

EVALUASI METODE GEOREFERENSI PPK DAN GCP TERHADAP KETELITIAN VERTIKAL DAN ESTIMASI VOLUME OVERBURDEN PADA FOTOGRAMETRI TAMBANG TERBUKA

(EVALUATION OF PPK AND GCP GEOREFERENCING METHODS FOR VERTICAL ACCURACY AND OVERBURDEN VOLUME ESTIMATION IN OPEN-PIT MINE PHOTOGRAMMETRY)

Fahmi Asshidqi¹, Muhammad Iqbal Taftazani^{1*}, Anindya Sricandra Prasidya¹,
Wahyu Marta Mutiarasari¹

¹ Program Studi Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

* Korespondensi E-mail: iqbaltaftazani@ugm.ac.id

Abstrak

Pertambangan terbuka memerlukan data topografi yang akurat untuk mendukung perhitungan volume *overburden* dan pengambilan keputusan operasional. Pengukuran menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) memiliki keterbatasan pada area luas dan pit yang kompleks, sehingga *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menjadi alternatif yang lebih efisien. Namun, ketelitian data UAV dipengaruhi oleh metode georeferensi, khususnya *Ground Control Point* (GCP) dan *Post-Processing Kinematic* (PPK). Perbedaan metode georeferensi tersebut dapat menghasilkan perbedaan ketelitian vertikal dan memengaruhi akurasi perhitungan volume *overburden*. Penelitian ini bertujuan menganalisis ketelitian vertikal *point cloud* metode GCP dan PPK serta membandingkan hasil volume *overburden* terhadap data TLS sebagai acuan. Metode penelitian meliputi pengolahan foto udara, analisis *Cloud-to-Cloud Distance*, pembuatan *Digital Terrain Model* (DTM), dan perhitungan volume *cut and fill*. Hasil menunjukkan metode georeferensi GCP memiliki ketelitian vertikal lebih tinggi dengan nilai LE90 0,1586 m (Kelas 3, skala 1:1.000), sedangkan metode georeferensi PPK sebesar 0,6797 m (Kelas 2, skala 1:5.000). Metode georeferensi GCP menghasilkan rerata selisih volume -1,90% dan memenuhi standar ASTM D6172-98, sedangkan metode georeferensi PPK memiliki rerata selisih 47,79% dan tidak memenuhi standar ASTM D6172-98. Perbedaan tersebut menunjukkan metode GCP menghasilkan volume *overburden* yang lebih mendekati data TLS, sehingga lebih direkomendasikan untuk perhitungan volume *overburden*.

Kata kunci: GCP, ketelitian vertikal *point cloud*, PPK, TLS, volume *overburden*.

Abstract

Open-pit mining requires accurate topographic data to support *overburden* volume calculation and operational decision-making. *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) surveying has limitations in large areas and complex pits, making *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) an efficient alternative. However, UAV data accuracy is influenced by the georeferencing method, particularly *Ground Control Point* (GCP) and *Post-Processing Kinematic* (PPK). Differences in georeferencing methods can result in varying vertical accuracy and affect the accuracy of *overburden* volume calculations. This study aims to analyze the vertical accuracy of *point clouds* generated by GCP and PPK methods and compare *overburden* volume results against TLS data as reference. The methods include UAV photogrammetric processing, *Cloud-to-Cloud Distance* analysis, *Digital Terrain Model* (DTM) generation, and *cut-and-fill* volume calculation. The results show that the GCP method achieved higher vertical accuracy with an LE90 value of 0.1586 m, while the PPK method yielded 0.6797 m. The GCP method produces a mean volume difference of -1.90% and complies with ASTM D6172-98, whereas the PPK method produces a mean volume difference of 47.79% and does not comply with ASTM D6172-98. These results indicate that the GCP method produces *overburden* volumes closer to the TLS reference data and is therefore more recommended for *overburden* volume calculations.

Keywords: GCP, *overburden* volume, PPK, TLS, vertical *point cloud* accuracy.

