



Analisis Deformasi Permukaan akibat Gempabumi pada 28 September 2018 di Kota Palu menggunakan Metode DInSAR dan Hubungannya dengan Sebaran Vs_{30}

Analysis of Surface Deformation due to the Earthquake on September 28, 2018 in the City of Palu Using the DInSAR Method and Its Relationship with the Distribution of Vs_{30}

Aprilia Ode Saadia^{1,3*}, Joshua Purba², Hasria¹, LM. Golok Jaya¹, Imanuela Indah Pertiwi³, Halis M. Djibrin³

¹Universitas Halo Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia

²BMKG Stasiun Geofisika Gowa, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia

³BMKG Stasiun Geofisika Kendari, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia

*aprilia.saadia@bmkg.go.id

Received: 30 December 2024, Revised: 18 August 2025, Approved: 19 August 2025, Online: 21 August 2025

DOI: 10.33332/jgsm.geologi.v26i3.967

Abstrak- Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kejadian deformasi yang terjadi akibat gempabumi pada 28 September 2018 di Kota Palu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai deformasi akibat gempa M 7,4 di Kota Palu 2018 dan mengetahui hubungan deformasi dengan Vs_{30} . Penggunaan metode DInSAR digunakan untuk mengetahui perubahan deformasi yang terjadi akibat gempa tersebut dengan menggunakan data sentinel 1A pada tanggal 07 Juni 2018 (sebelum gempa) dan 22 November 2018 (sesudah gempa). Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan (*subsidence*) hingga 23 cm dan pengangkatan (*uplift*) hingga 13 cm di wilayah Kota Palu. Wilayah dengan nilai Vs_{30} rendah cenderung mengalami penurunan akibat tanah lunak, sedangkan wilayah dengan nilai Vs_{30} tinggi cenderung mengalami kenaikan akibat tanah keras. Namun demikian, terjadi anomali pada wilayah Kecamatan Ulujadi dan Kecamatan Palu Selatan. Penggunaan data Vs_{30} menunjukkan bahwa nilai Vs_{30} dapat digunakan sebagai indikator awal untuk memprediksi area dengan potensi deformasi akibat gempa. Hal tersebut penting untuk pengembangan strategi mitigasi bencana, misalnya dalam penentuan zona aman untuk pembangunan.

Abstract- This research is motivated by the deformation event that occurred due to the earthquake on September 28, 2018 in Palu City. This research aims to determine the value of deformation due to the M 7.4 earthquake in Palu City in 2018, and to determine the relationship between deformation and Vs_{30} . The DInSAR method was used to determine the deformation changes due to the earthquake using Sentinel 1A data on June 07, 2018 (pre-earthquake) and November 22, 2018 (post-earthquake). The analysis results showed subsidence of up to 23 cm and uplift of up to 13 cm in the city of Palu. Areas with low Vs_{30} values tend to experience subsidence due to soft soils, whereas areas with high Vs_{30} values tend to experience uplift due to hard soil. However, anomalies occurred in Ulujadi and South Palu subdistricts. The use of Vs_{30} data shows that Vs_{30} values can be used as an early indicator to predict areas with potential earthquake-induced deformation. It is important for the development of disaster mitigation strategies, such as determining safe zones for development.

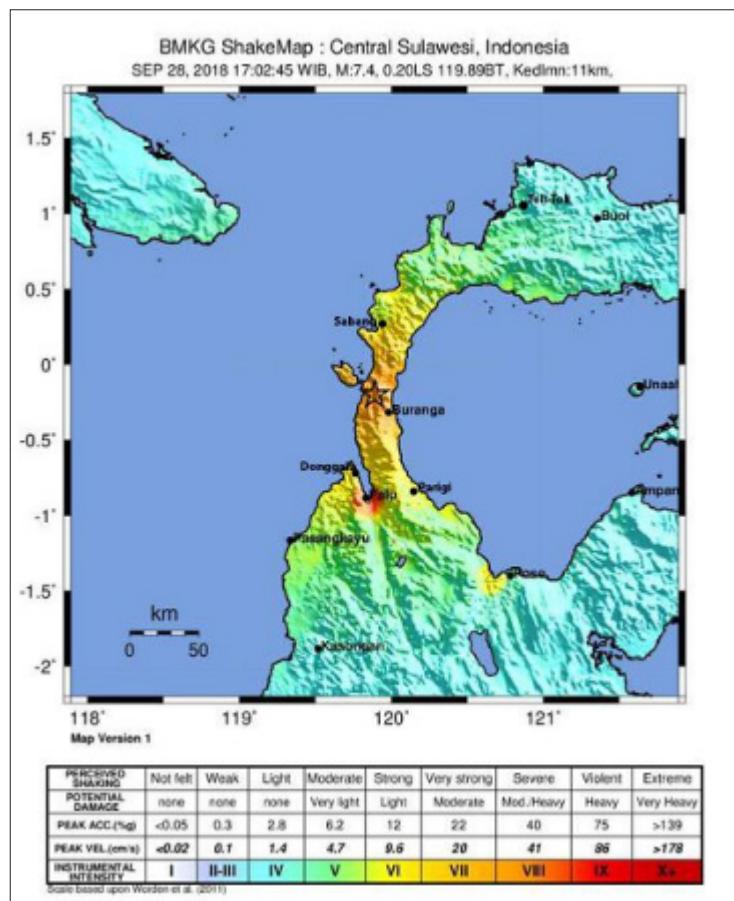
Keywords: Deformation, DInSAR method, Sentinel 1A, Vs_{30} , Palu City.

Kata Kunci: Deformasi, Metode DInSAR, Sentinel 1A, Vs_{30} , Kota Palu.

PENDAHULUAN

Gempabumi yang terjadi di Kota Palu pada 28 September 2018, pukul 18:02:44 WITA dengan M 7,4 yang berpusat di 26 km Utara Donggala, Sulawesi Tengah menyebabkan guncangan yang kuat dan menghasilkan tsunami serta likuefaksi di daerah Petobo dan daerah Balaroa, Kota Palu. Berdasarkan

pemodelan, data instrumen dan survei makroseismik yang dilakukan oleh BMKG pada 30 September 2018 menunjukkan intensitas guncangan berskala IX-X MMI di Kota Palu, Sulawesi Tengah sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hal ini menunjukkan terjadi kerusakan parah yang luas di daerah Kota Palu (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018).



Gambar 1. *Shakemap* otomatis *corrected* Gempabumi Utara Donggala 28 September 2018 ditambahkan dengan data laporan masyarakat di lapangan (BMKG, 2018)

Gempabumi yang terjadi tidak hanya memicu tsunami dan likuefaksi, tetapi juga menyebabkan perubahan topografi Kota Palu secara signifikan. Peristiwa ini mengakibatkan banyak korban jiwa dan fasilitas umum seperti rumah ibadah, fasilitas kesehatan, serta infrastruktur mengalami kerusakan (BMKG, 2024).

