



Pemodelan Estimasi Kecepatan Rambat Gelombang Geser Tanah (V_{S30}) Berbasis Topografi, Geomorfologi dan Geologi

A. Rahayu^{a*}, W.A. Prakoso^b dan I.A. Sadisun^c

^aJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, 94112

^bJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, Indonesia.

^cJurusan Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

* Corresponding author's e-mail: astri2018.1440@gmail.com

Received: 29 August 2023; revised: 31 August 2023; accepted: 3 September 2023

Abstract: The 30 m top layer of soil as the medium of propagation of the earthquake wave is the closest to the structure of the building, and could have different effects depending on the type of soil and topography. The Indonesian earthquake code for building and non building structures known as SNI 1726-2012 using the directly measured V_{S30} as the primary parameter to identify the stiffness effect of sediment. The V_{S30} can be measured using non invasive methods, such as multi-channel analysis of surface waves (MASW). Direct, invasive measurements of V_{S30} around Indonesia would be difficult to implement due to the vastness of the country and the high cost nature of the testing. To provide an alternative to the direct measurement, V_{S30} estimation models have been developed. V_{S30} estimates using topography in the form of slopes are commonly used in North America, while geomorphological units are used in Japan. This research was carried out by correlating V_{S30} direct measurements with topographical, geomorphological and geological attributes. The V_{S30} obtained from series of MASW tests, the topographic slope and elevation from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 30 arcsec data, the geomorphology units data which are Structural, Karst, Vulkanik, Fluvial and Marine from landsystem map and the geologic age data from Geological Survey Centre (PSG). Data were analyzed by linear regression and spatial analysis. V_{S30} estimation modeling produces models with four variables, namely elevation, slope, geomorphological unit and geological age in the regions of Palu. Four proxy based estimates provide values that are slightly higher or lower but in a range not so far from direct measurements. The results of data processing analysis shows that local conditions greatly affect V_{S30} estimates in Palu. The V_{S30} estimation model in the form of a logarithmic equation is as follows, $\text{Log } V_{S30} = -3.925 + 0.062 \log(s) + 0.069 \log(Ev) + 0.665 \log(G) + 1.824 \log(A)$ gives a slightly higher or lower value but in a range not far from direct measurement. This V_{S30} estimation model is suitable for soil classification on a regional scale and can be adopted for microzonation maps or real-time shake map.

Keywords: V_{S30} , topography slope, elevation, unit geomorphology, geologic age

Abstrak: Lapisan tanah 30 meter dari permukaan sebagai media penjalaran gelombang gempa yang paling dekat ke struktur bangunan memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap struktur sesuai dengan jenis tanahnya. SNI 1726 : 2012, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung menggunakan nilai V_{S30} pengukuran langsung, sebagai parameter untuk melihat pengaruh kekakuan sedimen. Pengukuran langsung V_{S30} dapat dilaksanakan dengan metode invasif atau metode non invasif antara lain dengan *Multi-Chanel Analysis of Surface Waves* (MASW), dimana pelaksanaannya membutuhkan biaya tinggi. Sehingga diperlukan metode yang dapat memudahkan bagi perencanaan yaitu dengan nilai estimasi V_{S30} yang merupakan pendekatan nilai V_{S30} . Riset Pemodelan estimasi kecepatan rambat gelombang geser tanah (V_{S30}) berbasis topografi dan geologi untuk perencanaan struktur tahan gempa diperlukan untuk menjembatani keperluan persamaan percepatan pergerakan tanah untuk pembangunan infrastruktur di wilayah Indonesia yang luas secara cepat. Estimasi V_{S30} menggunakan topografi berupa lereng telah umum dipakai pada wilayah Amerika Utara, sedangkan unit geomorfologi dipergunakan di Jepang. Riset ini membuat korelasi pengukuran langsung V_{S30} dengan atribut topografi, geomorfologi dan geologi. V_{S30} diperoleh dari rangkaian pengujian MASW, atribut topografi berupa lereng dan elevasi dari data *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 30 arcsec, satuan geomorfologi yaitu struktural, gunungapi (vulkanik), laut (marine), sungai (fluvial) serta karst (gamping) dari peta sistim lahan dan data umur geologi dari Pusat Survei Geologi (PSG) berupa peta geologi Indonesia digital dan manual. Data dianalisa dengan regresi linier dan analisa spasial. Pemodelan estimasi V_{S30} menghasilkan model dengan empat variabel yaitu elevasi, lereng, unit geomorfologi dan umur geologi pada wilayah Palu. Model estimasi V_{S30} dalam bentuk persamaan logaritma sebagai berikut, $\text{Log } V_{S30} = -3,925 + 0,062 \log (s) + 0,069 \log (Ev) + 0,665 \log(G) + 1,824 \log(A)$ memberikan nilai yang sedikit lebih tinggi atau lebih rendah tetapi dalam kisaran yang tidak jauh dari pengukuran langsung. Model estimasi V_{S30} ini sesuai untuk klasifikasi tanah pada skala regional dan dapat diadopsi untuk peta mikrozonasi kelas I atau *real-time shake*.

Kata kunci: V_{S30} , lereng, elevasi, umur geologi, satuan geomorfologi

1. Pendahuluan

Indonesia adalah wilayah dengan aktivitas kegempaan yang tinggi. Pengetahuan tentang pengurangan resiko kerusakan struktur akibat gempa sangat diperlukan. Penjalaran gempa dari pusat gempa ke permukaan tanah dimana terdapat infrastruktur, mengalami proses

amplifikasi atau deamplifikasi tergantung pada besaran gempa dan kondisi tanah.

Perencanaan struktur dengan pertimbangan pengaruh seismik menggunakan persamaan prediksi atenuasi (mengecilnya intensitas gempa akibat jarak) didasarkan antara lain pada kelas situs. Kelas situs terbagi atas batuan

keras, batuan, tanah keras, tanah sedang, tanah lunak dan tanah khusus. Kelas situs dapat ditentukan dari nilai kecepatan rambat gelombang geser 30 meter dari permukaan tanah (V_{S30}).

