



Akurasi Perhitungan 3D Volume Galian Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II Menggunakan GIS

D. P. Wahyudi¹, A. Riyanto^{2*}

^{1,2*}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta,
Indonesia

Email: ¹d100190006@student.ums.ac.id, ^{2*}ar242@ums.ac.id

ARTICLE INFO

Article history :

Artikel masuk : 09-06-2023
Artikel revisi : 22-06-2023
Artikel diterima : 30-06-2023

Keywords :

Average End Area, Earthwork
Volume, Kriging, Triangulated
Irregular Network.

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

D. P. Wahyudi, and A. Riyanto, "Akurasi Perhitungan 3D Volume Galian Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II Menggunakan GIS," *Jurmateks*, vol.6, no.1, pp. 71-83 2023, doi: 10.30737/jurmateks.v6i1.4734

ABSTRACT

Calculation of excavation volume is one of the important activities in earthworks. Volume calculations are still done manually for some projects using Microsoft Office Excel. These calculations are time-consuming and prone to errors. The use of DTM-based 3D models in calculating excavation volume is an important thing that needs to be done for work efficiency. This study aims to determine the accuracy of the 3D-based Digital Terrain Method (DTM) in calculating excavation volume. The data used comes from a topographic survey of 64 points. Volume calculations were performed using the 2D Average End Area and 3D DTM-based methods (TIN and Kriging) using ArcGIS. The calculation results will be compared with the actual data from the project excavation volume report. The results show that the 3D volume calculation has fairly good accuracy compared to the traditional average end area method, with a difference of 1.01%. TIN can represent the results of the calculation of the excavation volume, which is quite good, with a difference of 1.33% to the actual volume and RMSE 107.49 m³. This is because the land surface under review is a mountainous area, where the formed surface tends to be uneven, and elevation changes sharply. This is in accordance with the characteristics of the DTM formed by TIN. So the selection of the most appropriate surface modeling method in mountainous areas is TIN. Using the TIN method can minimize the difference in volume calculations and increase the accuracy of soil volume calculations.

1. Pendahuluan

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) telah menjadi salah satu destinasi wisata yang populer di Indonesia. Pada tahun 2022, DIY mendapati kunjungan wisata sebanyak 7,4 juta orang [1]. Keindahan alam dan budaya yang kuat memiliki daya tarik tersendiri. Di wilayah pesisir selatan Yogyakarta, terdapat Pantai Parangtritis yang dikenal sebagai ikon pariwisata DIY. Pantai ini terkenal dengan garis pantai yang luas dan pasir putih yang indah. Sebagai

Akurasi Perhitungan 3D Volume Galian Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II Menggunakan GIS

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i1.4734>



upaya untuk memberikan akses ke sejumlah destinasi di wilayah pesisir selatan Yogyakarta, pemerintah telah membangun jalan jalur lintas selatan (JJLS). Pembangunan tersebut merupakan keputusan politik nasional [2].

Proyek pembangunan jalan Tepus Jerukwudel II merupakan bagian dari proyek JJLS Yogyakarta. Sebagai proyek pembangunan jalan baru, pekerjaan tanah menjadi fokus utama dalam pelaksanaannya. Salah satu kegiatan utama dalam pekerjaan tanah adalah galian dan timbunan. Dalam kegiatan ini, perhitungan volume yang akurat diperlukan untuk menentukan jumlah tanah yang harus digali dan ditimbun [3][4]. Namun, saat ini perhitungan volume masih dilakukan secara konvensional menggunakan *Microsoft Office Excel* [5]. Metode tersebut memakan waktu yang cukup lama dan rentan terhadap kesalahan manusia [6][7]. Selain itu, perhitungan manual juga tidak secara teoritis menggambarkan secara akurat bentuk permukaan, sehingga dapat mengakibatkan ketidakakuratan dalam estimasi volume. Hal ini berpotensi menyebabkan ketidaksesuaian antara desain yang direncanakan dengan hasil akhir pelaksanaan proyek [8].

Umumnya, metode utama yang digunakan untuk mengumpulkan data yang diperlukan dalam estimasi informasi volumetrik adalah metode survei terestrial atau konvensional yang melibatkan penggunaan theodolit, instrumen level, total station, serta sistem satelit navigasi global (GNSS) [9]. Data X, Y, dan Z yang diperoleh dari survei diolah menjadi 2D ataupun 3D Model. Penggunaan model permukaan 3D akan dapat memperhitungkan perbedaan elevasi yang sebenarnya dan kompleksitas bentuk permukaan medan [10]. Data diproses di ArcGIS untuk menghasilkan model TIN memiliki persentase selisih 2,9% dari volume sebenarnya [11]. Metode *Average End Area* digunakan sebagai metode perhitungan volume pekerjaan tanah yang representative dan metode model permukaan digital diterapkan untuk meninjau optimasi perhitungan volume pekerjaan tanah menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) [12]. Selain itu, metode *Average End Area* juga digunakan dalam optimasi alinyemen vertikal [13].