Gempabumi Palu pada tahun 2018 disebabkan oleh pergerakan sesar Palu-Koro yang memicu deformasi tanah yang parah. Deformasi yang terjadi akibat aktivitas sesar Palu-Koro menjadi salah satu faktor

utama yang memicu kerusakan. Deformasi tanah yang terjadi setelah gempabumi merupakan cerminan dari pelepasan energi seismik yang mengubah struktur dan topografi permukaan bumi. Pola deformasi ini tidak hanya mencakup penurunan (*subsidence*) dan pengangkatan (*uplift*), tetapi juga pergeseran horizontal yang dapat menyebabkan kerusakan fisik pada infrastruktur, memengaruhi stabilitas tanah, serta mengubah aliran air permukaan (Abidin dkk., 2009). Likuefaksi yang terjadi di beberapa daerah, terutama di Petobo dan Balaroa dimana banyak permukiman

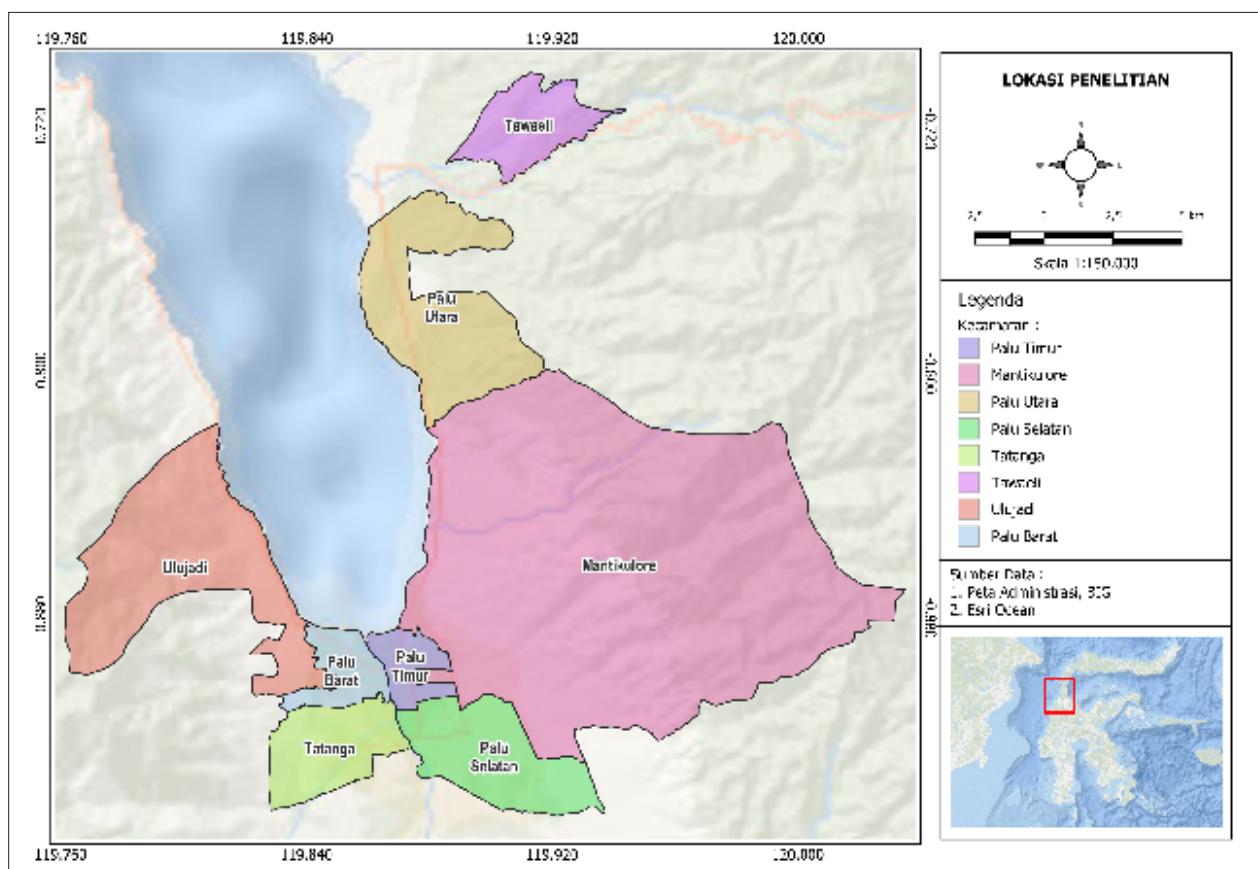
terendam dan hancur (Aritenang, 2022) menyebabkan penurunan tanah yang cukup signifikan.

Penelitian ini dilakukan di Kota Palu (Gambar 2) dengan koordinatnya $0,35^{\circ}$ LU – $1,20^{\circ}$ LU dan 120° BT – $122,90^{\circ}$ BT. Kota Palu memiliki luas wilayah $395,06$ km 2 yang terdiri atas 8 kecamatan yakni Kecamatan Mantikulore, Kecamatan Palu Barat, Kecamatan Palu Selatan, Kecamatan Palu Timur, Kecamatan Palu Utara, Kecamatan Tatanga, Kecamatan Tawaeli dan Kecamatan Ulujadi.

Dalam beberapa dekade terakhir, aplikasi DInSAR telah banyak digunakan dan terbukti efektif untuk mengetahui deformasi pasca gempabumi. Metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) menjadi alat analisis yang efektif untuk mendeteksi deformasi dengan resolusi spasial yang tinggi (Biescas dkk., 2007; Filin dan Baruch, 2010). Teknologi ini memungkinkan mengidentifikasi perubahan topografi hingga skala milimeter, bahkan di area yang sulit diakses akibat kerusakan pasca-bencana (Biescas dkk., 2007; Hu dkk., 2017). Dalam konteks mitigasi bencana, analisis deformasi

menggunakan DInSAR dapat memberikan informasi yang akurat tentang area yang mengalami penurunan atau pengangkatan tanah (Filin dan Baruch, 2010). Informasi ini penting bagi perencanaan rekonstruksi infrastruktur, evaluasi risiko, serta upaya mitigasi yang lebih efektif (Lu dkk., 2010; Atzori dan Salvi, 2014). Deformasi tanah akibat gempabumi terjadi lebih kompleks dengan komponen gerakan vertikal dan horizontal. Hal ini menjadi tantangan tersendiri untuk membandingkan hasil InSAR dengan pengamatan di lapangan dan pengukuran lainnya, karena InSAR hanya mengukur proyeksi deformasi permukaan pada arah garis pandang satelit (Qu dkk., 2017).