Tabel 1. Klasifikasi tanah permukaan) [1]

Kelas Situs	\bar{v}_s	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 - 750	>50	≥100
SD (tanah sedang)	175 - 350	15 - 50	50 -100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Indeks plastisitas, $PI > 20$,
2. Kadar air, $w \geq 40 \%$,
3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$

Penentuan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Salah satu parameter yang digunakan untuk penentuan kelas situs adalah kecepatan

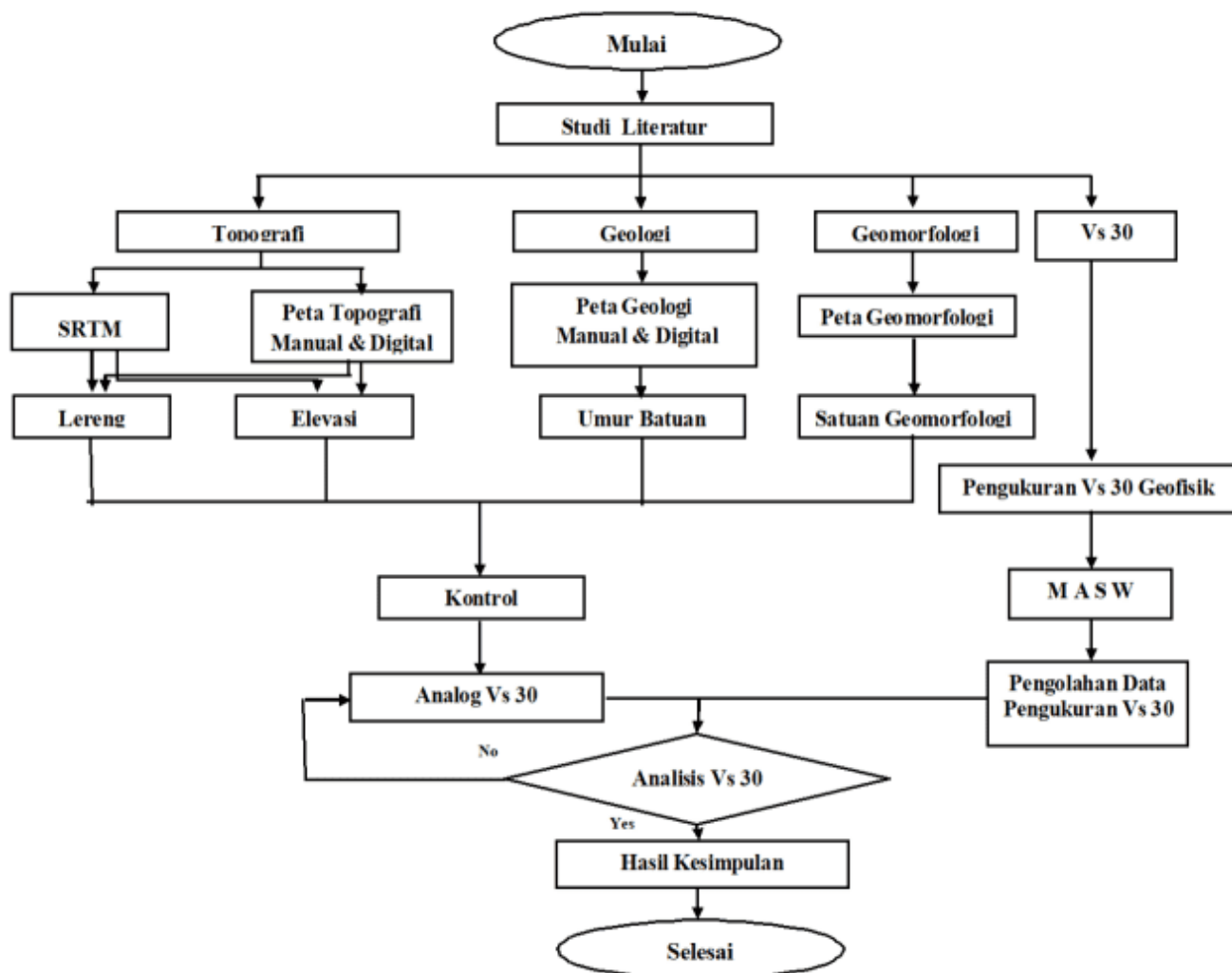
rambat gelombang geser rata-rata (\bar{v}_s) disamping tahanan penetrasi standar rata-rata (\bar{N}) dan kuat geser niralir rata-rata (\bar{s}_u) (Tabel 1).

Penelitian pemodelan estimasi kecepatan rambat gelombang geser tanah V_{S30} dengan topografi dan geologi diperlukan untuk menjembatani keperluan persamaan percepatan pergerakan tanah untuk pembangunan infrastruktur di wilayah Indonesia yang luas secara cepat dan dapat digunakan sebagai data base geoteknik [2]. Atribut topografi berupa lereng telah umum dipakai untuk estimasi V_{S30} untuk wilayah Amerika Utara [3,4,5,6,7]. Sedangkan unit geomorfologi sebagai prediksi V_{S30} dipergunakan di Jepang [8]. Berdasarkan penelitian terdahulu diberbagai wilayah dunia, dapat disimpulkan sangat diperlukan penelitian korelasi V_{S30} untuk wilayah Indonesia yang memiliki sejarah geologi serta keadaan geomorfologi yang beragam [9, 10,16].

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Palu dan wilayah sekitarnya.



Gambar 1. Bagan alir penelitian

2.2. Metode dan Tahapan Penelitian

Penelitian ini menganalisis data dengan pendekatan statistik melalui analisa regresi berganda, sehingga didapat pemodelan estimasi nilai V_{S30} . Variabel dependen (Y) adalah pengukuran langsung V_{S30} dengan alat *Multi-channel Analysis of Surface Wave* (MASW) dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Variabel independen (X) terdiri dari X_1 yaitu topografi lereng, X_2 yaitu elevasi dimana X_1 dan X_2 diperoleh melalui data SRTM 30 serta disupervisi dengan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dari Badan Informasi Geospasial (BIG) menggunakan Sistem Informasi Geografi (SIG). Variabel X_3 yaitu umur geologi diperoleh dari peta geologi Indonesia digital dan manual. Variabel X_4 yaitu bentanglahan asal atau satuan geomorfologi genesis dari (BIG). Pemodelan Estimasi V_{S30} menggunakan software SPSS dan ArcGIS 10.1. Alur penelitian secara ringkas diuraikan pada Gambar 1.