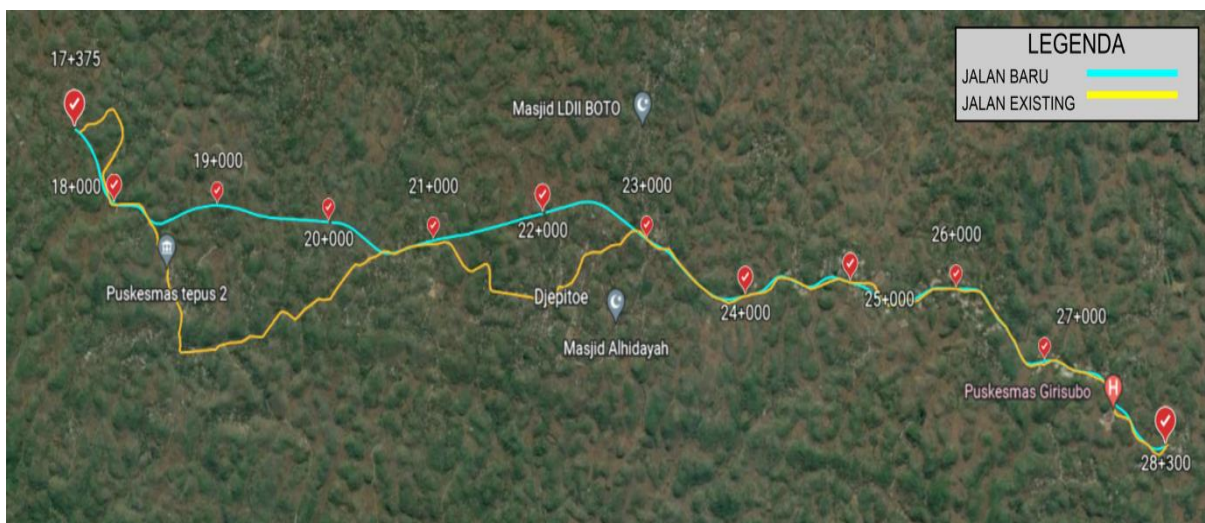
Meskipun 2D model seperti Metode *Average End Area* tidak secara teoritis akurat, namun dalam praktiknya masih digunakan dalam berbagai rekayasa. Seperti halnya yang dilakukan dalam Proyek pembangunan jalan Tepus Jerukwudel II. Namun, penggunaan 3D berbasis *Digital Terrain Model* (DTM) dalam perhitungan volume galian menjadi hal penting yang perlu dilakukan. Hal tersebut akan membantu efisiensi pekerjaan galian dan timbunan pada Proyek pembangunan jalan Tepus Jerukwudel II.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui akurasi perhitungan 3D model berbasis DTM dibandingkan dengan 2D model yang umum digunakan. Sehingga diharapkan dapat

meningkatkan efisiensi pekerjaan galian memberikan pemahaman yang lebih jelas tentang sejauh mana 3D model dapat meningkatkan akurasi perhitungan volume tanah.

2. Metodologi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II dengan koordinat $8^{\circ}08'57.3''$ LS dan $110^{\circ}44'32.1''$ BT yang memiliki panjang sekitar 10,925 km. Pekerjaan tanah melibatkan area antara STA17+375 hingga 28+300, sementara evaluasi perhitungan difokuskan pada galian STA 20+250 hingga 20+400. Data yang digunakan meliputi hasil pengukuran topografi yang mencakup koordinat x, y, dan z serta laporan volume galian proyek. Penelitian melibatkan perhitungan volume menggunakan metode *Average End Area* (2D) dan mengintegrasikan metode 3D berbasis DTM. Pemodelan 3D dilakukan dengan pembuatan permukaan *Triangulated Irregular Network* (TIN) dan raster grid. Selanjutnya, dilakukan perbandingan antara volume yang tercatat dalam laporan proyek, volume yang dihitung menggunakan metode *Average End Area*, dan volume yang dihasilkan dari model 3D (TIN dan Grid).



Sumber : Data Peneliti, (2023).

Gambar 1. Jalan Baru Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II

Dapat dilihat pada **Gambar 1** bahwa Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II ini terletak di area pegunungan dengan karakteristik tanah yang sangat tidak teratur.