Metode DInSAR telah banyak digunakan dalam analisis deformasi akibat gempabumi, misalnya penelitian yang dilakukan oleh Purba dkk. (2024), Sari dkk. (2014), Suprapto dkk. (2024), Trismahargyono dkk. (2024). Penelitian tersebut berhasil memetakan pola deformasi seperti *uplift* dan *subsidence* di berbagai wilayah. Meskipun penelitian sebelumnya telah berhasil memetakan deformasi akibat gempabumi akan tetapi, penelitian tersebut belum mengintegrasikan deformasi dengan karakteristik



Gambar 2. Lokasi Penelitian

tanah lokal seperti penggunaan nilai Vs_{30} yang dapat menjadi indikator penting untuk memahami kerentanan tanah terhadap deformasi, terutama di wilayah yang dekat dengan struktur geologi aktif seperti Kota Palu. Mengintegrasikan deformasi dan data Vs_{30} dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara pola deformasi dengan karakteristik tanah lokal. Hal ini penting untuk meningkatkan akurasi analisis risiko bencana di wilayah seismik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan data Vs_{30} untuk menjelaskan pola deformasi akibat gempabumi di Kota Palu. Pendekatan ini memberikan wawasan baru tentang bagaimana distribusi nilai Vs_{30} dapat mendukung analisis risiko deformasi di wilayah seismik.

METODE

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) adalah teknik penginderaan jauh berbasis satelit yang dapat digunakan untuk mengukur perpindahan kecil permukaan bumi (Wempen, 2020). DInSAR merupakan teknik akuisisi dua citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR) berpasangan kombinasi data citra kompleks pada posisi spasial yang sama (*differential SAR*) atau posisinya sedikit berbeda (*terrain height InSAR*) pada area sama dengan melakukan perkalian konjugasi berganda. Hasil akhir berupa model elevasi digital (*Digital Evaluation Model*, DEM) atau pergeseran suatu permukaan bumi (Cumming, 2005).

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevasi} + \Delta\varphi_{deformasi} + \Delta\varphi_{atmosfer} + \Delta\varphi_{noise} \quad \dots\dots(1)$$

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R} \quad \dots\dots(2)$$

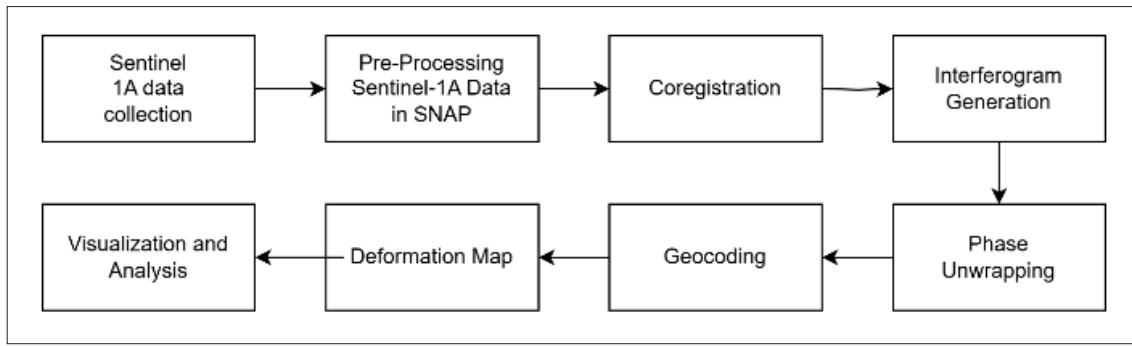
Dimana $\Delta\varphi_{flat}$ dalam perbedaan fase topografi, $\Delta\varphi_{elevation}$ adalah perbedaan fase elevasi, $\Delta\varphi_{deformasi}$ adalah perbedaan fase deformasi, $\Delta\varphi_{atmosfer}$ adalah perbedaan fase atmosfer, $\Delta\varphi_{noise}$ adalah perbedaan fase noise dan kesalahan pengukuran. Masing-masing parameter tersebut mempengaruhi fase interferometrik dengan cara yang berbeda. Dengan memisahkan pengaruh masing-masing parameter, metode DInSAR dapat memberikan pengukuran

deformasi yang sangat akurat (Purba dkk., 2024).

Persamaan tersebut menunjukkan bagaimana geometri dan panjang gelombang menjadi faktor yang memengaruhi perbedaan fase yang diamati, sehingga sangat penting untuk interpretasi data interferometri yang akurat. Dengan memahami hubungan ini, para ilmuwan dapat lebih baik mengoreksi perubahan fase yang dipengaruhi oleh berbagai faktor. Hal ini dapat meningkatkan akurasi pemantauan deformasi menggunakan metode DInSAR (Purba dkk., 2024).

Sentinel 1A merupakan satelit yang diluncurkan oleh Badan Antarksa Eropa pada tahun 2014, dan menjadi aset berharga dalam bidang penginderaan jauh dan pemantauan lingkungan. Tujuan utama satelit ini adalah untuk berbagai aplikasi termasuk manajemen banjir, pemetaan tutupan lahan/penggunaan lahan, dan pemantauan perubahan iklim (Phiri dkk., 2020). Salah satu fitur utama Sentinel-1A adalah kemampuannya untuk mendeteksi perubahan di permukaan bumi, terutama di daerah perkotaan yang terkena dampak bencana alam dan antropogenik. Teknologi *Synthetic Aperture Radar* yang dimiliki satelit ini memungkinkan untuk menangkap gambar permukaan bumi secara detail, bahkan dalam kondisi berawan atau gelap, yang sangat penting untuk memantau area yang terkena dampak bencana seperti banjir, gempabumi, dan kebakaran hutan (Washaya dan Mohamadi., 2018). Adapun alur pemrosesan data deformasi dapat dilihat pada Gambar 3.

Pengolahan data deformasi diawali dengan mengunduh citra Sentinel 1A dari <https://search.asf.alaska.edu>. Kemudian pilih data *Interferometric Wide* (IW) atau *Stripmap Mode* sesuai area penelitian. Pemilihan dua citra Sentinel 1A dari tanggal yang berbeda yaitu sebelum dan sesudah peristiwa deformasi. Pada penelitian ini menggunakan data radar Sentinel 1A pada periode 07 Juni 2018 – 22 November 2018. Selanjutnya, membuka citra Sentinel 1A di SNAP. Setelah itu koreksi orbit dengan menggunakan file orbit yang sesuai. Pilih area penelitian untuk memperkecil ukuran data. Jika menggunakan metode IW, pisahkan citra sesuai dengan burst yang relevan. Setelah itu, melakukan *coregistration* dua citra Sentinel 1A (*master* dan *slave*) untuk menyelaraskan posisi spasial, proses ini disebut *back geocoding*. Kemudian meningkatkan akurasi *coregistration* dengan menggunakan metode *Enhanced Spectral Diversity* (ESD). Buat interferogram dari dua citra



Gambar 3. Pemrosesan Data Deformasi

Sentinel 1A dengan menghitung perbedaan fase antara *master* dan *slave*. Kemudian lakukan *goldstein phase filtering* untuk mengurangi *noise* pada interferogram. Lakukan *phase unwrapping* menggunakan *software* SNAPHU untuk mengonversi fase interferogram ke dalam nilai sebenarnya. Koreksi geometrik dan konversi data ke sistem koordinat peta. Lakukan *Terrain Correction* menggunakan DEM untuk menghilangkan efek topografi. Konversi nilai fase yang telah di-unwrapping menjadi *displacement* (deformasi) menggunakan *wavelength* radar Sentinel 1A. Kemudian simpan hasil sebagai raster deformasi dalam format GeoTIFF. Step terakhir, visualisasikan peta deformasi dan menambahkan legenda, skala dan informasi penting lainnya serta interpretasi pola deformasi (*uplift/subsidence*) dengan menggunakan QGIS 3.34.9.