2.3. Data

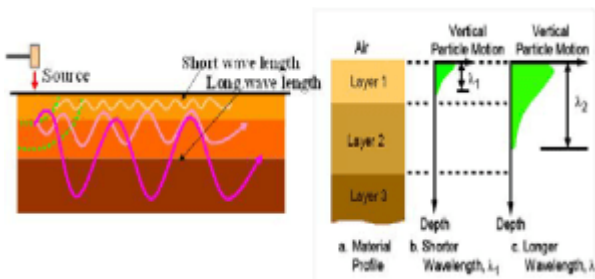
Data meliputi data pengukuran V_{S30} dengan MASW dan data elevasi dan slope. Pengukuran V_{S30} dilapangan diawali dengan pemilihan rencana lokasi pengambilan data. Rencana lokasi ditentukan berdasarkan penyebaran data, jenis tanah berdasarkan geomorfologi genesis dan umur geologi, adanya akses jalan menuju lokasi serta adanya ruang yang tersedia untuk pengambilan data berupa hamparan sepanjang 50 m.

Pengambilan data dengan Alat MASW spesifikasi OYO 24 Channel McSeis-SXW yang bekerja berdasarkan prinsip refraksi seismik. Data kemudian diolah dengan SeisImager. Prosesing data melalui beberapa tahap yaitu :

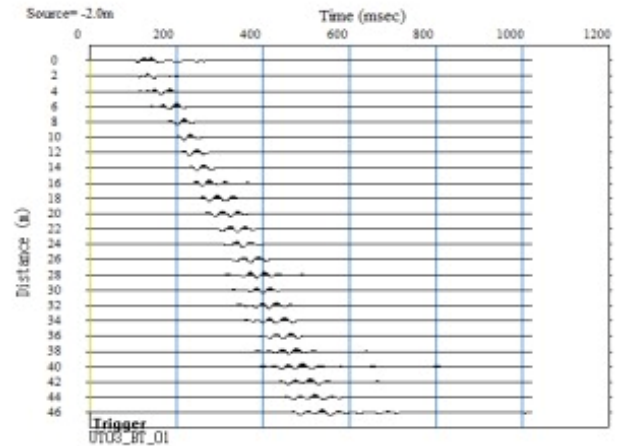
- 1) Sumber aktif dari pukulan palu pada plat besi saat akan menghasilkan gelombang permukaan Rayleigh. Variasi kecepatan arrival time direkam pada ke 24 sensor geophon bentang 50 m, jarak 2m (Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4).



Gambar 2. Pengambilan data MASW

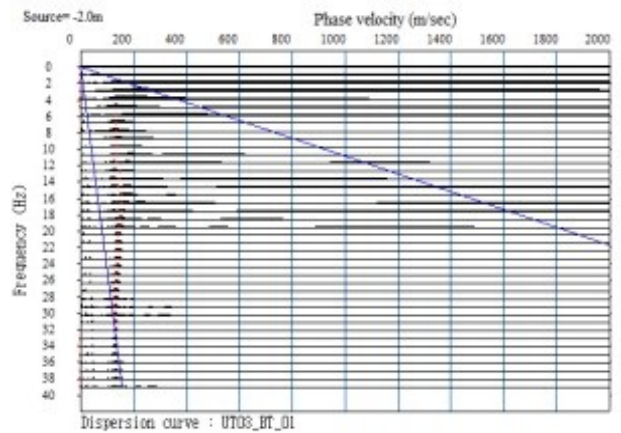


Gambar 3. Refraksi seismik dalam tanah



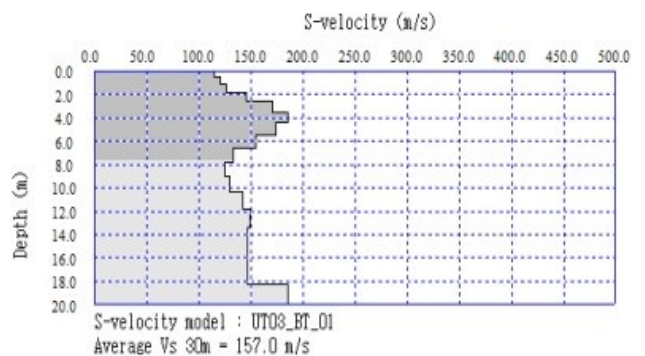
Gambar 4. Grafik Arrival Time vs Kedalaman

- 2) Transformasi dari domain waktu ke domain frekuensi pada kurva dispersi (Gambar 5).



Gambar 5. Grafik Phase vs Frekuensi

- 3) Inversi initial model, inversi dengan menghilangkan *higher mode* dan *low quality data*.
- 4) Dari beberapa kali pukulan pada satu titik dipilih data V_{S30} yang hasilnya paling baik (Gambar 6).



Gambar 6. Hasil V_{S30}

Pengambilan data elevasi dan slope dari *Suttle Radar Topography Missile* (SRTM 30). Data SRTM 30, merupakan data *open source* yang bisa diunduh dari *earthexplorer.usgs.gov* [11], melalui tahapan registrasi, setelah diunduh sesuai lokasi yang diinginkan diambil data yang *berextension* *. TIF.

Data SRTM 30 diolah dengan ArcGIS 10.1 sehingga didapat parameter elevasi dan lereng. Data ini disupervisi dengan Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan *ground control data* lapangan dengan alat Global Position System (GPS).

Pengambilan data geomorfologi genesis dari peta Sistem lahan dari Badan Informasi Geospasial (BIG) [12]. Data umur geologi didapatkan dari peta geologi digital dan manual Indonesia [13].

