 1630–1645. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1661031>
- Biggs, J., & Wright, T. J. (2020). How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade. *Nature Communications*, 11(1), 10–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17587-6>
- Ding, X. L., Li, Z. W., Zhu, J. J., Feng, G. C., & Long, J. P. (2008). Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation. *Sensors*, 8(9), 5426–5448. <https://doi.org/10.3390/s8095426>
- Gusman, A. R., Tanioka, Y., Kobayashi, T., Latief, H., & Pandoe, W. (2010). Slip distribution of the 2007 Bengkulu earthquake inferred from tsunami waveforms and InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(12), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2010JB007565>
- Hanssen, R. F. (2018). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. In *Novel Radar Techniques and Applications*. https://doi.org/10.1049/SBRA512F_ch6
- Islami, N. (2017). Deformasi dan Struktur Batuan. *Fisika Bumi*, 183–200.

- Panuntun, H., Prasidya, A. S., & Mahendra, G. (2022). Present-Day Surface Deformation along the Opak Fault, Yogyakarta, Observed Using Sentinel-1 Interferometric Wide-Swath Data. *Technology for Sustainable Development*, 112(May 2006), 75–81. <https://doi.org/10.4028/p-e3jij9>
- Panuntun H (2023) The 2021 Mw 7.2 Haiti earthquake: Blind thrust rupture revealed by space geodetic observations and Bayesian estimation. *Journal of Geodynamics* 158:101996. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.101996>
- Panuntun H, Heliani LS, Suryanto W, and Pratama C (2022) Importance of Tropospheric Correction to C-band InSAR Measurements: Application in the 2018 Palu Earthquake. *Indonesian Journal of Geography* 50 (3):207-213. doi:10.22146/ijg.68984
- Parker, A. L. (2017). InSAR Observations of Ground Deformation (Issue D). <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-39034-5>
- Sandwell, D., Mellors, R., Xiaopeng, T., Xiaohua, X., Wei, M., & Wessel, P. (2016). GMTSAR: An InSAR Processing System. 1–107. https://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR_2ND_TEX.pdf
- Tanner, D. C., & Brandes, C. (2019). Understanding Faults: Detecting, Dating, and Modeling. In *Understanding Faults: Detecting, Dating, and Modeling*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815985-9.00001-1>
- Zhang, B., Wang, C., Ding, X., Zhu, W., & Wu, S. (2018). Correction of ionospheric artifacts in SAR data: Application to fault slip inversion of 2009 Southern Sumatra earthquake. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(9), 1327–1331. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2844686>
- Zhang B, Wang C, Ding X, Zhu W, and Wu S (2018) Correction of Ionospheric Artifacts in SAR Data: Application to Fault Slip Inversion of 2009 Southern Sumatra Earthquake. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 15 (9):1327-1331. doi:10.1109/LGRS.2018.2844686