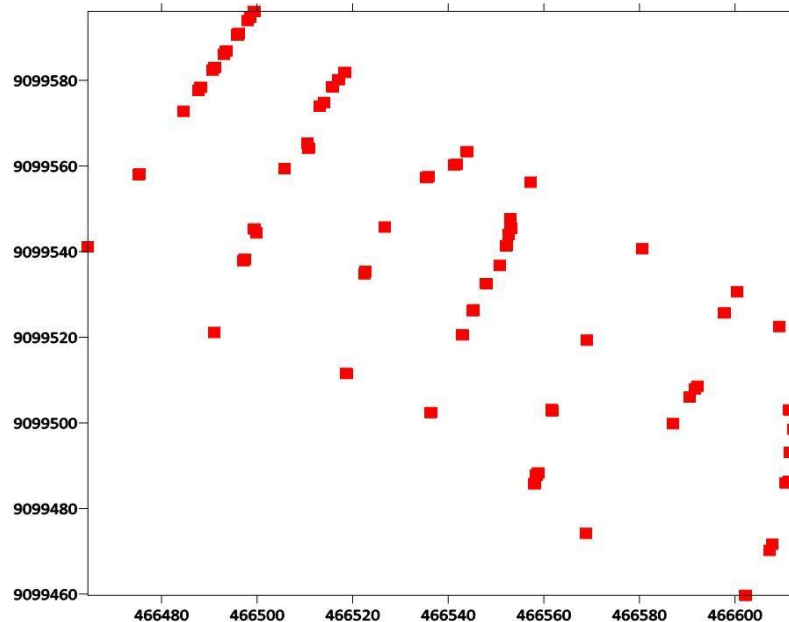
2.1 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan meliputi data topografi yang mencakup informasi tentang elevasi, bentuk permukaan, dan koordinat titik-titik pada area proyek serta laporan volume galian tanah proyek. Pengambilan data topografi dilakukan menggunakan *Total Station* dan direpresentasikan dalam bentuk *cross section*. Sedangkan koordinat lokasi diambil

Akurasi Perhitungan 3D Volume Galian Proyek Pembangunan Jalan Tepus-Jerukwudel II Menggunakan GIS

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i1.4734>

menggunakan *receiver* GPS. Penggunaan pengukuran GPS memungkinkan pengumpulan data koordinat titik-titik pada permukaan tanah serta memberikan informasi tentang elevasi dan bentuk permukaan tanah secara detail. Adapun data topografi yang didapatkan divisualisasikan pada **Gambar 2**.



Sumber : Data Peneliti ,(2023).

Gambar 2. Sebaran Data Titik Pengamatan

Hasil pengukuran topografi (koordinat x, y, dan z) digambarkan ke dalam *scatterplot* untuk menganalisis pola sebaran data. Dalam penelitian ini, telah diamati sebanyak Sebanyak 118 titik pengukuran yang menghasilkan pola sebaran data yang cukup seragam. Pola sebaran tersebut akan mempengaruhi pemilihan metode *surface modelling*.

2.2 *Average End Area*

Metode *Average End Area* melibatkan pengukuran atau estimasi luas penampang pada dua titik ujung profil tanah yang berbeda dan kemudian mengambil rata-rata luas penampang tersebut. Dengan demikian, metode ini mengasumsikan bahwa penampang tanah antara dua titik ujung secara umum membentuk pola yang teratur atau berkesinambungan. Volume tanah kemudian dihitung dengan mengalikan rata-rata luas penampang dengan jarak horizontal antara dua titik ujung profil.

2.3 *Digital Terrain Model (DTM)*

DTM dibuat dengan software ArcGIS dan dibentuk menggunakan data topografi yang telah didapatkan berdasarkan pengukuran lapangan. Adapun pendekatan yang digunakan adalah TIN dan Grid-based interpolation (Kriging) [14], [8]. Dalam metode kriging, data hasil pemetaan tanah akan dikonversi dalam bentuk grid. Dalam pengaplikasiannya digunakan

pemilihan parameter model variogram, metode interpolasi, *cutoff distance*, dan *cell size*. Setelah proses interpolasi dilakukan, maka data DTM akan terbentuk. Melalui pemodelan ini akan didapatkan pula potongan melintang dan dapat dilakukan perhitungan volume berdasarkan data tersebut. Sedangkan TIN dibuat melalui data penampang yang mencakup informasi elevasi sebagai input dalam ArcGis untuk membuat dataset feature. Melalui tools "Create TIN" maka TIN dapat terbuat. Dalam pembuatannya digunakan beberapa parameter parameter seperti toleransi atau pengaturan tingkat kehalusan TIN. Kemudian hasil yang didapatkan berupa data DTM yang akan digunakan untuk mengetahui cross section dan estimasi volume pekerjaan tanah [15].