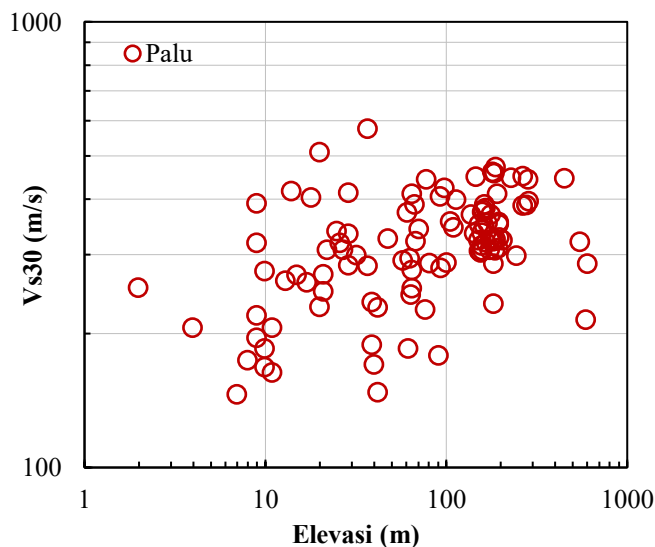
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Gambaran Umum Geomorfologi Wilayah Palu

Lembah Palu adalah wilayah yang dikelilingi oleh pegunungan disebelah kiri dan kanannya. Satuan geomorfologi yang mendominasi adalah Fluvial disepanjang daerah aliran sungai Palu hingga bermuara ke Teluk Palu. Lembah yang relatif datar dengan ketinggian yang rendah memiliki kecenderungan V_{S30} rendah. Sesar Palu Koro yang memanjang dari utara Teluk Palu ke arah tenggara terlihat jelas kenampakannya pada foto udara. Sesar ini merupakan sesar utama di Pulau Sulawesi dan tergolong sesar aktif [14]. Pegunungan disebelah kiri dan kanan Lembah Palu merupakan pegunungan dengan satuan geomorfologi Vulkanik. Disisi barat-utara terdapat daerah Karst dengan umur geologi muda, termasuk dalam wilayah ibukota Kabupaten Donggala. Sedangkan dibalik pegunungan barat dan sisi timur-utara pegunungan terdiri dari satuan geomorfologi struktural.

3.2. Bivariate Elevasi terhadap V_{S30}

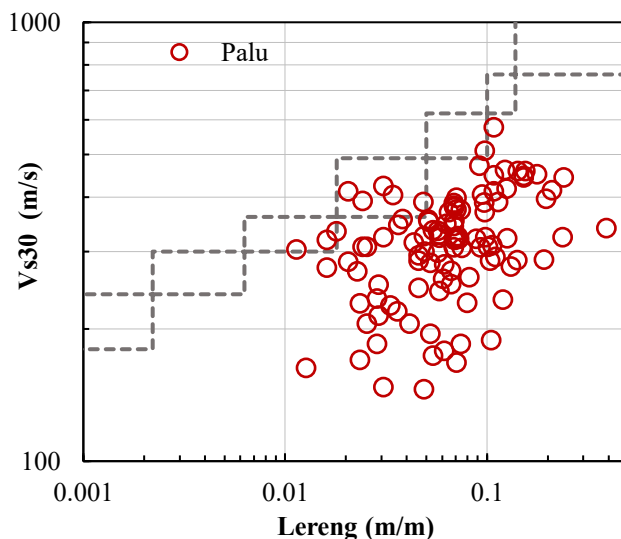
Pengolahan dengan GIS menghasilkan elevasi pada titik yang telah diambil data V_{S30} sehingga didapat grafik hubungan Bivariate seperti Gambar 7.



Gambar 7. Hubungan V_{S30} dengan Elevasi

3.3. Bivariate Lereng terhadap V_{S30}

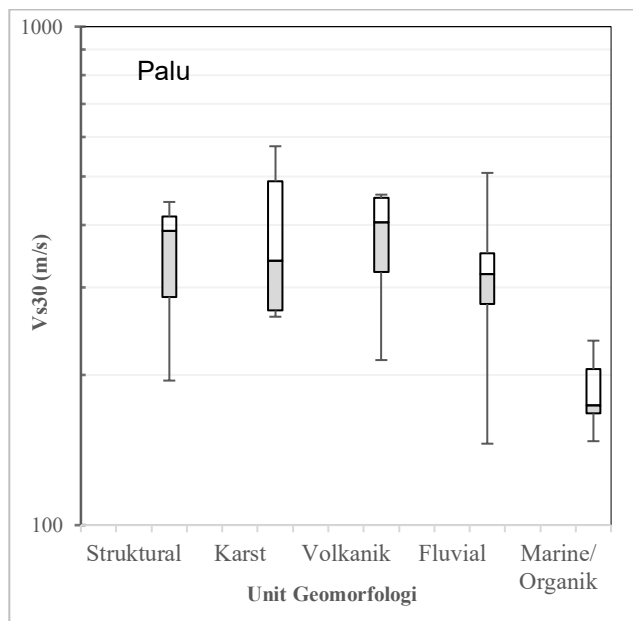
Pengolahan dengan GIS lainnya menghasilkan Lereng pada titik yang telah diambil data V_{S30} sehingga didapat grafik hubungan Bivariate seperti Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan V_{S30} dengan Lereng

3.4. Bivariate Unit Geomorfologi terhadap V_{S30}

Pengolahan peta Unit Geomorfologi yang terdiri dari unit geomorfologi Struktural, Karst, Vulkanik, Fluvial dan Organik pada titik yang telah diambil data V_{S30} sehingga didapat grafik hubungan Bivariate seperti Gambar 9.



