

Korelasi Data Citra Satelit Radar dan Geologi Untuk Analisis Deformasi Permukaan, Studi Kasus Gempa Ambon September 2019

(Correlation of Radar Satellite Image and Geological Data for Surface Deformation Analysis, A Case Study Ambon Earthquake on September 2019)

Erwin Bakker^{1*}, Saskia Pattilouw¹, Dennis Tanikwele¹, David Tuhumury¹, Chantyara Ayal¹, Virginia Ulorlo¹

¹Program Studi Teknik Geologi Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka Ambon, Indonesia, 97233

Dikirim:
19 Oktober 2022

Direvisi:
16 Januari 2023

Diterima:
25 Januari 2023

* Email Korespondensi:
erwin.bakker16@gmail.com



Abstrak: Maluku terletak di antara tiga lempeng dunia yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik yang menyebabkan terbentuknya tatanan geologi Pulau Maluku yang kompleks dan berpotensi tinggi terjadinya bencana gempa bumi salah satunya gempa Ambon 26 September 2019. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi terkait perubahan permukaan paskah terjadinya gempa yang melanda Ambon pada 26 September 2019. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan DInSAR dengan mengolah citra SAR Sentinel-1. Hasil analisis citra tersebut menunjukkan gempa tersebut menyebabkan terjadinya penurunan muka tanah (subsidence) dengan nilai deformasi berkisar -8 cm sampai -14 cm pada daerah Tulehu dan Liang. Daerah Liang dan Tulehu didominasi oleh batuan sedimen yaitu batugamping dan endapan aluvial yang berumur Kuartar yang dapat memperkuat efek guncangan sehingga rawan terjadi guncangan gempa bumi yang berdampak pada deformasi yang terjadi di daerah tersebut. Sedangkan pada daerah di sekitarnya yang juga terkena dampak deformasi yaitu Pulau Haruku mengalami kenaikan muka tanah (uplift) dengan nilai deformasi berkisar +4 cm sampai +10 cm. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai sumber referensi dalam pemantauan dan pemulihan berdasarkan sejarah gempa yang terjadi di Pulau Ambon yang sangat berguna dalam mitigasi bencana untuk mengurangi risiko dari dampak yang ditimbulkan akibat gempa bumi, di masa mendatang.

Kata kunci: Ambon, deformasi, DInSAR, gempa bumi, Sentinel-1

Abstract: Maluku Province is located between 3 tectonic plates which are Eurasian Plate, Indo-Australian Plate, and Pacific Plate, this created a complex tectonic condition and a great risk of earthquake occurrence in the area of Maluku. One of the great earthquakes that had happened was in Ambon 26 September 2019. This research aimed to provide information about the spatial changes of the surface after the earthquake occurred. This research was based on the approach of DInSAR by processing SAR Sentinel 1. The result showed that the earthquake has caused land subsidence with deformation values around 8 cm to 14 cm in Liang and Tulehu. The area of Tulehu and Liang are predominantly dominated by Quaternary sedimentary rocks like limestones and alluvium deposits which could amplify the earthquake waves on the surface of those areas. On the other hand, the earthquake that happened has caused the area of Haruku Island uplifted, with deformation values around 4 cm to 10 cm. The results of this research can be used as a reference for monitoring and recovery of the impacted areas during the mitigation process especially in reducing the risk of earthquake impacts in the future.

Keywords: Ambon; deformation; DInSAR; earthquake; Sentinel-1

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang paling merusak, terjadi dengan frekuensi tinggi dan dalam skala global. Beberapa kejadian gempa bumi relatif kecil dan mungkin tidak dapat dirasakan oleh manusia. Namun ketika derajat kekuatan gempa bumi mencapai skala tertentu, kekuatan destruktif gempa bumi sangat besar. Pada saat yang sama disertai dengan serangkaian bencana sekunder seperti gerakan tanah, letusan gunung api, tsunami, dan lainnya yang sangat mengancam keselamatan jiwa dan harta benda, serta menimbulkan kerusakan yang besar terhadap lingkungan (Altan dkk., 2001).

Pada umumnya ketika terjadi gempa bumi, masyarakat hanya diberi informasi mengenai kapan gempa terjadi, besarnya magnitudo, dan lokasi

gempa. Sedangkan untuk informasi tentang deformasi permukaan tanah butuh penelitian lebih lanjut untuk mengetahuinya. Deformasi permukaan tanah dapat berdampak buruk dan parah pada struktur dan infrastruktur permukaan karena perbedaan penurunan elevasi tanah, kemiringan tanah, dan retakan tanah (Ferguson dkk., 2015). Pengamatan penurunan tanah penting untuk memahami fenomena geologi yang mendasari atau penyebab yang disebabkan oleh manusia. Oleh karena itu, pengukuran deformasi permukaan dapat memberikan informasi yang sangat penting untuk perlindungan keselamatan dan infrastruktur serta untuk pencegahan bahaya geologi lainnya (Aslan, 2019).