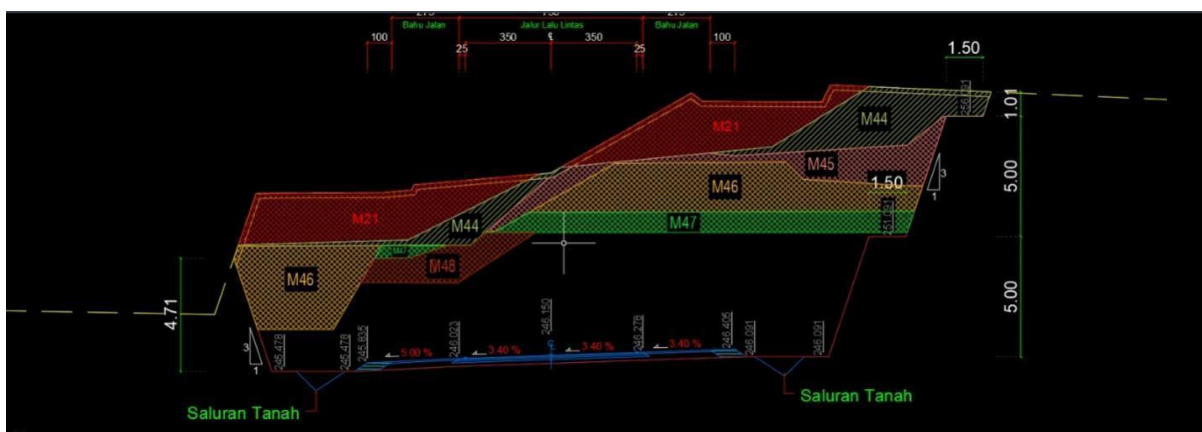
2.4 Akurasi

RMSE mengukur tingkat kesalahan rata-rata antara nilai prediksi dan nilai aktual dalam suatu model atau perhitungan [16]. Dengan mengacu spesifikasi yang ditetapkan oleh (*American Standard Testing and Material*) ASTM International 2007. Toleransi yang diijinkan adalah $\pm 2.78\%$ pada. Analisis hasil dilakukan dengan dengan membandingkan persentase perbedaan perhitungan volume 3D model dan *Average End Area* terhadap laporan volume galian proyek.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Average End Area

Berdasarkan hasil survey pemetaan, didapatkan peta topografi dengan *cross section* yang diilustrasikan pada **Gambar 3**.



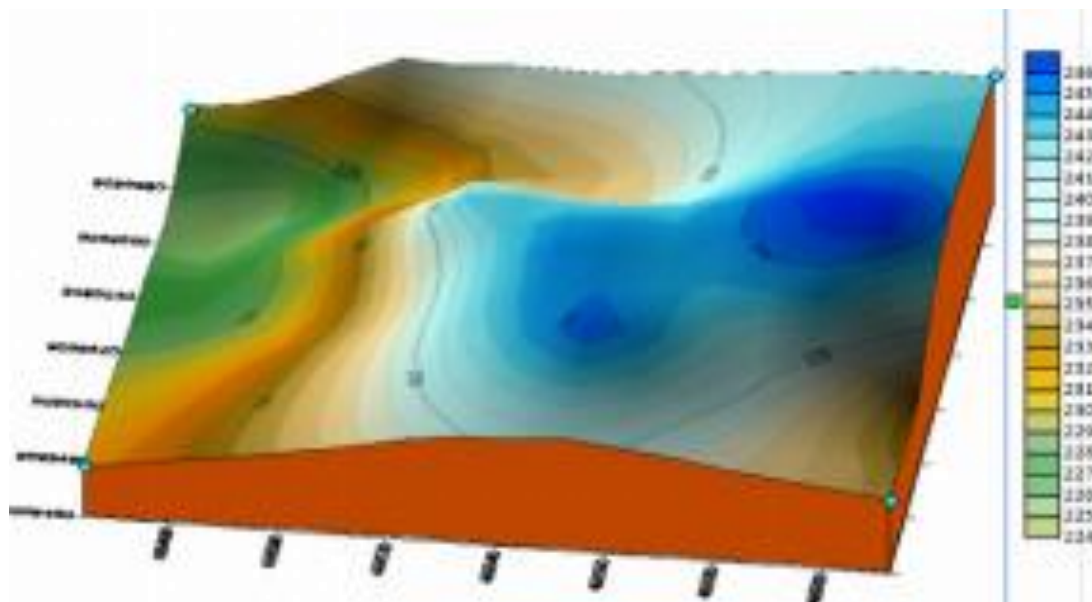
Sumber: Hasil Analisis, (2023).