V_{s30} merupakan parameter seismik yang mengukur kecepatan gelombang geser rata-rata lapisan tanah hingga kedalaman 30 meter. Nilai V_{s30} sering digunakan untuk mengklasifikasikan jenis tanah dan memprediksi respons tanah terhadap gempabumi. Nilai V_{s30} diperoleh dari:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{v_i}\right)} \quad \dots\dots(3)$$

Dimana h_i dan v_i menunjukkan ketebalan (dalam meter) dan kecepatan gelombang geser dari formasi ke- i atau

lapisan, dengan total N yang ada di kedalaman 30 m.

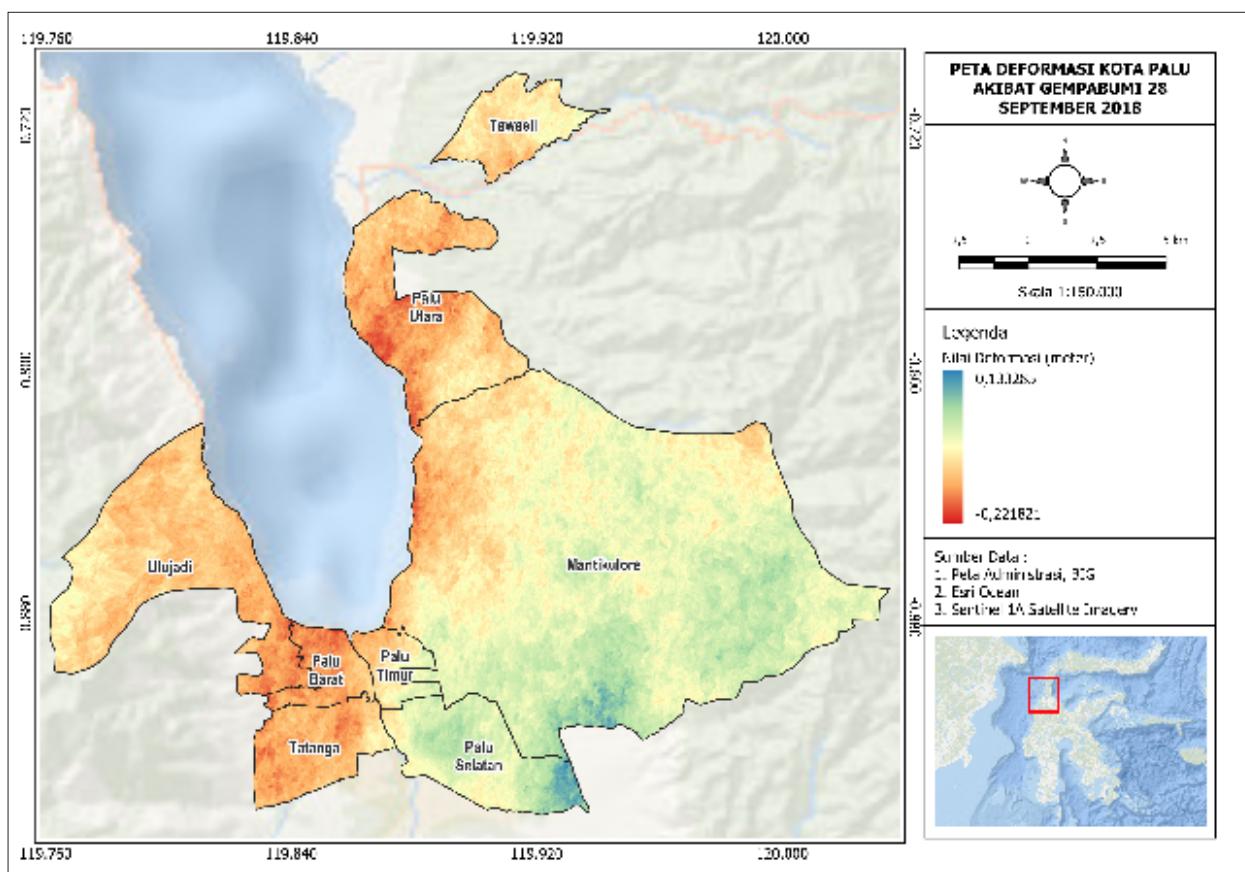
Tanah dengan nilai V_{s30} rendah (<200 m/s) biasanya lebih lunak dan memiliki ketahanan yang lebih lemah terhadap deformasi (Hashash dkk., 2018). Tanah yang lunak mudah kehilangan kekuatannya saat terkena guncangan seismik, yang merupakan mekanisme utama likuefaksi (Puppala dkk., 1996a).

Wilayah dengan nilai V_{s30} yang rendah, yang sering dikaitkan dengan endapan pasir yang gembur dan jenuh serta endapan aluvial muda yang ditemukan di dasar lembah dan dataran banjir, dianggap lebih rentan terhadap likuefaksi (Rosset dkk., 2023). Likuefaksi terjadi ketika tekanan air pori dalam tanah meningkat hingga melampaui tegangan efektif tanah, sehingga menyebabkan tanah kehilangan kekakuan dan berperilaku seperti fluida. Selain itu, tanah dengan nilai V_{s30} rendah cenderung memiliki amplifikasi gelombang seismik yang lebih besar dan hal tersebut dapat meningkatkan risiko likuefaksi (Ruiz-García dan Miranda, 2003; Zhang dkk., 2004). Zona dengan nilai V_{s30} yang rendah juga cenderung mengalami deformasi vertikal atau lateral yang signifikan. Wilayah dengan estimasi V_{s30} terendah sering dikaitkan dengan nilai intensitas tertinggi yang dilaporkan setelah kejadian gempabumi (Rosset dkk., 2023). Pemilihan V_{s30} sebagai parameter penting dalam kajian likuefaksi di Kota Palu berdasarkan pada kemampuannya untuk memberikan informasi tentang kekakuan dan kerentanan tanah terhadap guncangan gempabumi (Puppala dkk., 1996b; B. dan T., 2019; Ismayanti Romadona dkk., 2020).

HASIL PENELITIAN

Peta deformasi pada Gambar 4 menunjukkan distribusi perubahan tanah di Kota Palu pasca gempabumi M 7,4 pada 28 September 2018. Peta ini dihasilkan dari analisis data Sentinel-1A dengan teknik *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) untuk mendeteksi deformasi tanah. Warna pada peta menginterpretasikan deformasi dengan gradasi warna oranye hingga merah yang menunjukkan area *subsidence* dan biru menunjukkan area *uplift*. Area dengan nilai deformasi negatif menunjukkan *subsidence* dan area dengan nilai deformasi positif menunjukkan adanya *uplift*.