Dalam Upaya mitigasi bahaya gempa bumi, memperoleh peta kerusakan gempa bumi yang baik merupakan sesuatu hal yang penting guna mengidentifikasi dan menilai kerusakan sipil. Namun, dalam pekerjaan mengidentifikasi dan menilai kerusakan akibat gempa, survei lapangan sangat berisiko dan tidak efisien (Anniballe dkk., 2018). Sehingga perlu dilakukan studi lanjut yang lebih meminimalkan risiko dan skala pemetaan yang bersifat regional.

Tuntutan pengamatan lapangan segera setelah kejadian gempa bumi, guna meminimalisir risiko paskah gempa maka teknik pemetaan penginderaan jauh dapat digunakan untuk mendeteksi deformasi permukaan akibat gempa. Dengan perkembangan teknologi teknik penginderaan jauh dapat memberikan pengamatan lapangan yang penting baik dalam aspek penilaian bencana, penyelamatan dan bantuan, serta pemulihan dan rekonstruksi karena memiliki keunggulan mengurangi risiko pada saat pemetaan, pengambilan data cepat dan temporal, serta cakupan data yang luas dan tidak terpengaruh oleh kondisi alam (Sun dkk., 2022).

Salah satu citra penginderaan jauh yang akurat dan ekonomis adalah citra radar. Teknik pemrosesan citra radar untuk mendapatkan

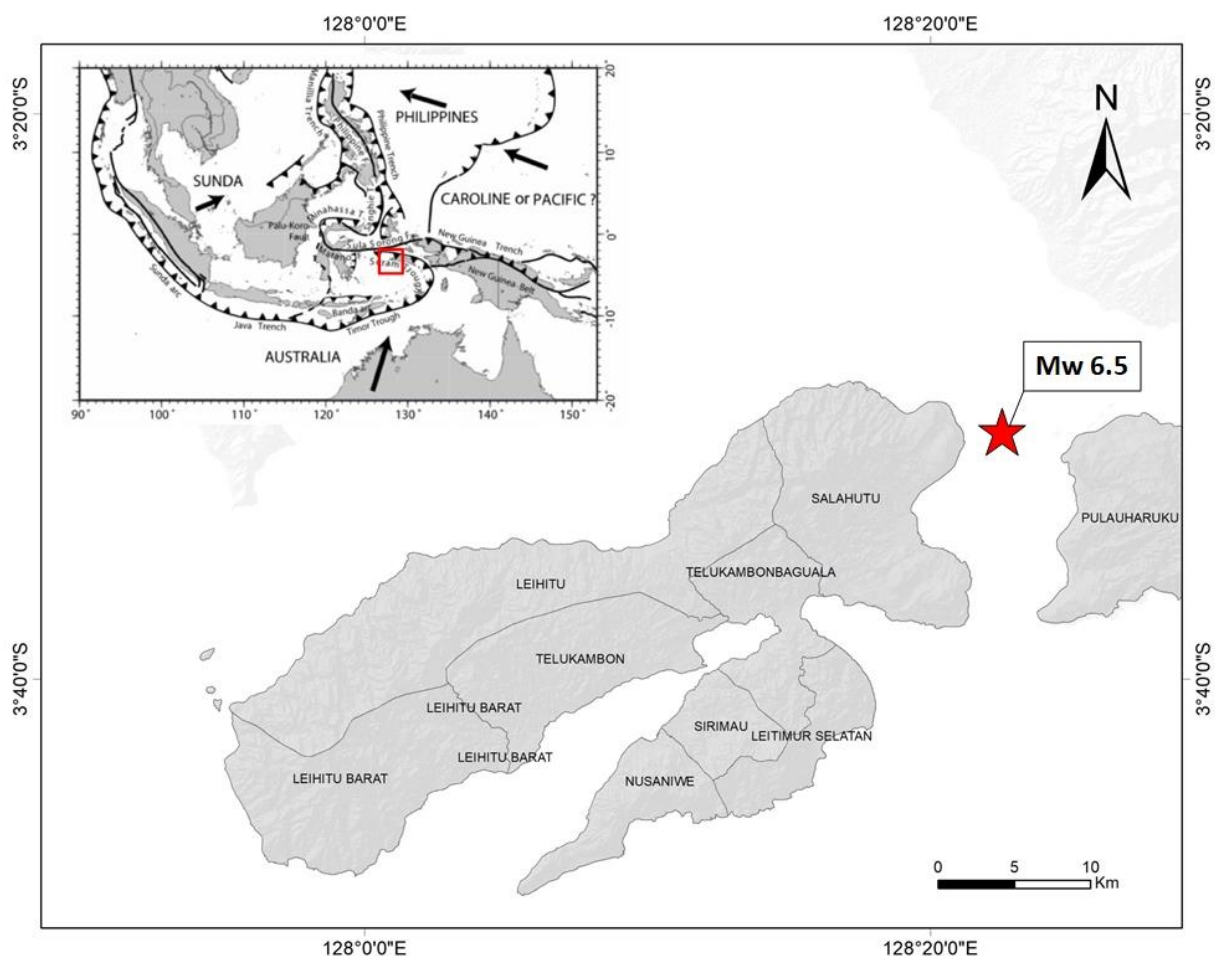
deformasi permukaan dapat dilakukan dengan metode DInSAR. Teknik ini menganalisis jumlah dan kisaran deformasi permukaan di seluruh area yang diteliti dan juga memberikan pemantauan secara temporal (Sui dkk., 2020). Metode analisis DInSAR dapat mencapai akurasi hingga milimeter, sehingga metode tersebut baik dalam mendeteksi deformasi permukaan (Akbar & Setiawan, 2022; Braun, 2021).