Gambar 3. Cross Section Metode Average End Area

Metode average area ini merupakan metode yang populer dan relatif sederhana dalam mengestimasi volume tanah. Namun, metode ini memiliki batasan ketika digunakan untuk

profil yang sangat kompleks atau berubah secara tajam. Selain itu, hasil *cross section* yang ditunjukkan juga tidak dapat menggambarkan secara halus perubahan ketinggian tanah pada setiap titiknya.

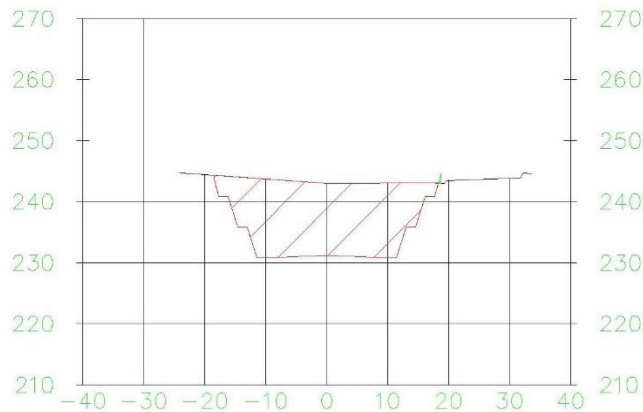
3.2 Digital Terrain Model Kriging



Sumber: Hasil Analisis,(2023).

Gambar 4. DTM Metode Kriging

Gambar 4 menunjukkan representasi visual dari hasil interpolasi elevasi permukaan tanah metode Kriging. Secara visual metode kriging dapat menggambarkan titik yang tidak diukur secara halus. Hal tersebut dikarenakan kriging mengasumsikan bahwa data pengukuran memiliki sifat stasioneritas, yang berarti nilai rata-rata, varians, dan kovarians antara pasangan titik data tidak berubah dengan pergeseran posisi atau orientasi [17]. Sehingga kriging akan memprediksi titik yang tidak diukur dengan memanfaatkan pola spasial yang terdeteksi. Selain itu, Kriging mampu meminimalkan varians estimasi kesalahan dari permukaan yang dihasilkan [18]. Keakuratan kriging dalam merepresentasikan permukaan tanah sesuai kondisi nyata bergantung pada parameter dan model variogram yang dibentuk. Dari pemodelan tersebut digambarkan potongan melintang pada **Gambar 5**.

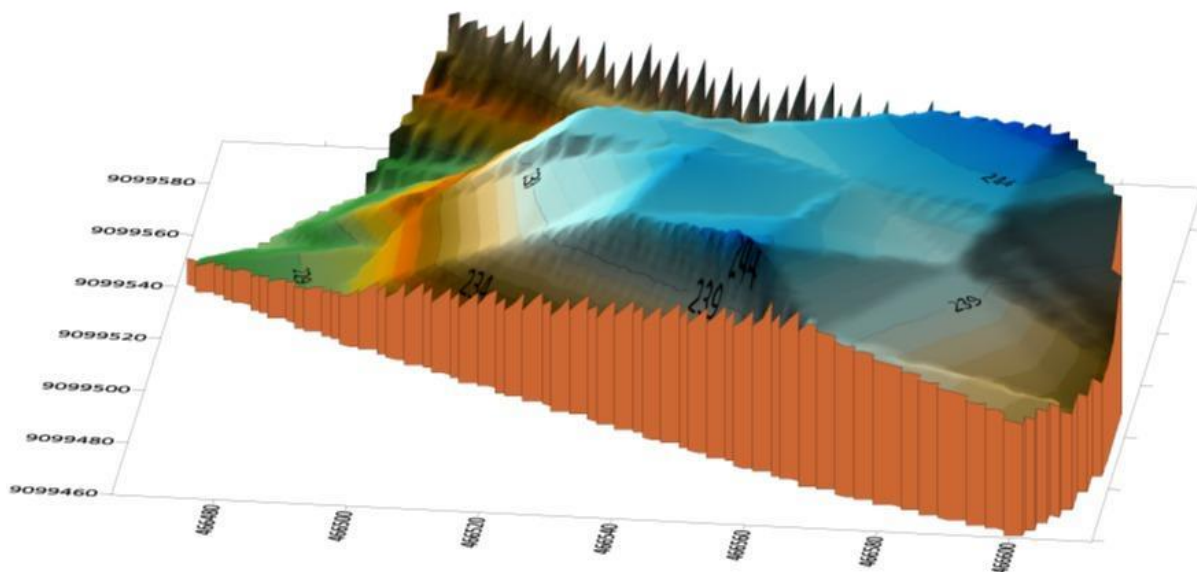


Sumber: Hasil Analisis,(2023).