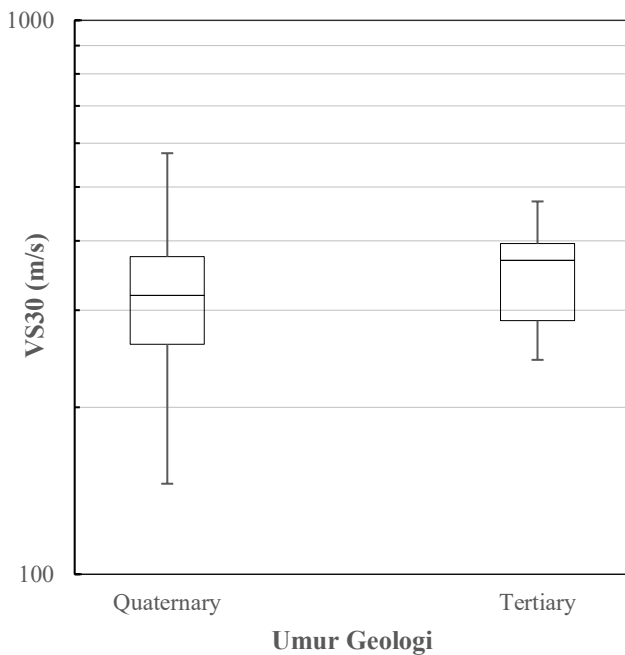
Gambar 9. Hubungan V_{S30} dengan Unit Geomorfologi

3.5. Bivariate Umur Geologi terhadap V_{S30}

Peta umur geologi yang terdiri dari Quaternary atau yang lebih muda dan Tertiary atau yang lebih tua titik yang telah diambil data V_{S30} di plot terhadap nilai V_{S30} sehingga didapat grafik hubungan Bivariate seperti Gambar 10.

Data SRTM 30 atau 1 arcsec sebagai Data Topografi berupa data raster. Download SRTM 30 wilayah yang menjadi objek penelitian pertile, olah dengan ArcGiS, untuk menggabung data raster gunakan *tools mosaik*. Ambil wilayah administrasi Palu dan sekitarnya (data poligon) digabung dengan *tools Merge*. Layar merge Palu dipakai

memotong data raster SRTM menggunakan *tools Extract by Mask*. Layar Elevasi diatur dalam UTM 50S. Dari titik - titik lokasi ril yang telah diketahui nilai V_{S30} , menggunakan *tools Extract multi value to point* pada layer Elevasi maka akan diperoleh nilai elevasi pada titik tersebut seperti Gambar 11. Penentuan Lereng dipilih *Raster surface* kemudian *slope* pilihan *persen rise*. Pastikan layar dan semua data berada pada koordinat geografi yang sama, kemudian *start editing*, jika proses berhasil keluar tanda *complete* atau tanda centang (✓). Maka didapat data lereng pada titik tersebut. Untuk penampakan sesuai kenyataan ditambahkan layar hillshade dibawah layar lereng kemudian ditransparankan 35% (Gambar 11). Data elevasi dan data lereng yang dihasilkan adalah data continuum dalam bentuk raster.



Gambar 10. Sebaran data penelitian pada peta Umur Geologi

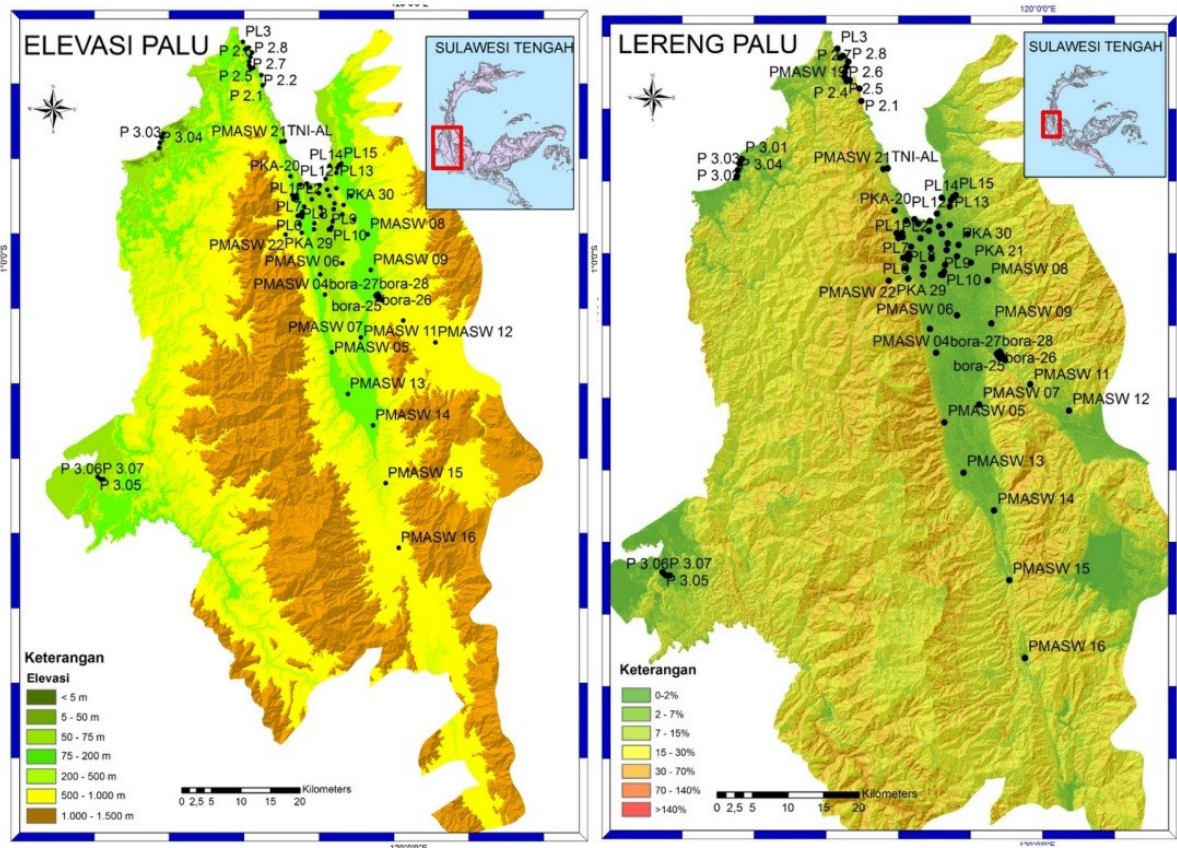
Penentuan Satuan Geomorfologi di Wilayah Palu. Dari peta sistim lahan BIG, pada *table of content* klik kanan pilih *properties* pilih *symbology* pilih *unique values* pilih *add all values* maka akan keluar satuan geomorfologinya yang terdiri dari Marine, Organik, Fluvial, Vulkanik, Karst dan Struktural. Konversi data Poligon ke Raster, dengan *tools Conversion* pilih *to Raster*. Pada data yang sudah dalam bentuk raster kemudian gunakan *tools Extract multi value to point* maka pada masing-masing titik akan diketahui jenis satuan geomorfologinya, kemudian dikelompokkan berdasarkan satuan geomorfologi. Nilai *average* atau *mean* dari tiap-tiap satuan geomorfologi dikalkulasi. Nilai *mean* dapat diisikan pada *shapefile* data poligon dengan menambah *field* pada *atributte table* sesuai dengan jenis satuan geomorfologinya. Kemudian konversi *Poligon to Raster* dengan *field, mean* satuan geomorfologi (Gambar 12). Layar raster ini siap untuk diolah lebih lanjut ke Map Algebra. Data Umur Geologi di Wilayah Palu Peta Geologi dalam bentuk *shapefile* skala 1:100.000. Dari peta Geologi *shapefile* bentuk poligon dikonversi ke raster pada *field* umur geologi akan muncul Kuarterner dan Tertier. Titik titik penelitian ditentukan apakah termasuk umur Kuarterner atau Tertier dengan *tools Extract multi value to point*, kemudian dikelompokkan berdasar umur Geologi. Nilai mean dapat diisikan pada *shapefile* data poligon dengan menambah *field* pada *atributte table* sesuai dengan umur geologinya. Kemudian konversi *Poligon to Raster* dengan *field, mean* umur geologi. Layar raster ini siap untuk diolah lebih lanjut ke Map Algebra (Gambar 12). Data diskrit ditransformasi menjadi continuum.