Maka berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi terkait perubahan permukaan dengan pendekatan DInSAR dalam memantau deformasi akibat gempa Ambon 26 September 2019.

2. BAHAN DAN METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini berfokus pada lokasi Pulau Ambon yang secara administratif merupakan Ibukota Provinsi Maluku, yang pada tanggal 26 September 2019 diguncang gempa dengan Magnitudo 6.5 (Gambar 1). Episenter gempa bumi terletak pada koordinat 3.43°LS-128.46°BT pada kedalaman 10 km. Gempa bumi tersebut mengakibatkan efek guncangan pada beberapa daerah dengan intensitas gempa pada skala V-VI *Mercalli Modified Intensity* (MMI) (BMKG, 2019).



Gambar 1. Lokasi penelitian yang ditunjukkan kotak merah pada inset peta batas lempeng tektonik Indonesia

2.2. Kerangka Tektonik Pulau Ambon

Kawasan Timur Indonesia ialah salah satu kawasan sangat dinamis di Indonesia sebab terdapatnya interaksi antara 3 lempeng utama yakni Lempeng Eurasia, Pasifik, serta Indo- Australia semenjak Oligosen Akhir (Hall, 2012; Pownall dkk., 2013; Watkinson dkk., 2012). Zona pertemuan ketiga lempeng tersebut membentuk palung yang memiliki kedalaman antara 4.500-7.000 meter yang disebut dengan zona subduksi (Supartoyo dkk., 2014). Interaksi ketiga lempeng tersebut menghasilkan sebuah busur tektonik yang dikenal dengan Busur Banda (*Banda Arc*).

Busur Banda terdiri dari palung, busur vulkanik dalam, serta pulau busur luar (Spakman & Hall, 2010), yang merupakan salah satu busur aktif akibat subduksi *island arc* dan kerak benua. Ciri geologi utama Busur Banda terdiri dari busur vulkanik dalam dan busur luar non-vulkanik yang terbentuk dari batuan sedimen, batuan metamorf, dan beberapa batuan beku yang umumnya berumur Permian-Kuarter. Busur vulkanik bagian dalam telah aktif sejak Miosen Akhir (Lewerissa dkk., 2017). Pulau Ambon dan Pulau Haruku termasuk Busur Banda Dalam, dan termasuk ke dalam Orogen Maluku (Hermawan & Yushantarti, 2010). Keaktifan tektonik Busur Banda menghasilkan terbentuknya tatanan geologi yang kompleks dan memiliki tingkat kerawanan bencana gempa bumi karena dipengaruhi oleh pergerakan tiga lempeng tektonik.

2.3. Deformasi Permukaan

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Deformasi pada tanah dapat terjadi karena beberapa sebab. Beberapa penyebab terjadinya deformasi antara lain; berkurangnya massa di bawah permukaan akibat pengambilan mineral bumi atau air tanah yang berlebihan (Yulyta dkk., 2015), volume tanah pada suatu tempat yang bertambah akibat proses sedimentasi dan juga gempa bumi yang timbul oleh karena pergerakan lempeng bumi.