Gambar 5. Hasil Cross Section Data Gridding

Dari gambar **Gambar 5** diketahui bahwa bentuk potongan melintang yang dihasilkan melalui metode Kriging cenderung memiliki pola yang lebih halus dan detail yang lebih terdefinisi serta mampu merepresentatifkan keadaan asli. Metode Kriging mampu menginterpolasi data dengan memperhitungkan keterkaitan spasial antara titik-titik data, sehingga menghasilkan cross section yang mengikuti pola elevasi yang lebih halus [19]. *Cross validation* menunjukkan bahwa, MAE dan RMSE, kriging mampu meningkatkan akurasi hingga 60% dibandingkan dengan Inverse Distance Weighting (IDW) [20].

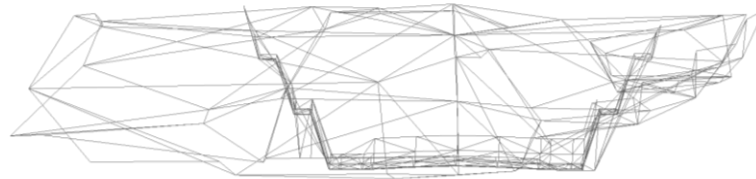
3.3 Digital Terrain Model TIN



Sumber: Hasil Analisis,(2023).

Gambar 6. DTM Metode TIN

Berdasarkan **Gambar 6** pola elevasi yang terbentuk dari metode TIN cenderung menunjukkan perubahan yang lebih tajam dan tersegmentasi jika dibandingkan dengan metode pemodelan permukaan lainnya seperti kriging. Hal tersebut dikarenakan TIN menghasilkan jaringan yang disebut *irregular* dimana segitiga-segitiga yang terbentuk tidak memiliki ukuran atau bentuk yang seragam [21]. Metode TIN membangun model elevasi dengan membagi area menjadi segitiga-segitiga yang saling terhubung. Pola yang terbentuk memberikan gambaran yang lebih jelas tentang variasi topografi dan fitur-fitur detail di area yang dianalisis [22]. Dari pemodelan tersebut digambarkan potongan melintang pada **Gambar 7**.



Sumber: Hasil Analisis,(2023).

Gambar 7. Hasil Cross Section Data TIN

Jika dibandingkan dengan gambar hasil pengukuran langsung dilapangan yang direpresentasikan pada AutoCAD, potongan melintang yang dihasilkan melalui metode TIN cenderung memiliki perubahan yang lebih kasar atau kurang detail. Hal ini disebabkan oleh interpolasi linear yang dilakukan di dalam setiap segitiga dalam TIN. Karena segitiga-segitiga tersebut mungkin memiliki sisi-sisi dengan panjang yang berbeda dan sudut yang berbeda, hasil potongan melintang dari TIN mungkin tidak cukup halus. Dengan kekasaran yang dibuat, metode TIN belum tentu dapat dikatakan tidak merepresentatifkan keadaan asli. Berdasarkan *cross validation*, TIN dapat membuat cross section dengan tingkat kesalahan di antara -0.880m hingga 0.919 m dengan RMSE 0.018 m [23].

3.4 Volume Galian

Tabel 1. Perbandingan Volume Aktual, *Average End Area* dan *Digital Terrain Model*

STA	Volume Aktual (Laporan Proyek) m ³	Average End Area m ³	Digital Terrain Model		Selisih		
			Kriging m ³	TIN m ³	Average End Area m ³	Kriging m ³	TIN m ³
20+275	1302.63	1334.15	1270.52	1405.56	31.515	32.11	102.93
20+300	5577.88	5563.76	5430.73	5785.44	14.119	147.15	207.56
20+325	9304.75	8974.82	9140.53	9409.84	329.93	164.22	105.09
20+350	9629	9395.64	9526.04	9628.95	233.365	102.96	0.05
20+375	7829.88	7627.74	7665.03	7837	202.145	164.85	7.12
20+400	3230.38	3177.3	3119.33	3297.86	53.076	111.05	67.48
Total	36874.5	36073.4	36152.2	37364.7	864.15	722.34	490.23

Sumber: Hasil Penelitian,(2023).

Dalam **Tabel 1**, Hasil perbandingan ketiga metode dengan volume aktual menunjukkan bahwa TIN mempunyai selisih yang paling kecil. Perhitungan volume dengan metode Kriging dan average end area menghasilkan total selisih masing masing sebesar 722,34 m³ dan 864,15 m³. Sementara itu, volume dengan metode TIN hanya menunjukkan total selisih sebesar 490.23 m³. Adapun selisih dalam persentase sebesar 2,34% untuk Average End Area, 1,96% untuk Kriging, dan 1,33% untuk TIN. Mengacu pada ASTM International 2007, toleransi yang diijinkan adalah 2.78%. Maka dapat diindikasikan bahwa semua metode masih dalam batas toleransi. Selain itu, hal tersebut menunjukkan bahwa perhitungan volume menggunakan 3D terbukti mampu mewakili perhitungan aktual yang ada.