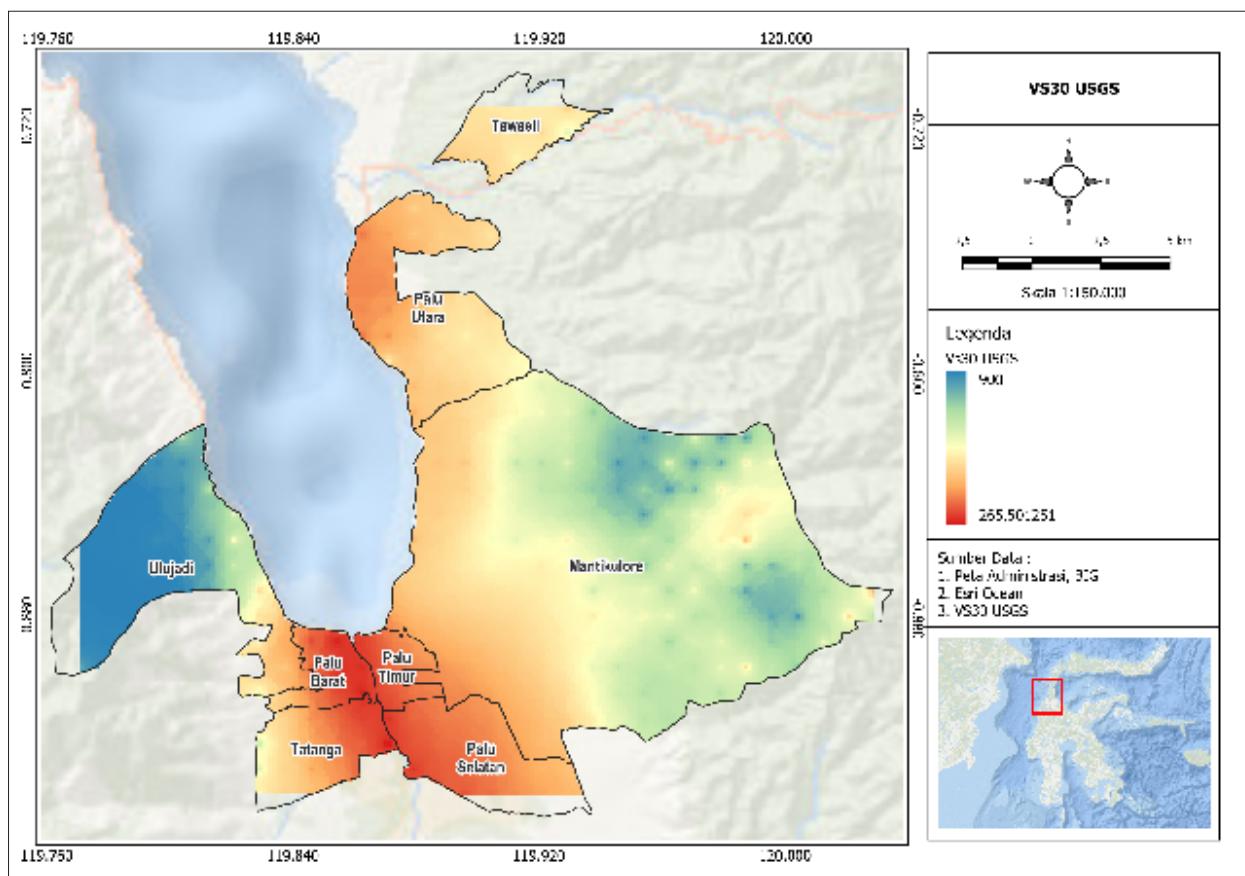
Pada peta deformasi (Gambar 4) menunjukkan terjadi *subsidence* hingga 22 cm dan *uplift* hingga 13 cm di Kota Palu setelah gempabumi tersebut. Penurunan tanah yang sangat signifikan terjadi di Kecamatan Palu Barat, Kecamatan Tatanga, dan sebagian Kecamatan Palu Utara, serta pada sebagian area pesisir Kecamatan Mantikulore. Di Kecamatan Taweli, Ulujadi, dan Palu Timur menunjukkan adanya *subsidence* yang relatif lebih rendah dibandingkan kecamatan sekitarnya. Sebaliknya, area yang menunjukkan adanya kenaikan terjadi di sebagian kecil Kecamatan Mantikulore dan Kecamatan Palu Selatan.



Gambar 4. Peta Deformasi Kota Palu akibat gempabumi 28 September 2018

Pada Gambar 5 memperlihatkan distribusi kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 m (V_{s30}) USGS di Kota Palu. Warna pada peta menginterpretasikan V_{s30} dimana gradasi merah hingga biru menunjukkan pada area tersebut memiliki nilai V_{s30} yang rendah hingga tinggi. Berdasarkan data V_{s30} USGS ini diketahui Kota Palu berkisar diantara nilai 265 m/s hingga 900 m/s. Dimana pada sebagian wilayah

Kecamatan Palu Barat, Palu Timur, Palu Selatan dan Tatanga adalah zona merah yang diinterpretasikan sebagai wilayah dengan nilai V_{s30} yang lebih rendah dibandingkan wilayah lainnya. Sedangkan sebagian besar Kecamatan Ulujadi menunjukkan zona biru yang diinterpretasikan sebagai daerah dengan nilai V_{s30} yang lebih tinggi dibanding wilayah lainnya yaitu hingga 900 m/s.



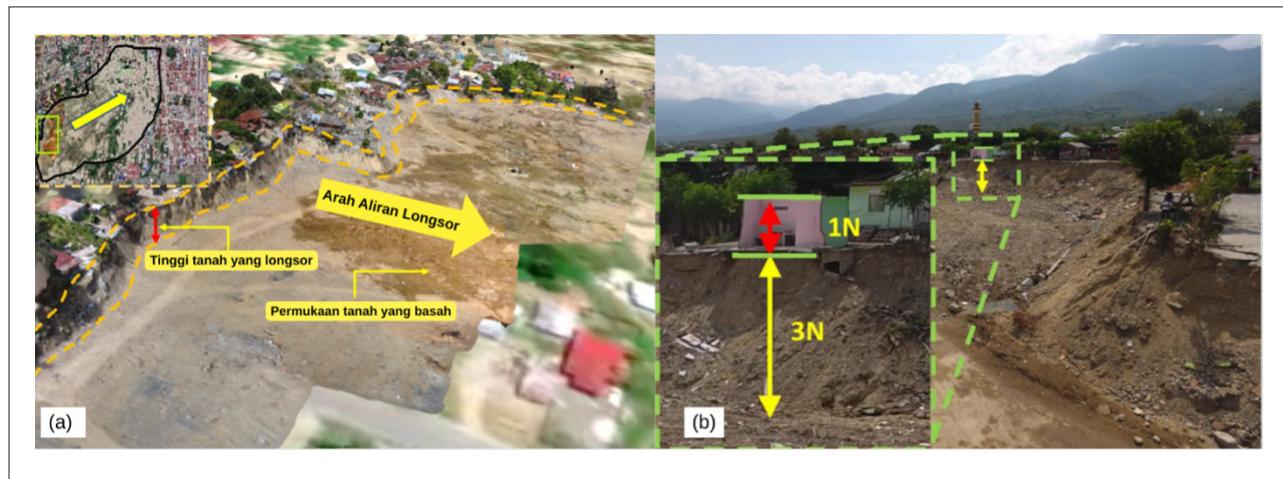
Gambar 5. Peta Sebaran Vs₃₀ daerah Kota Palu (Allen dan Wald, 2007)