2.4. Data

2.4.1. Citra Satelit Sentinel-1A

Deteksi deformasi permukaan yang terjadi akibat gempa pada daerah penelitian dilakukan dengan menggunakan citra penginderaan jauh. Dalam penelitian ini citra yang digunakan yaitu citra Sentinel 1A C-Band dari *European Space Agency* (ESA) yang disediakan dalam database *Copernicus Sentinel-1 SAR* dan citra *Digital Elevation Model* (DEM) dari ALOS PALSAR dari *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) dengan resolusi spasial 12,5 meter. Kedua citra tersebut dapat diakses secara gratis melalui <https://asf.alaska.edu/>. Deskripsi data citra yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Deskripsi data citra satelit yang digunakan

Sensor	Akuisisi	Pol	Tipe
Sentinel 1A	6 Agustus 2019	VV	SLC
	28 Desember 2019	VV	SLC
ALOS PALSAR	30 September 2008	HH+HV	DEM
	13 September 2008	HH+HV	DEM

2.4.2 Deteksi Deformasi Permukaan

Menggunakan Metode DInSAR

Deteksi deformasi permukaan akibat gempa dapat dilakukan dengan menganalisis sepasang atau lebih data SAR yang diambil pada saat sebelum dan sesudah gempa terjadi. Aplikasi metode DInSAR dapat digunakan untuk memetakan area deformasi *co-seismic*, yang kemudian dapat mengestimasi lokasi gempa, geometri patahan dan dinamika. DInSAR dapat memetakan dengan cepat deformasi permukaan setelah gempa (misalnya deformasi *post-seismic*), yang memberikan informasi penting untuk menentukan sifat kerak dan mantel atas (Biggs dkk., 2009). Dengan menggabungkan pemrosesan DInSAR, seismologi, geofisika, serta geodesi diharapkan dapat memberikan informasi penting dalam memahami gempa bumi serta mitigasinya (Wright, 2004).

Teknik pemrosesan citra satelit untuk mendapatkan deformasi permukaan menggunakan data radar dilakukan dengan menggunakan *Diferensial Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR). Teknik DInSAR menggunakan pasangan dari citra satelit SAR yang diakuisisi dalam posisi dan waktu berbeda. Dengan mengetahui bentuk topografi memungkinkan untuk substraksi komponen fase topografi dengan mengukur deformasi (Mura dkk., 2014). Gambar 2 menunjukkan tahapan pemrosesan DInSAR menggunakan *SARScape Module*.

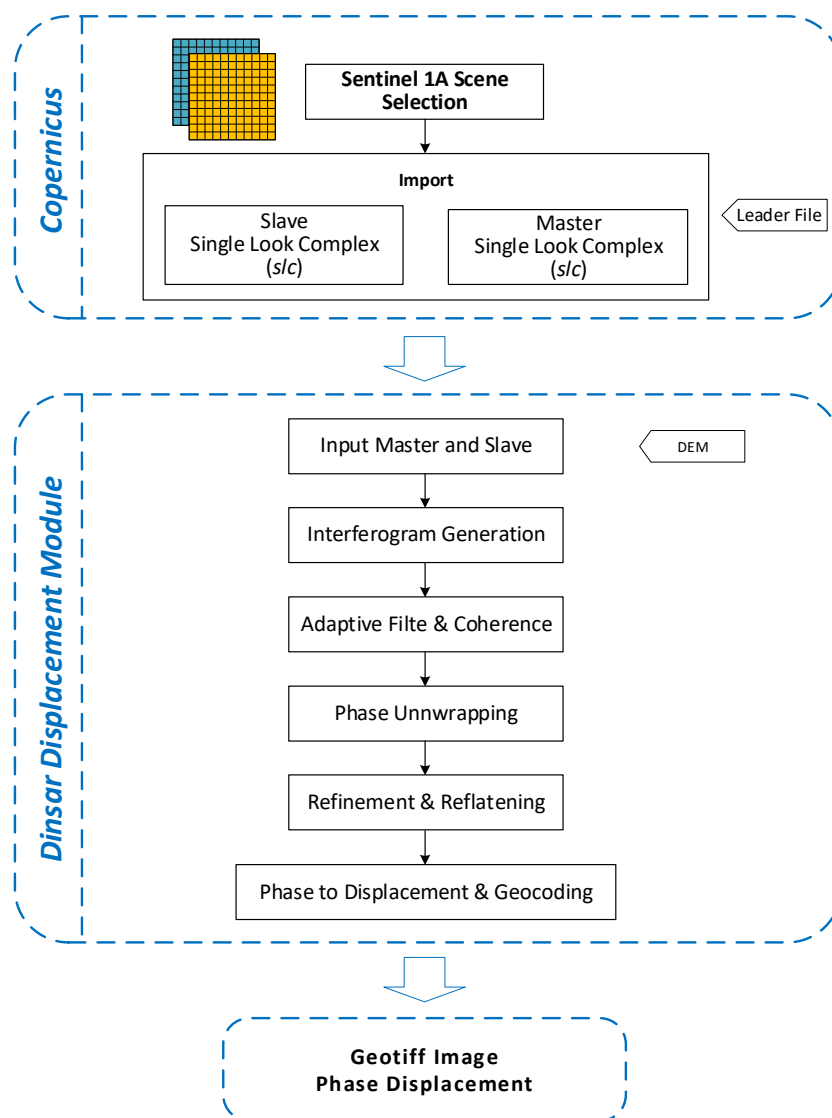
Diferensial interferogram diberikan oleh persamaan *ground displacement* akuisisi dan komponen lain.