Untuk mengetahui akurasi dari keandalan setiap metode dalam menghitung volume, maka digunakan metrik evaluasi RMSE. Metode average end area dan kriging mempunyai RMSE masing masing 186,27 m³ dan 128.94 m³, sedangkan TIN mempunyai RMSE 107.49 m³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode TIN memiliki RMSE yang lebih rendah dibandingkan dengan metode average end area dan kriging. RMSE yang lebih rendah menandakan adanya perbedaan yang lebih kecil antara nilai yang diestimasi oleh metode TIN dengan nilai aktual. Dengan demikian, metode TIN dapat dianggap lebih akurat dalam mengestimasi volume galian.

Metode TIN memiliki selisih perhitungan volume galian dan RMSE yang paling kecil. Hal ini dikarenakan permukaan tanah yang ditinjau merupakan area pegunungan, dimana permukaan yang terbentuk cenderung tidak rata dan perubahan ketinggian yang tajam. Di lain sisi, karakteristik kriging cenderung membuat permukaan yang halus dikarenakan sifat kriging yang memprediksi titik yang tidak diukur dengan memanfaatkan pola spasial yang terdeteksi [24]. Hal ini kurang cocok apabila diterapkan pada permukaan yang cenderung tidak rata. Sedangkan metode average end area mempunyai selisih yang cukup besar, hal ini dikarenakan metode ini hanya menghitung volume berdasarkan luas penampang yang diamati pada interval tertentu, tanpa mempertimbangkan perubahan signifikan di antara interval tersebut [12]. Akibatnya, perubahan ketinggian yang tajam seperti area pegunungan tidak dapat digambarkan secara akurat.

Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Ragab Khalil, dimana kriging mempunyai akurasi yang lebih baik apabila dibandingkan dengan metode average end area. Hasil mengungkapkan bahwa kriging mempunyai app rate sebesar 91,3% dan average end area sebesar 74,2% [6]. Selain itu, Fakir et.al mengungkap bahwa TIN lebih baik dan direkomendasikan dalam menggambarkan permukaan tanah jika dibandingkan Kriging [25].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan bahwa perhitungan Volume 3D memiliki akurasi cukup baik dibandingkan metode tradisional average end area dengan selisih 1.01%. TIN mampu mewakili hasil perhitungan volume galian yang cukup baik dengan selisih 1,33% terhadap volume aktual dan RMSE 107.49 m³. Hal tersebut dikarenakan permukaan tanah yang ditinjau merupakan area pegunungan, dimana permukaan yang terbentuk cenderung tidak rata dan perubahan ketinggian yang tajam. Hal ini sangat sesuai dengan karakteristik DTM yang dibentuk oleh TIN. Sehingga pemilihan metode pemodelan permukaan yang paling tepat pada area pegunungan adalah TIN. Dengan menggunakan metode TIN ini mampu meminimalisir selisih perhitungan volume dan meningkatkan akurasi perhitungan volume tanah.

Daftar Pustaka

- [1] E. A. Rusqiyanti, “Yogyakarta catat 7,4 juta Wisatawan Berkunjung Sepanjang 2022,” *AntaraNews*, 2023.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, “Pembangunan JJLS Jadi Keputusan Politik Nasional,” *Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*, 2004.
- [3] I. Firmansyah and Y. Budisusanto, “Analisis Perbandingan Volume pada Tikungan Jalan Menggunakan Metode Perhitungan Volume yang ada pada Aplikasi Pengolah Data Survei,” *J. Tek. ITS*, vol. 11, no. 2, pp. 108–114, 2022.
- [4] B. Zhao, B. Tan, Q. Chen, and G. Liu, “Railway Line Cross-Section Drawing and Earthwork Calculation Based on AutoCAD Secondary Development Bingqian,” *CICTP 2020*, pp. 4611–4623, 2020.
- [5] S. B. Lee, D. Han, and M. Song, “Calculation and Comparison of Earthwork Volume Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry and Traditional Surveying Method,” *Sensors Mater.*, vol. 34, no. 12, pp. 4737–4753, 2022.
- [6] R. Khalil, “Credibility of 3D Volume Computation Using GIS for Pit Excavation and Roadway Constructions,” *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, 2015, doi: 10.3844/ajeassp.2015.434.442.
- [7] R. Babapour, R. Naghdi, I. Ghajar, and R. Ghodsi, “New strategies for estimation of cut and fill areas in road design with different ground cross-section offsets,” *Scand. J. For. Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1080/02827581.2017.1338748.
- [8] W. Yongxiao, Y. Xitun, Y. Xiongfei, Z. Hang, and H. Qi, “Research on Earthwork Calculation Based on TIN Model,” *E3S Web Conf.*, vol. 03001, 2021.
- [9] Y. Wei, S. Lidar, I. Hanis, and A. Hamid, “Summary of calculation methods of engineering earthwork,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1802, no. 032002, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1802/3/032002.
- [10] S. Il Lim, J. H. Lim, S. B. Yun, and H. Cheon, “A Study on DEM-based Automatic Calculation of Earthwork Volume for BIM Application,” *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.*, vol. 38, no. 2, pp. 131–140, 2020.
- [11] O. G. Ajayi and J. Ajulo, “Investigating The Applicability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry For The Estimation of The Volume of Stockpiles,” *Quastiones Geogr.*, vol. 40, no. 1, pp. 25–38, 2021.