Menurut Rusydi dkk. (2018) penggunaan data Vs₃₀ USGS dapat digunakan dengan baik apabila dikoreksi dengan pengukuran mikrotremor Vs₃₀ di lapangan. Pada penelitian yang dilakukan Rusydi dkk. (2018) diperoleh rentang nilai 137 m/s – 456 m/s yang sesuai dengan kondisi di lapangan. Dimana pada SNI 1726:2019 (BSN, 2019) menyebutkan bahwa Vs < 175m/s adalah tanah lunak, 175 m/s ≤ Vs ≤ 350 m/s merupakan tanah sedang, dan 350 m/s ≤ Vs ≤ 750 m/s adalah tanah keras. Berdasarkan klasifikasi tersebut maka Kota Palu terdiri dari tanah lunak, tanah sedang hingga tanah keras.

Kota Palu memiliki bentuk topografi berupa cekungan atau lembah sehingga sebagian besar tanah di daerah Lembah Palu merupakan tanah aluvial. Hal tersebut sejalan dengan hasil Vs₃₀ yang menunjukkan bahwa hampir seluruh kecamatan di Kota Palu berada pada tanah lunak, terutama di daerah Lembah Palu (Rusydi dkk., 2018).

DISKUSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola deformasi yang diamati memiliki korelasi dengan distribusi Vs₃₀. Wilayah dengan nilai Vs₃₀ rendah cenderung mengalami penurunan akibat tanah lunak. Penurunan tanah yang sangat signifikan terjadi di Kecamatan Palu Barat, Kecamatan Tatanga, dan sebagian Kecamatan Palu Utara, serta pada sebagian area pesisir Kecamatan Mantikulore. Di Kecamatan Tawali, Ulujadi, dan Palu Timur menunjukkan adanya *subsidence* yang relatif lebih rendah ketinggiannya dibandingkan kecamatan sebelumnya. Salah satu bukti visual adanya *subsidence* terjadi di Balaroa, Palu Barat yang dapat dilihat pada Gambar 6 menunjukkan seberapa besar deformasi yang terjadi, dimana ketinggian profil tanah dekat ujung aliran tanah terlihat sekitar tiga kali lipat (3N) dibandingkan dengan ketinggian rumah (N) (Rohit dkk., 2021).



Gambar 6. Bukti penurunan permukaan tanah yang terjadi di Balaroa, Palu Barat: a) Model 3D yang dihasilkan dari survei drone. b) Tingkat pergeseran tanah secara vertikal. (Rohit et al., 2021)

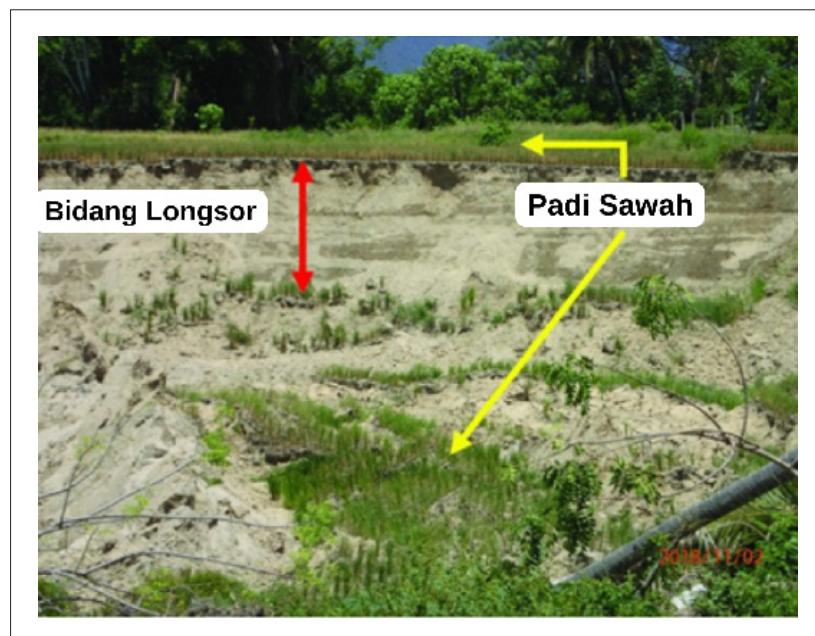
Berdasarkan Peta V_{s30} USGS diketahui bahwa pada wilayah-wilayah yang mengalami *subsidence* tersebut memiliki nilai V_{s30} yang lebih rendah dibanding wilayah lainnya, terkecuali pada Kecamatan Ulujadi yang menunjukkan nilai V_{s30} yang tinggi.

Terdapat area yang menunjukkan adanya kenaikan terjadi di sebagian Kecamatan Mantikulore dan Kecamatan Palu Selatan. Berdasarkan pemetaan V_{s30} USGS diketahui pada Kecamatan Mantikulore menunjukkan distribusi nilai V_{s30} dari rendah hingga tinggi. Sedangkan pada Kecamatan Palu Selatan nilai V_{s30} rendah yang menunjukkan tanah lunak. Gambar 7 menunjukkan adanya penurunan ketinggian di Petobo, Kecamatan Palu Selatan, dimana sebagian sawah masih terlihat utuh namun sebagian besar telah mengalami penurunan. Berdasarkan penelitian Rohit dkk. (2021) dilaporkan terjadi penurunan ketinggian di dekat ujung aliran tanah sekitar 5-8 meter, sementara di zona kompresi ketinggian meningkat sekitar 4-10 meter akibat penumpukan puing dan tonjolan yang disebabkan oleh dorongan aliran tanah.

Hal ini mendukung penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Purba dkk. (2024), Sari dkk. (2014), Suprapto dkk. (2024), Trismaharyono dkk. (2024) yang memetakan deformasi akibat gempabumi tanpa mengaitkannya dengan data V_{s30} . Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai V_{s30} yang rendah berkorelasi langsung dengan wilayah deformasi yang signifikan, memberikan bukti bahwa karakteristik tanah lunak berperan penting dalam amplifikasi deformasi selama gempabumi.