Article History	Submitted: 03-07-2026	Revised: 15-09-2026	Accepted: 22-09-2026
Published by	Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Palangka Raya		
License	CC BY-SA 4.0		
DOI	10.36873/jtp.v26i2.27129		

1. Pendahuluan

Pada sistem penambangan tambang terbuka, kegiatan operasional dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pembukaan lokasi penambangan (*land clearing*), pengupasan *top soil*, pengupasan *overburden*, penimbunan *overburden* ke area *disposal*, hingga kegiatan *coal getting* (Tampubolon dkk., 2026). Setiap tahapan tersebut memerlukan data topografi yang akurat untuk mendukung perencanaan, pengawasan, dan perhitungan volume material. Metode pengukuran topografi yang akurat di area pertambangan umumnya dilakukan menggunakan peralatan survei terestrial, salah satunya adalah *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Namun, penerapannya pada area pertambangan memiliki keterbatasan yaitu tidak efektifnya akuisisi data di area yang luas dan bentuk *pit* yang kompleks, serta adanya *blind spot* karena keterbatasan *line of sight* alat. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) sebagai alternatif yang lebih efisien dari segi waktu akuisisi data di area yang luas dan kompleks.

UAV mampu melakukan proses akuisisi data dalam waktu yang relatif singkat, sehingga dapat beradaptasi dengan dinamika progres kegiatan tambang yang cepat. Selain itu, UAV mampu menjangkau area yang sulit diakses oleh TLS, terutama pada medan yang kompleks, seperti cekungan yang curam (Šašák dkk., 2019). Meskipun demikian, kualitas dan ketelitian hasil pemetaan UAV sangat dipengaruhi oleh metode georeferensi yang digunakan (Maharani & Azis, 2025).

Metode georeferensi diperlukan untuk menentukan posisi dan orientasi hasil pemetaan agar sesuai dengan sistem koordinat di lapangan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *Ground Control Point* (GCP). GCP merupakan metode *indirect georeferencing* yang memanfaatkan titik kontrol tanah sebagai acuan koreksi posisi dan orientasi foto udara. Namun, metode ini memerlukan pekerjaan lapangan tambahan berupa pemasangan dan pengukuran *premark* yang berdampak pada efisiensi waktu pekerjaan serta meningkatkan risiko keselamatan surveyor di area pertambangan. Seiring dengan perkembangan teknologi UAV yang dilengkapi sistem *Global Navigation Satellite System* (GNSS), memungkinkan metode *Post-Processing Kinematic* (PPK) mulai diterapkan sebagai alternatif metode georeferensi, sehingga memungkinkan penerapan teknik *direct georeferencing*.

Pengaruh metode georeferensi terhadap ketelitian hasil pemetaan telah dikaji oleh peneliti terdahulu. Kajian Arkali & Atik (2025) membandingkan akurasi UAV metode *Post-Processed Kinematic* (PPK) dan *Real Time Kinematic* (RTK) di area pemukiman, menghasilkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) total 0,079 meter untuk PPK dan 0,084 meter untuk RTK. Sejalan dengan temuan tersebut, penelitian oleh Kurniawan & Hariyanto (2023) menunjukkan bahwa penggunaan metode PPK pada UAV mampu menghasilkan ketelitian geometrik yang baik dengan kebutuhan GCP yang minimal.