$$\phi_{\Delta t} = \phi_{def} + \phi_h + \phi_{atm} + \phi_{\beta} + \phi_{\eta} \quad (1)$$

dengan,

- ϕ_{def} : perubahan *phase* dari piksel oleh arah satelit *line of sight* (LOS)
- ϕ_h : *error phase* topografi
- ϕ_{atm} : *phase delay* akibat atmosfer
- ϕ_{β} : *residual phase*
- ϕ_{η} : gangguan *phase*

Ketika ϕ_{def} melebihi empat komponen fase lain pada persamaan 1 pengukuran deformasi permukaan dapat dilakukan dengan baik. Oleh karena itu pemilihan data DEM dengan spasial resolusi yang baik dapat mengurangi kesalahan fase topografi. Gambar deformasi yang dihasilkan dari pemrosesan SAR berasal dari komponen fase dari dua atau beberapa gambar SAR yang saling tumpang tindih.



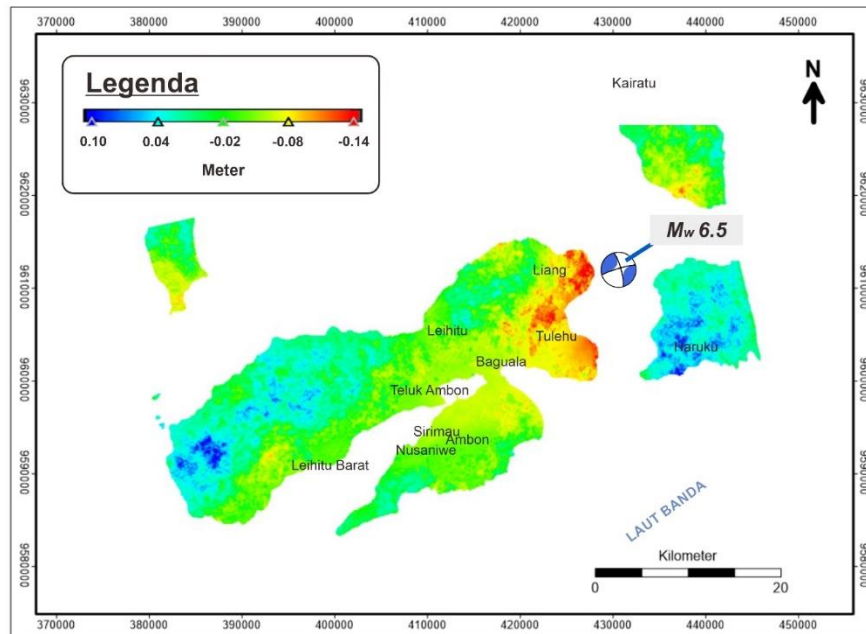
Gambar 2. Pemrosesan citra SAR dengan *Workflow Dinsar Displacement module SARscape*

Perekaman data SAR dilakukan oleh sensor yang tampak samping, sehingga InSAR menggambarkan perpindahan permukaan bumi dalam arah LOS yang mencakup gerakan vertikal dan horizontal. Sudut perekaman satelit SAR yang kurang dari 45° vertikal, sehingga perpindahan LOS dalam gambar deformasi DInSAR lebih sensitif terhadap gerakan vertikal (pengangkatan atau penurunan permukaan) daripada gerakan horizontal. Dengan demikian dengan mengkorelasi data pengukuran deformasi di lapangan contohnya data *Global Positioning System* (GPS) dengan gambar deformasi spasial yang dihasilkan oleh data InSAR akan memberikan hasil pengamatan yang lebih presisi dengan cakupan yang lebih luas. Keunggulan DInSAR adalah dapat memberikan peta deformasi permukaan bumi berskala sentimeter pada area seluas ratusan kilometer persegi dengan resolusi spasial 3-30 m (Yastika & Shimizu, 2016).