Wilayah Ulujadi yang memiliki tanah keras mengalami penurunan merupakan daerah pegunungan dengan kemiringan 15° - 40° dan dijadikan sebagai areal tambang galian sehingga terjadi longsor ketika terjadi gempabumi (Bashiir dan Kurniadina, 2021). Oleh karena itu areal tersebut ditampilkan sebagai penurunan tanah. Kemudian di wilayah Palu Selatan yang memiliki tanah lunak mengalami kenaikan diperkirakan disebabkan oleh citra yang ditangkap merupakan hasil penumpukan puing dan tonjolan yang disebabkan oleh dorongan aliran tanah (Rohit dkk., 2021). Kedua wilayah ini perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui penyebab pasti terjadinya anomali tersebut.

Secara umum, wilayah dengan V_{s30} rendah seperti Kecamatan Palu Barat dan Palu Utara menunjukkan *subsidence* signifikan. Sebaliknya, pada area dengan V_{s30} lebih tinggi di sebagian Kecamatan Mantikulore menunjukkan adanya *uplift*. Hal ini mendukung hasil penelitian Rusydi dkk. (2018) yang menunjukkan bahwa wilayah Kota Palu terdiri dari tanah lunak, tanah sedang, hingga tanah keras. Nilai V_{s30} yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan adalah 137 m/s – 456 m/s. Tanah dengan nilai V_{s30} rendah (<175 m/s) umumnya lebih rentan terhadap deformasi karena kekakuanya (*stiffness*) kecil. Sehingga berpotensi mengalami deformasi akibat gaya eksternal, seperti gempabumi yang menyebabkan likuifaksi atau penurunan tanah. Sedangkan pada tanah keras atau tanah dengan nilai V_{s30} tinggi biasanya lebih kaku, sehingga deformasinya cenderung lebih kecil. Namun kekakuan yang tinggi juga dapat meningkatkan perambatan gelombang seismik yang menyebabkan



Gambar 7. Penurunan tanah di Petobo, Palu Selatan (Rohit et al., 2021)

lebih banyak kerusakan struktur di permukaan (Ismayanti Romadona dkk., 2020; Laapo dkk., 2020).

Deformasi tanah yang terjadi di Kota Palu merupakan akibat dari kombinasi mekanisme patahan aktif dan sifat geologi lokal. Gempa bumi dengan magnitudo besar terjadi akibat pergerakan lempeng tektonik yang memicu deformasi dan menyebabkan perubahan pada struktur serta permukaan tanah. Area dengan *subsidence* signifikan seringkali berhubungan dengan lokasi yang memiliki nilai V_{s30} rendah. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan tanah yang lunak lebih rentan terhadap pergerakan dan pergeseran saat terjadi gempabumi. Jika nilai V_{s30} pada suatu area tersebut rendah, maka amplifikasinya bernilai tinggi (Bustari dan Wibowo, 2023), dimana hal tersebut dapat memperbesar kerusakan struktural dan perubahan permukaan.

Penggunaan data V_{s30} pada penelitian ini menunjukkan bahwa nilai V_{s30} dapat digunakan sebagai indikator awal untuk memprediksi area dengan potensi deformasi akibat gempabumi (Iwahashi dkk., 2010; Rusydi dkk., 2018; Zhang, 2020). Hal tersebut penting dalam pengembangan strategi mitigasi bencana, misalnya dalam penentuan zona aman untuk pembangunan (Rusydi dkk., 2018).

Berdasarkan hasil penelitian, strategi mitigasi bencana

dapat difokuskan pada wilayah dengan nilai V_{s30} rendah karena lebih rentan terhadap *subsidence* dan dapat merusak infrastruktur. Deformasi cenderung berbahaya bagi keselamatan manusia. Penurunan permukaan tanah dapat berbahaya karena berisiko terhadap banjir dan tanah yang tidak stabil. Selain itu, deformasi yang disebabkan oleh gempabumi memiliki implikasi yang lebih luas bagi perekonomian, terutama dalam hal infrastruktur yang rusak. Peta deformasi dapat menjadi acuan untuk proses rekonstruksi pembangunan daerah sehingga bangunan infrastruktur di Kota Palu menjadi lebih tahan terhadap kejadian gempabumi (Purba dkk., 2024). Strategi yang dapat diterapkan untuk mengurangi risiko deformasi akibat gempabumi adalah dengan mengimplementasikan metode stabilisasi tanah pada bangunan yang berada di daerah yang mengalami risiko *subsidence*. Menurut Punmia (1980) dalam Darwis (2017), stabilisasi tanah merupakan metode yang digunakan untuk memodifikasi sifat tanah untuk memperbaiki kinerja tekniknya. Dalam hal ini menurut Punmia bahwa tujuan utama dari stabilisasi tanah adalah untuk meningkatkan kekuatan atau stabilitas tanah. Secara keseluruhan bangunan yang berada di Kota Palu sebaiknya adalah bangunan yang tahan terhadap gempabumi. Hal ini untuk meminimalisir terjadinya kerusakan akibat gempabumi yang mungkin terjadi di waktu yang akan datang.

KESIMPULAN

Pola deformasi akibat gempabumi di Kota Palu berkorelasi dengan sebaran nilai V_{s30} (sumber data USGS). Wilayah dengan nilai V_{s30} yang rendah cenderung mengalami penurunan tanah yang signifikan, sedangkan wilayah dengan nilai V_{s30} tinggi menunjukkan kecenderungan mengalami kenaikan. Anomali yang teridentifikasi di Kecamatan Ulujadi dan Palu Selatan menunjukkan perlunya kajian lebih lanjut untuk memahami faktor-faktor lokal yang memengaruhi deformasi. Dengan demikian, data V_{s30} dapat dijadikan sebagai indikator awal yang berpotensi untuk mengidentifikasi area rawan deformasi akibat gempabumi dan mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan mitigasi bencana di wilayah yang

rentan terhadap gempabumi.

Penelitian ini memiliki banyak keterbatasan misalnya kurangnya visualisasi data V_{s30} dari hasil pengukuran di lapangan yang belum tersedia dalam bentuk peta distribusi rinci. Hal ini membuat analisis deformasi hanya dapat dilakukan secara umum berdasarkan peta V_{s30} dari USGS. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data V_{s30} yang lebih terperinci dari pengukuran lapangan, seperti metode mikrotremor, untuk meningkatkan akurasi analisis deformasi dan memberikan gambaran risiko yang lebih spesifik. Penelitian ini masih dapat dikembangkan dengan menggunakan metode lain seperti mikrotremor, MASW, *ground penetration radar*, geolistrik, atau metode lainnya untuk meningkatkan akurasi analisis.