- [12] Y. H. Kim, S. S. Shin, H. K. Lee, and E. S. Park, "Field Applicability of Earthwork Volume Calculations Using Unmanned Aerial Vehicle," *Sustainability*, vol. 14, no. 9331, 2022, doi: 10.3390/su14159331.
- [13] A. Artun, V. Badenko, Y. Volkova, and A. Radaev, "Minimizing earthwork volumes by optimizing vertical alignment with linear programming algorithm," *E3S Web Conf.*, vol. 03028, no. 224, 2020.
- [14] H. S. Ramadhan, A. Kurniawan, and M. R. Darminto, "Analisis Perhitungan Volume Galian Tambang Terbuka (Open Pit Mining) Menggunakan Interpolasi Metode Gridding," *Geoid J. Geod. Geomatics*, vol. 17, no. 1, pp. 99–107, 2021.
- [15] F. A. Ali, "Comparison among Height Observation of GPS , Total Station and Level and their suitability in Mining Works by using GIS Technology," *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 4, no. 7, 2017.
- [16] A. Berninger and F. Siegert, "The potential of icesat-2 to identify carbon-rich peatlands in indonesia," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 24, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/rs12244175.
- [17] M. G. Mustafin, A. A. Kologrivko, and B. Y. Vasiliev, "Accuracy of digital terrain modeling based on periodic airborne laser scanning of a mining object," *Gorn. Zhurnal*, vol. 2023, no. 2, pp. 56–62, 2023, doi: 10.17580/gzh.2023.02.09.
- [18] P. Biernacik, W. Kazimierski, and M. Włodarczyk-Sielicka, "Comparative Analysis of Selected Geostatistical Methods for Bottom Surface Modeling," *Sensors*, vol. 23, no. 8, 2023, doi: 10.3390/s23083941.
- [19] V. Q. Thanh, D. Roelvink, M. van der Wegen, L. X. Tu, J. Reyns, and V. T. P. Linh, "Spatial Topographic Interpolation for Meandering Channels," *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, vol. 146, no. 5, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000582.
- [20] Y. Feng *et al.*, "High-accuracy lunar global brightness-temperature mapping using third-order Fourier fitting and co-kriging interpolation," *Icarus*, vol. 403, 2023, doi: 10.1016/j.icarus.2023.115646.
- [21] J. Ouyang, C. Zhou, Z. Liu, and G. Zhang, "Triangulated irregular network-based probabilistic 3D geological modelling using Markov Chain and Monte Carlo simulation," *Eng. Geol.*, vol. 320, 2023, doi: 10.1016/j.enggeo.2023.107131.
- [22] M. Fys, M. Yurkiv, and V. Lozynskyi, "Modeling of 3-D objects using geodetic and cartographic data and determining their volumes with an accuracy assessment," *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 22, no. April, p. 100506, 2021, doi: 10.1016/j.rsase.2021.100506.

- [23] M. Habib, Y. Alzubi, A. Malkawi, and M. Awwad, “Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model,” *Open Geosci.*, vol. 12, no. 1, pp. 190–202, 2020, doi: 10.1515/geo-2020-0012.
- [24] W. Maleika, “Inverse distance weighting method optimization in the process of digital terrain model creation based on data collected from a multibeam echosounder,” *Appl. Geomatics*, vol. 12, no. 4, pp. 397–407, 2020, doi: 10.1007/s12518-020-00307-6.
- [25] R. E. Fakir *et al.*, “Contribution of GIS for the Piezometric Monitoring of the Unconfined Water Table Aquifer of the Fez-Meknes Basin,” *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 104–115, 2023, doi: 10.12912/27197050/154994.