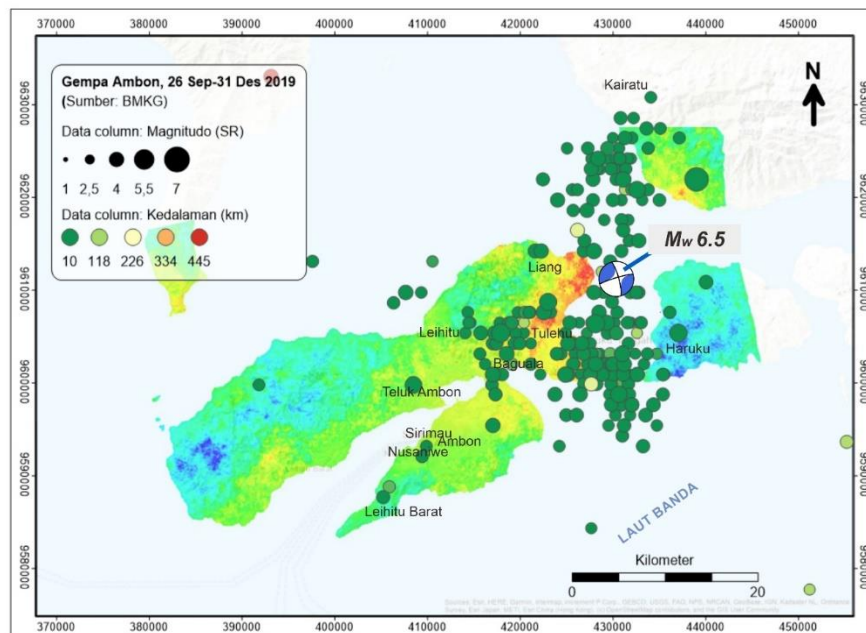
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Deformasi Permukaan.

Pengolahan citra Sentinel-1 dengan metode DInSAR, dapat memetakan sebaran nilai deformasi permukaan yang terjadi di wilayah Pulau Ambon dan sekitarnya akibat Gempa 26 September 2019. Hasil yang diperoleh pada Gambar 3A menunjukkan deformasi umumnya terjadi di bagian Barat Laut Pulau Ambon dan sekitarnya yang mana wilayah tersebut dekat dengan pusat gempa dan jalur sesar aktif berarah timur laut - barat daya yang ditunjukkan pada Peta Geologi Daerah Tulehu (Nasution dkk., 2015). Hal ini juga didukung oleh data persebaran gempa bumi yang mana pada daerah tersebut sering terjadi gempa (Gambar 3B). Penurunan muka tanah (*subsidence*) terjadi pada bagian Timur Laut Pulau Ambon yaitu di daerah Liang dan Tulehu dengan nilai deformasi berkisar - 8 cm sampai -14 cm. Sedangkan pada daerah di sekitarnya yang juga terkena dampak deformasi yaitu Pulau Haruku. Pulau tersebut mengalami kenaikan (*uplift*) dengan nilai deformasi berkisar +4 cm sampai +10 cm.



(A)



(B)

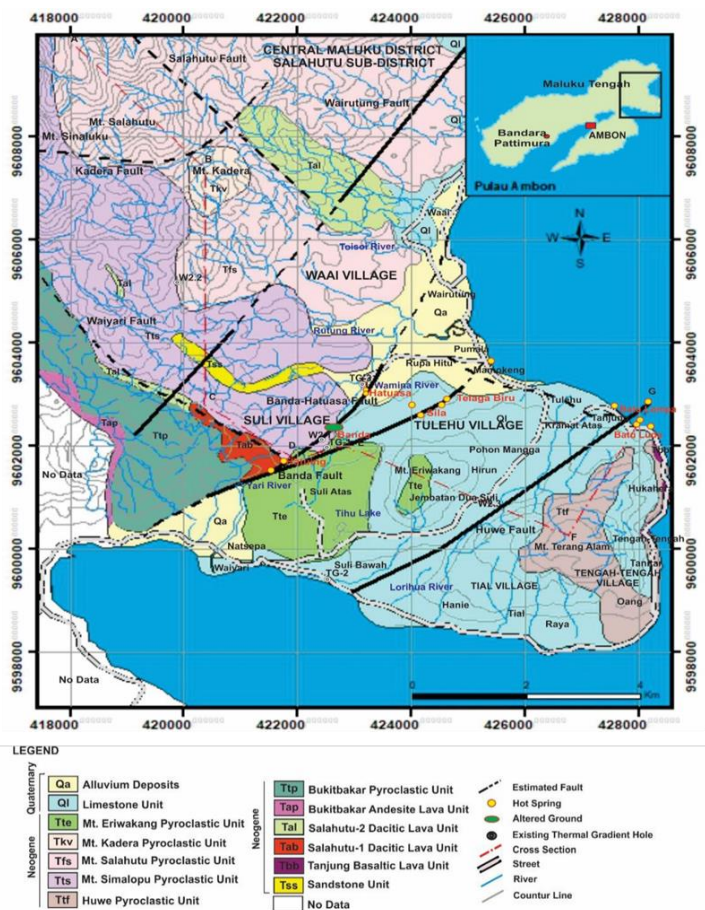
Gambar 3. (A) Peta deformasi permukaan akibat gempa Ambon September 2019 menggunakan metode DInSAR, dan (B) overlay data titik gempa dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG)