3.5. *Pemodelan Palu dengan SPSS*

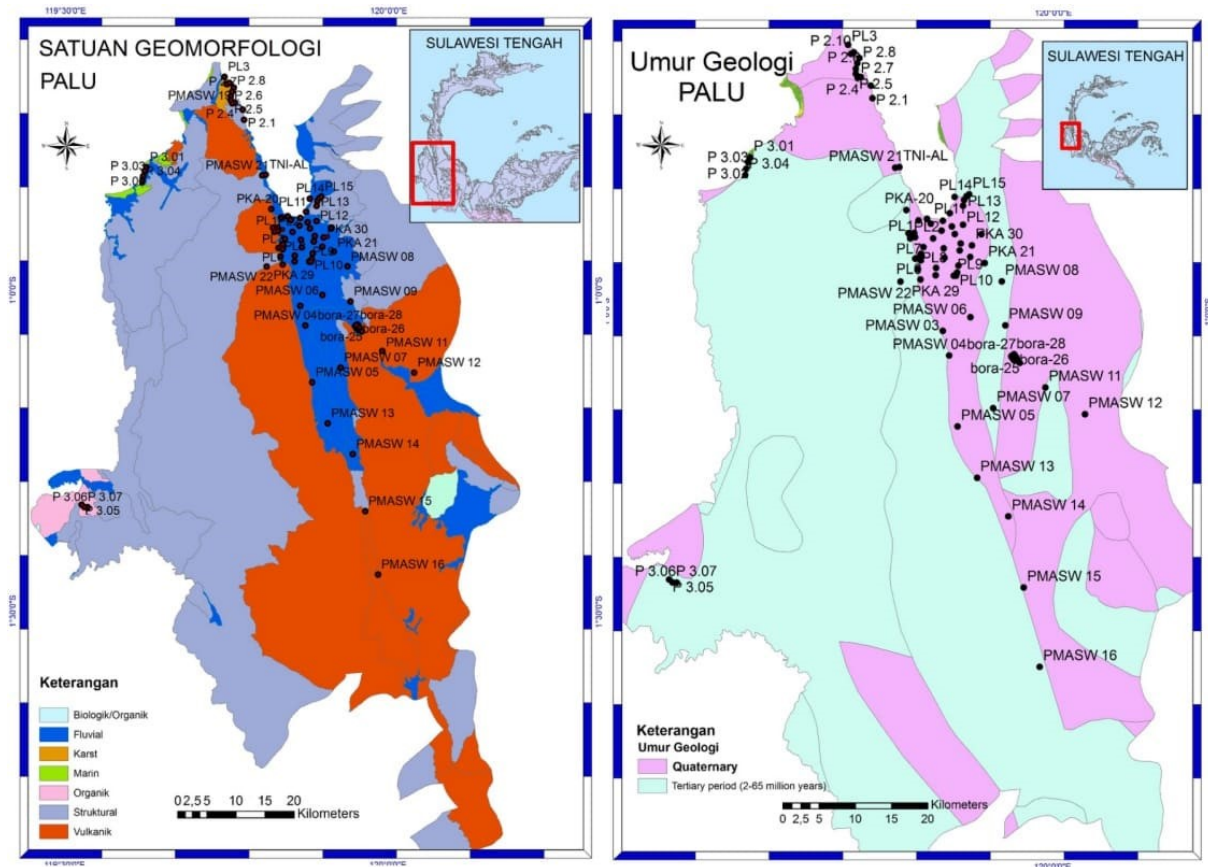
Dengan program SPSS dianalisa Regresi Linier berganda dimana, Variabel terikat adalah Y yang merupakan pengukuran langsung V_{S30} dengan alat MASW. Variabel bebas adalah X terdiri dari elevasi, lereng, unit geomorfologi dan umur geologi. Analisa regresi yang digunakan dalam nilai logaritma. Simulasi variabel bebas dibuat untuk mendapatkan model estimasi yang paling baik dan reliabel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Simulasi pemodelan variabel Wilayah Palu