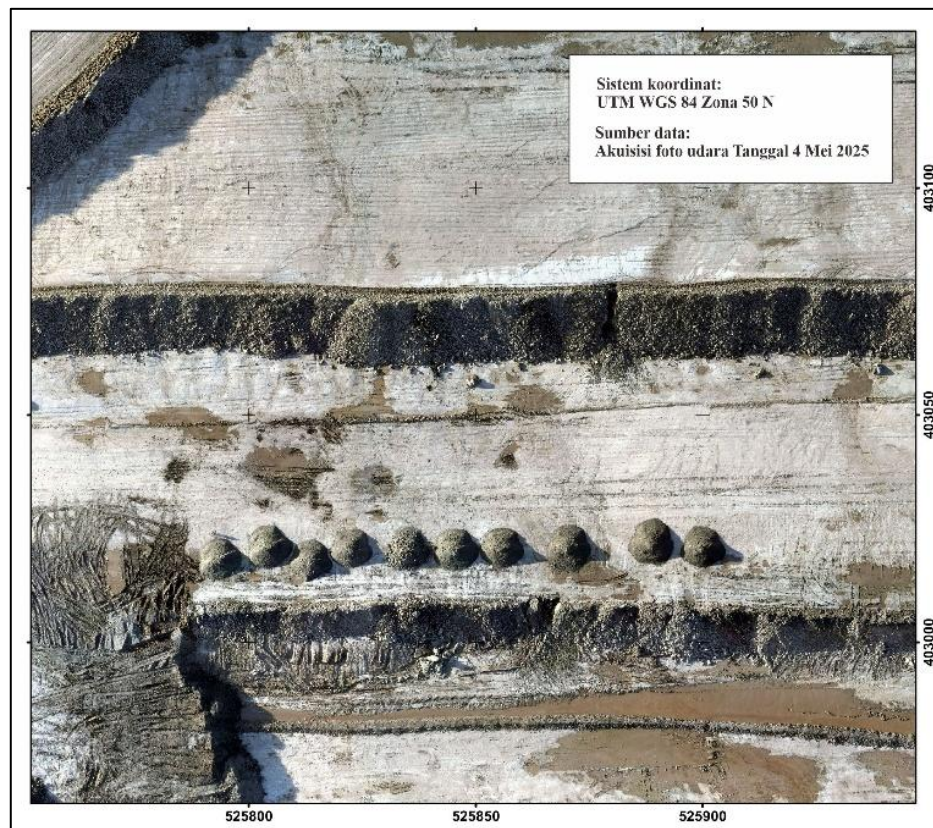
Penelitian oleh Ayu (2025) menyatakan bahwa jumlah dan distribusi GCP dalam proses foto udara UAV memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketelitian geometrik dan perhitungan volume, khususnya jika dibandingkan dengan pengukuran GNSS RTK. Penelitian sejenis dilakukan oleh Erol dkk. (2024) menghasilkan kesimpulan bahwa akurasi vertikal metode PPK meningkat signifikan ketika GCP diintegrasikan dalam proses pengolahan data. Kombinasi tersebut juga dilakukan oleh Atik & Arkali (2025) dengan hasil akurasi horizontal model yaitu berkisar antara 1,2-2,8 cm dan akurasi vertikal antara 1,3-1,9 cm.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian masih berfokus mengevaluasi salah satu aspek saja, yaitu ketelitian geometrik atau hasil perhitungan volume. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi ketelitian vertikal *point cloud* dan hasil volume *overburden* secara bersamaan pada konteks tambang terbuka menggunakan metode georeferensi yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketelitian vertikal *point cloud* dari metode georeferensi PPK dan GCP, menganalisis perbedaan volume metode georeferensi PPK dan GCP terhadap data TLS sebagai data acuan, serta menganalisis pengaruh ketelitian vertikal terhadap hasil perhitungan volume.