3.2. Korelasi Antara Deformasi Permukaan dan Geologi.

Ditinjau dari aspek geologi, deformasi permukaan pada daerah Liang dan Tulehu selain karena intensitas kejadian gempa yang tinggi pada juga dipengaruhi oleh faktor litologi penyusun daerah tersebut. Dari data singkapan batuan di lapangan. Litologi penyusun didominasi oleh endapan aluvial dan batugamping (Gambar 5). Endapan aluvial berukuran pasir sampai kerakal yang belum terkonsolidasi akan mempermudah kerusakan bangunan di atasnya apabila dikenai getaran akibat gempa. Litologi lain yaitu batugamping yang disusun oleh fragmen bioklastik

sehingga memiliki porositas yang baik. Ruang rongga yang menghasilkan porositas tersebut dapat mempermudah sekaligus memperkuat gelombang gempa (*amplification*).

Studi *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) oleh (Lokollo dkk., 2020), pada Negeri Liliboy dan Alang di bagian barat Pulau Ambon sekitar 40 km dari pusat gempa 29 September 2019. Menghasilkan nilai kerentanan tanah tinggi terjadi resiko retakan struktur tanah pada litologi yang sama dengan daerah Tulehu dan Liang yaitu endapan aluvial dan batugamping bioklastik yang juga hampir mendominasi pesisir Pulau Ambon.



Gambar 4. Peta Geologi daerah Tulehu (Nasution dkk., 2015), yang menggambarkan batuan pada daerah tersebut didominasi oleh batugamping dan endapan aluvial



Gambar 5. (A) Singkapan batugamping pada daerah Liang dan Tulehu. (B) Sampel batugamping bioklastik yang memperlihatkan porositas baik. (C) Endapan aluvial yang terdiri yang berukuran pasir sampai kerakal

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Pengolahan citra Sentinel-1 dengan metode DInSAR maka, diperoleh nilai deformasi yang terjadi akibat gempa Ambon 26 September 2019 menyebabkan daerah yang umumnya terjadi deformasi adalah Daerah Liang, Tulehu dan sekitarnya. Berdasarkan aspek geologinya daerah Liang dan Tulehu didominasi oleh batuan sedimen yaitu batugamping dan endapan aluvial yang berumur Kuarter yang dapat memperkuat efek guncangan di daerah tersebut. Daerah Liang dan Tulehu mengalami penurunan muka tanah (*subsidence*) berkisar -8 cm sampai -14 cm. Sementara pada daerah di sekitarnya yaitu Pulau Haruku mengalami kenaikan (*uplift*) dengan nilai deformasi berkisar +4 cm sampai +10 cm. Hal ini didukung oleh letaknya yang berdekatan dengan pusat gempa dan jalur sesar aktif yang berarah timur laut-barat daya sehingga menyebabkan gempa yang sering terjadi di daerah ini. Penggunaan metode DInSAR dan hasil yang diperoleh pada penelitian ini juga dapat menjadi sumber referensi dalam pemantauan dan pemulihan berdasarkan sejarah gempa yang terjadi di Pulau Ambon yang sangat berguna dalam mitigasi bencana untuk mengurangi resiko dari dampak yang ditimbulkan akibat gempa bumi, di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada *Alaska Satellite Facility* (ASF) yang telah menyediakan Citra Sentinel-1, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika untuk mengakses data gempa bumi, dan Program Studi Teknik Geologi Universitas Pattimura yang telah mendukung penelitian secara finansial.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, G. D. P. N., & Setiawan, B. (2022). Analisis Penurunan Muka Tanah Kota Jambi Dengan Metode Differential Interferometry Synthetics Aperture Radar Tahun 2016 – 2021. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 3(1), 20–29. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2022.v3i1.71>
- Altan, O., Toz, G., Kulur, S., Seker, D., Volz, S., Fritsch, D., & Sester, M. (2001). Photogrammetry and geographic information systems for quick assessment, documentation and analysis of earthquakes. *Remote Sensing*, 14.
- Anniballe, R., Noto, F., Scalia, T., Bignami, C., Stramondo, S., Chini, M., & Pierdicca, N. (2018). Earthquake damage mapping: An overall assessment of ground surveys and VHR image change detection after L'Aquila 2009 earthquake. *Remote Sensing of Environment*, 210, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.004>
- Aslan, G. (2019). *Monitoring of Surface Deformation In Northwest Turkey From High-Resolution Insar: Focus On Tectonic Aseismic Slip And Subsidence* [PhD Thesis]. Université Grenoble Alpes.
- Biggs, J., Anthony, E. Y., & Ebinger, C. J. (2009). Multiple inflation and deflation events at Kenyan volcanoes, East African Rift. *Geology*, 37(11), 979–982. <https://doi.org/10.1130/G30133A.1>
- BMKG. (2019). *Gempabumi Tektonik M 6,8 Mengguncang Kota Ambon, Tidak Berpotensi Tsunami* | BMKG. BMKG | Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. <https://www.bmkg.go.id/press-release/?p=gempabumi-tektomik-m-68-mengguncang-kota-ambon-tidak-berpotensi-tsunami&tag=press-release&lang=ID>
- Braun, A. (2021). Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations. *Open Geosciences*, 13(1), 532–569. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246>
- Ferguson, K. C., Rucker, M. L., & Panda, B. B. (2015). Methods for monitoring land subsidence and earth fissures in the Western USA. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 361–366. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-361-2015>
- Hall, R. (2012). Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>
- Hermawan, D., & Yushantarti, A. (2010). *Geologi dan Geokimia Panas Bumi Daerah Pohon Batu, Provinsi Maluku*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi, Kelompok Penyelidikan Panas Bumi.
- Kuang, S. (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications*. Ann Arbor Press.
- Lewerissa, R., Sismanto, S., Setiawan, A., & Pramumijoyo, S. (2017). The Study of Geological Structures in Suli and Tulehu Geothermal Regions (Ambon, Indonesia) Based on Gravity Gradient Tensor Data Simulation and Analytic Signal. *Geosciences*, 8(1), 4. <https://doi.org/10.3390/geosciences8010004>
- Lokollo, R. R., Kelibulin, J. R., & Wattimena, A. Z. (2020). Seismic Property and Its Effect on Abrasion in the West Leihitu Coastal region, Ambon Island. *Journal of Physics: Conference Series*, 1463(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1463/1/012032>
- Mura, J. C., Paradella, W. R., Gama, F. F., Santos, A. R., Galo, M., Camargo, P. O., Silva, A. Q., & Silva, G. G. (2014). *Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR time-series: A case study in the*