Mode	C	Log Lereng S	Log Elevasi Ev	Log Satuan Geomorfologi G	Log Umur Geologi	Log StD
1	-3.925	0.062	0.069	0.665	1.824	0,097
2	0.533	0.053	0.065	0.717	0	0.100
3	-8.462	0.117	0.094	0	0.764	0.109
4	-1.231	0.087	0	0.816	0.642	0.105
5	-2.354	0	0.077	0.764	1.113	0.094
6	2.242	0.106	0.089	0	0	0.105
7	0.343	0.083	0	0.831	0	0.100
8	-5.995	0.173	0	0	3.329	0.120
9	0.381	0	0.074	0.789	0	0.095
10	-6.496	0	0.119	0	3.497	0.110
11	1.518	0	0	0.986	-0.595	0.106
12	2.361	0.161	0	0	0	0.113
13	2.283	0	0.112	0	0	0.109
14	0.046	0	0	0.977	0	0.102
15	-1.596	0	0	0	1.630	0.125



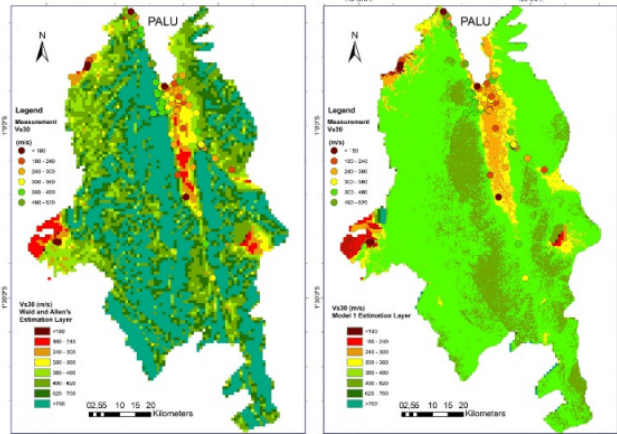
. Gambar 11. Sebaran data penelitian pada peta Elevasi dan Lereng.



. Gambar 12. Sebaran data penelitian Palu pada peta satuan geomorfologi dan peta umur geologi.

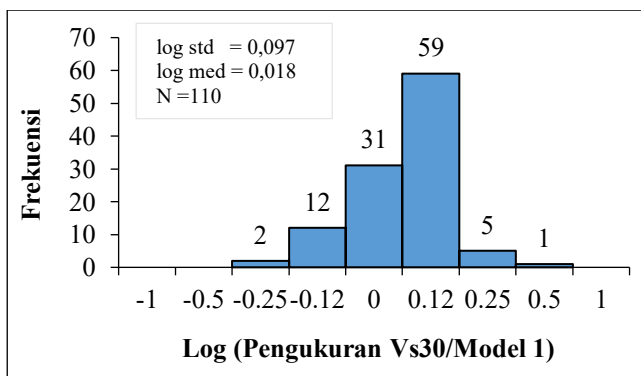
3.5. Pemodelan dengan Map Algebra

Pemodelan yang berasal dari analisa SPSS dengan simulasi variabel-variabel bebas *dirun/dianalisa* dengan program ArcGIS tools *Map Algebra*. Layer elevasi, lereng, satuan geomorfologi dan umur geologi (Gambar 11 dan Gambar 12) diolah berdasarkan persamaan regresi. Layer model estimasi divalidasi pada titik-titik pengambilan data serta titik-titik untuk validasi.



Gambar 13. Model 1 Palu dan Model Wald & Allen

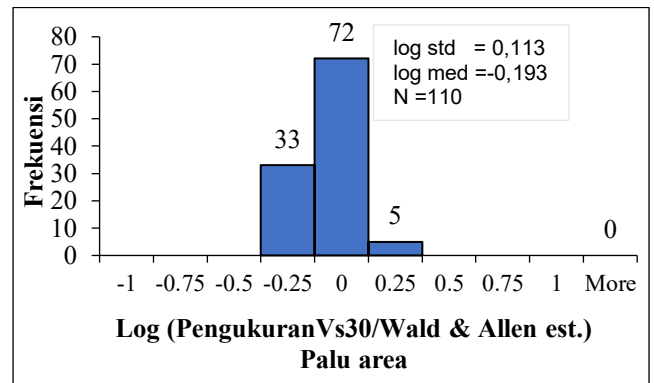
Evaluasi dilakukan dengan menguji kelima belas Model pada 110 titik pengukuran langsung V_{S30} dibandingkan dengan estimasi. Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan Model 1 Palu sebagai model terbaik dengan $\log \text{ med} = 0,018$ dan $\log \text{ std} = 0,097$. Layer Model 1 Palu kemudian dibandingkan dengan layar model USGS berbasis-lereng dari Wald & Allen. Histogram Gambar 15 menunjukkan rasio (pengukuran/est. Wald & Allen) [15]. Dari histogram Palu dapat dilihat bahwa meskipun penyebaran kurva Model 1 lebih luas dibandingkan dengan est. Wald dan Allen tetapi standar deviasi log dari est. Wald dan Allen adalah 0,113 sedangkan Model 1 adalah 0,097.