ACUAN

- Abidin, H. Z., H. Andreas, T. Kato, T. Ito, I. Meilano, F. Kimata, D. H. Natawidjaya, dan H. Harjono. 2009. Crustal deformation studies in java (indonesia) using gps. *Journal of Earthquake and Tsunami*. 03(02):77–88.
- Akpila, S. B., & Jaja, G. W. T. 2019. Reliability of Soil and Ground Improvement Techniques on Peaty Clay Soil—A Review. *Int. J. Trend Sci. Res. Dev*, 3, 682-690. Allen, T. I. dan D. J. Wald. 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site-conditions ($vs30$) and amplification around the globe. *USGS Open-File Report*
- Aritenang, A. 2022. Understanding international agenda using media analytics: the case of disaster news coverage in indonesia. *Cogent Arts & Humanities*. 9(1)
- Atzori, S. dan S. Salvi. 2014. *SAR Data Analysis in Solid Earth Geophysics: From Science to Risk Management*. Dalam Land Applications of Radar Remote Sensing. InTech.
- Bashiir, M. F. dan N. Kurniadin. 2021. Deteksi kerusakan perkotaan akibat gempa bumi di kota palu menggunakan data satelit sentinel-1. *Buletin Poltanesa*. 22(1)
- Biescas, E., M. Crosetto, M. Agudo, O. Monserrat, dan B. Crippa. 2007. Two radar interferometric approaches to monitor slow and fast land deformation. *Journal of Surveying Engineering*. 133(2):66–71.
- BMKG. 2024. *Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416-2023 Per Wilayah*. Jakarta: BMKG.
- BSN. 2019. SNI 1726:2019 Tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung. Jakarta: BSN. 2019.darwiHashhash
- Bustari, A. A. dan N. B. Wibowo. 2023. Pemetaan sebaran nilai vs30, faktor amplifikasi tanah, dan peak ground acceleration wilayah bantul timur. *Cakrawala Jurnal Ilmiah Bidang Sains*. 1(2)
- Cumming, I. 2005. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. Artech House Remote Sensing Library.

Darwis. 2017. *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. January. Pustaka AQ.

Filin, S. dan A. Baruch. 2010. Detection of sinkhole hazards using airborne laser scanning data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 76(5):577–587.

Hashash, Y. M. A., J. Harmon, O. Ilhan, J. P. Stewart, E. M. Rathje, K. W. Campbell, W. J. Silva, dan C. A. Goulet. 2018. Modelling of Site Amplification via Large Scale Nonlinear Simulations with Applications to North America. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*. June 7, 2018. American Society of Civil Engineers: 523–537.

Hu, J., X.-L. Ding, L. Zhang, Q. Sun, Z.-W. Li, J.-J. Zhu, dan Z. Lu. 2017. Estimation of 3-d surface displacement based on insar and deformation modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 55(4):2007–2016.

Iwahashi, J., I. Kamiya, dan M. Matsuoka. 2010. Regression analysis of vs30 using topographic attributes from a 50-m dem. *Geomorphology*. 117(1–2):202–205.

Laapo, A., D. N. Asih, D. Howara, H. Sultan, I. Abubakar, A. Wahid, dan N. Lanuhu. 2020. Estimated economic value of the lost coastal resources due to tsunami in september 2018 in palu city, indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 575(1):012054.

Lu, Z., J. Zhang, Y. Zhang, dan D. Dzurisin. 2010. Monitoring and characterizing natural hazards with satellite insar imagery. *Annals of GIS*. 16(1):55–66.

Phiri, D., M. Simwanda, S. Salekin, V. Nyirenda, Y. Murayama, dan M. Ranagalage. 2020. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*. 12(14):2291.

Puppala, A., Y. Acar, dan M. Tumay. 1996a. Low strain dynamic shear modulus of cemented sand from cone penetration test results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1548:60–66.

Puppala, A., Y. Acar, dan M. Tumay. 1996b. Low strain dynamic shear modulus of cemented sand from cone penetration test results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1548:60–66.

Purba, J., H. Harisma, R. Priadi, R. Amelia, A. A. I. Dwilyantari, L. M. G. Jaya, L. O. Restele, dan I. M. W. G. Putra. 2024. Surface deformation and its implications for land degradation after the 2021 flores earthquake (m7,4) using differential interferometry synthetic aperture radar. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 12(1):6819–6831.

Qu, C., X. Shan, D. Zhao, G. Zhang, dan X. Song. 2017. Relationships between insar seismic deformation and fault motion sense, fault strike, and ascending/descending modes. *Acta Geologica Sinica - English Edition*. 91(1):93–108.

Rohit, D., H. Hazarika, T. Maeda, W. O. Sumartini, T. Kokusho, S. Manafi Khajeh Pasha, dan S. Nurdin. 2021. Forensic investigation of flowslides triggered by the 2018 sulawesi earthquake. *Progress in Earth and Planetary Science*. 8(1):60.

Romadona, I. I., U. Andawayanti, dan E. Nur Cahya. 2020. Analysis of inundation reduction in drainage channels in the coastal area of the city of palu with environmental insights. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 437(1):012034.

- Rosset, P., A. Takahashi, dan L. Chouinard. 2023. Vs30 mapping of the greater montreal region using multiple data sources. *Geosciences*. 13(9):256.
- Ruiz-García, J. dan E. Miranda. 2003. Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 32(8):1237–1258.
- Rusydi, M., R. Efendi, Sandra, dan Rahmawati. 2018. Earthquake hazard analysis use vs30 data in palu. *Journal of Physics: Conference Series*. 979:012054.
- Sari, A. R., H. H. Handayani, dan A. Agustan. 2014. Penerapan metode dinsar untuk analisa deformasi akibat gempa bumi dengan validasi data gps sugar (studi kasus: kepulauan mentawai, sumatera barat). *Geoid*. 10(1)
- Suprapto, B. H., M. Maria, dan S. Arif. 2024. Studi tentang coulomb stress paska gempa bumi pada daerah mamuju – majene menggunakan metode dinsar. *Jurnal Sains Informasi Geografi*. 7(1):1.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018. *Laporan Kajian Gempa Palu Provinsi Sulawesi Tengah*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 9. *Pusat Studi Gempa Nasional*.
- Trismahargyono, A. Puspita, I. Pertiwi, Agustan, dan K. Sinki. 2024. Surface deformation analysis due to the poso earthquake on may 29, 2017 using the dinsar method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1373(1):012049.
- Washaya, P., T. Balz, dan B. Mohamadi. 2018. Coherence change-detection with sentinel-1 for natural and anthropogenic disaster monitoring in urban areas. *Remote Sensing*. 10(7):1026.
- Wempen, J. M. 2020. Application of dinsar for short period monitoring of initial subsidence due to longwall mining in the mountain west united states. *International Journal of Mining Science and Technology*. 30(1)
- Zhang, L. 2020. Prediction of vs30 in datong basin and amplification effect of site ground motion based on typical geological characteristics analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 455(1):012069.
- Zhang, R. R., L. VanDemark, J. Liang, dan Y. Hu. 2004. On estimating site damping with soil non-linearity from earthquake recordings. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 39(9):1501–1517.