- N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data (C. Notarnicola, S. Paloscia, & N. Pierdicca, Ed.; hlm. 924311). <https://doi.org/10.1117/12.2066886>
- Nasution, A., Aviff, M., Nugroho, S., Yunis, Y., & Honda, M. (2015). *The Preliminary Conceptual Model of Tolehu Geothermal Resource, Based on Geology, Water Geochemistry, MT and Drilling*. 10.
- Pownall, J. M., Hall, R., & Watkinson, I. M. (2013). Extreme extension across Seram. *Discussion Paper*, 83.
- Spakman, W., & Hall, R. (2010). Surface deformation and slab–mantle interaction during Banda arc subduction rollback. *Nature Geoscience*, 3(8), 562–566. <https://doi.org/10.1038/ngeo917>
- Sui, L., Ma, F., & Chen, N. (2020). Mining Subsidence Prediction by Combining Support Vector Machine Regression and Interferometric Synthetic Aperture Radar Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 390. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060390>
- Sun, X., Chen, X., Yang, L., Wang, W., Zhou, X., Wang, L., & Yao, Y. (2022). Using InSAR and PolSAR to Assess Ground Displacement and Building Damage after a Seismic Event: Case Study of the 2021 Baicheng Earthquake. *Remote Sensing*, 14(13), 3009. <https://doi.org/10.3390/rs14133009>
- Supartoyo, Surono, & Putranto, E. T. (2014). *Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1612 – 2014* (Edisi kelima). Pusat Vulkanologi Dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Watkinson, I. M., Hall, R., Cottam, M. A., Sevastjanova, I., Suggate, S., Gunawan, I., Pownall, J. M., Hennig, J., Ferdian, F., Gold, D., Zimmermann, S., Rudyawan, A., & Advocaat, E. (2012). *New Insights Into the Geological Evolution of Eastern Indonesia From Recent Research Projects by the SE Asia Research Group*. 23, 7.
- Wright, T. J. (2004). Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, 31(1), L01607. <https://doi.org/10.1029/2003GL018827>
- Yastika, P. E., & Shimizu, N. (2016). *Applications of DInSAR for Ground Surface Deformation Measurements-Case Studies of Subsidence Measurements and Deformation Detections Due to an Earthquake*. 8.
- Yulyta, S. A., Taufik, M., & Hayati, N. (2015). Studi Pengamatan Penurunan Dan Kenaikan Muka Tanah Menggunakan Metode Differential Interferometri Synthetic Aperture Radar (DinSAR) (Studi Kasus: Lumpur Lapindo, Sidoarjo). *Geoid*, 11(1), 62. <https://doi.org/10.12962/j24423998.v11i1.1100>