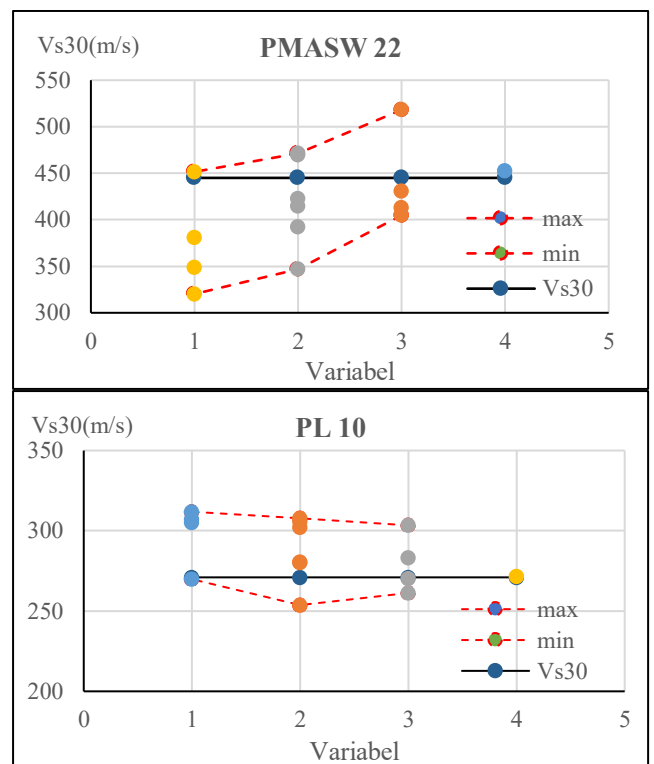
Gambar 14. Histogram Ratio (Pengukuran/ Model 1 Palu dari Variabel Lereng, Elevasi, Satuan Geomorfologi, Umur Geologi)

Model dengan empat variabel memberikan nilai yang sedikit lebih tinggi atau lebih rendah tetapi dalam kisaran yang tidak jauh dari pengukuran langsung. Perbandingan Model 4 variabel lebih mendekati pengukuran langsung

dibanding dengan Model 1, 2 dan 3 variabel dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 15. Histogram ratio (pengukuran V_{S30} /estimasi Wald & Allen)



Gambar 16. Model dengan Variabel 1, 2, 3 dan 4

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- 1) Penelitian pemodelan estimasi V_{S30} menghasilkan model dengan empat variabel yaitu lereng, elevasi, unit geomorfologi dan umur geologi pada wilayah Palu.
- 2) Model estimasi V_{S30} dalam bentuk persamaan logaritma sebagai berikut, $\text{Log } V_{S30} = a + b \log (s) + c \log (Ev) + d \log (G) + e \log (A)$. Koefisien untuk kota Palu a, b, c, d, e berturut-turut -3,925, 0,062, 0,069, 0,665 dan 1,824. Model dengan empat variabel memberikan nilai yang sedikit lebih tinggi atau lebih rendah tetapi dalam kisaran yang tidak jauh dari pengukuran langsung.

- 3) Hasil analisis pengolahan data menunjukkan bahwa kondisi lokal sangat mempengaruhi estimasi V_{S30} di kota Palu. Kota Palu didominasi oleh satuan geomorfologi Fluvial. Efek satuan geomorfologis dan umur geologis perlu dipertimbangkan dalam memperkirakan nilai V_{S30} .
- 4) Sebagai kesimpulan umum, metode ini memungkinkan untuk mendefinisikan daerah-daerah dengan perilaku serupa. Keandalannya tergantung pada kualitas investigasi yang tersedia dan efektivitas pengaturan satuan geomorfologi dan peta umur geologi. Model estimasi V_{S30} ini sesuai untuk klasifikasi tanah pada skala regional dan dapat diadopsi untuk peta mikrozonasi kelas I atau real-time shake.

Daftar Pustaka

- [1] SNI 1726-2012. SNI 1726, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: BSN, 2012.
- [2] J.W. Scott, V. Lacrosse, M. Stannard, J. Russell, and S.V. Ballegooy, *The Benefits and Opportunities of a Shared Geotechnical Database*, Christchurch: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015.
- [3] D.J. Wald and T.I. Allen, "Topographic Slope as A Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 97, no. 5, p. 1379, 2007.
- [4] D.J. Wald, L. McWhirter, E. Thompson, and A.S. Hering, *A New Strategy for Developing VS30 Maps*, Santa Barbara: University of California Santa Barbara, 2011.
- [5] D.J. Wald and T.I. Allen, "On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Condition (VS 30)", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 99, p. 935, 2009.
- [6] E.M. Thompson, D.J. Wald, and C.B. Worden, "A VS30 Map for California with Geologic and Topographic Constraints", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 104, no. 5, p. 2313, 2014.
- [7] E.M. Thompson and D.J. Wald, "Developing Vs30 Site-Condition Maps by Combining Observations with Geologic and Topographic Constraints", *Proc. the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 3, p. 1, 2012.
- [8] M. Matsuoka, K. Wakamatsu, K. Fujimoto, and S. Midorikawa, "Average Shear-Wave Velocity Mapping using Japan Engineering Geomorphologic Classification Map", *Journal Structural Engineering & Earthquake Engineering*, vol. 23, p. 1, 2006.
- [9] W.A. Prakoso, "Strong-Motion Instrument Spatial Distribution Model for Indonesia", *ASCE Natural Hazards Review*, vol. 15, no. 2, p. 104, 2014.
- [10] W.A. Prakoso, I.N. Sukanta, E. Santoso, and D. Damoerin, "Comparison of Vs,30 Based on Seismic Down Hole and MASW Methods", *Proc. ISGE Annual Conference*, vol. 5, p. 1, 2013.
- [11] <https://earthexplorer.usgs.gov>, *SRTM 3 /1Arcsec*, accessed on July 18, 2023
- [12] Badan Informasi Geospasial, *Peta Sistem Lahan*, Jakarta: BIG, 2023.
- [13] Badan Informasi Geospasial, *Peta Geologi Indonesia*, Jakarta: BIG, 2023.
- [14] P.S. Thien, "Estimation of S-wave Velocity Structure for Sedimentary Layered Media Using Microtremor Array Measurements in Palu City, Indonesia", *Procedia Environmental Sciences*, vol. 28, p. 1, 2015.
- [15] United States Geological Survey (USGS), *Custom VS,30 Mapping*, New York: USGS, 2014.
- [16] A. Rahayu, W.A. Prakoso, I.A. Sadisun, A.S. Muntohar, M. Muzli, and A. Rudyanto, "Comparing Shear-Wave Velocity from MASW with Borehole Measurement at Merapi Sediment in Yogyakarta", *IJTech*, vol. 6, p. 993, 2017.