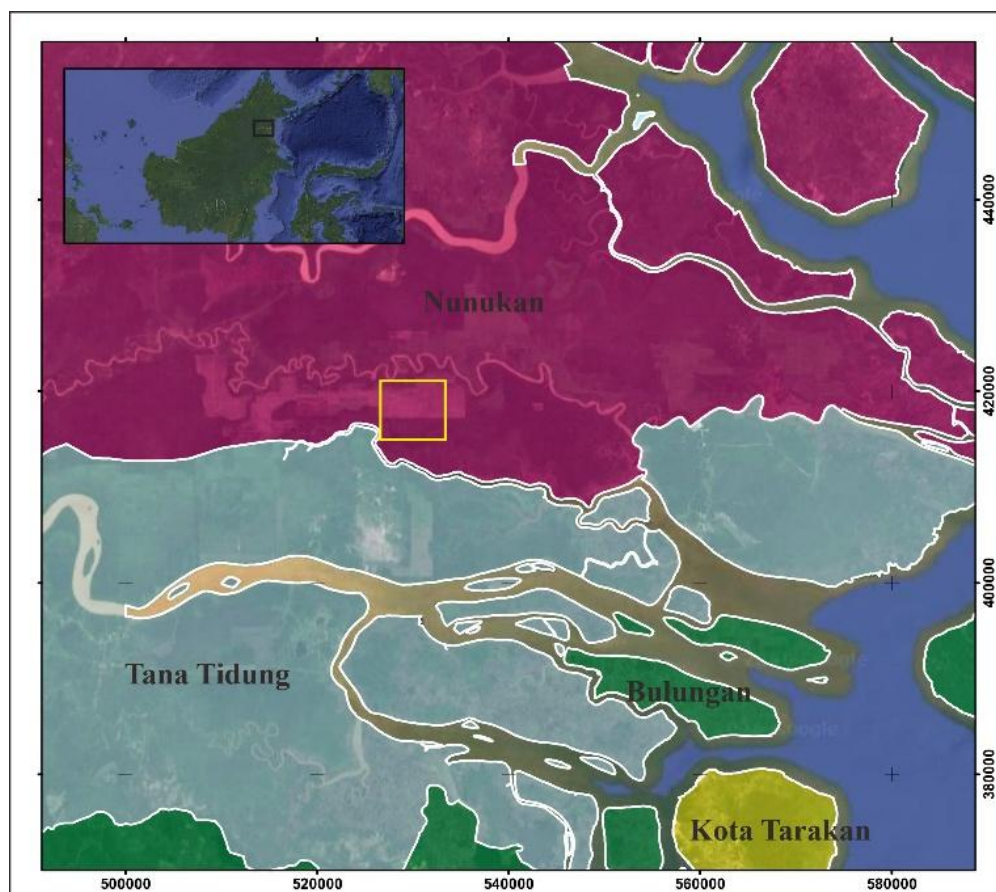
2. Metode

a. Data dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di area *Disposal* PT Mandala Karya Prima ditampilkan pada Gambar 1. Area penelitian ini berada di wilayah Kecamatan Sesayap, Kabupaten Nunukan, Provinsi Kalimantan Utara dengan peta lokasi kegiatan yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Area Disposai PT Mandala Karya Prima



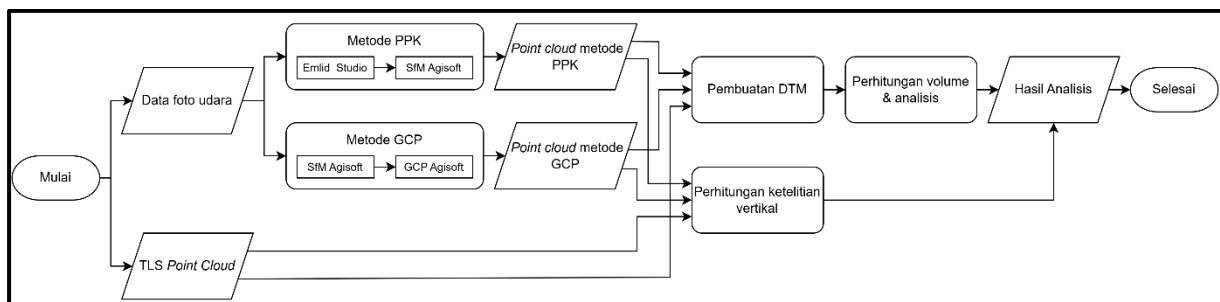
Gambar 2. Peta lokasi penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari wahana DJI Matrice 350 RTK dengan kamera Zenmuse P1, TLS RIEGL VZ-2000i, dan pengamatan GNSS RTK akuisisi GCP serta CORS. Wahana DJI Matrice 350 RTK dengan kamera Zenmuse P1 menghasilkan citra foto dengan metode akuisisi tanpa jalur terbang (*free flight*). Metode akuisisi citra tanpa jalur terbang dipilih agar mudah menyesuaikan kondisi medan serta memperoleh cakupan area yang optimal.

Data permukaan tanah juga dihasilkan dari alat TLS RIEGL VZ-2000i yang digunakan untuk menghasilkan *point cloud* dengan tingkat ketelitian tinggi. Data TLS berfungsi sebagai data acuan (*ground truth*) dalam evaluasi ketelitian vertikal *point cloud* hasil fotogrametri UAV. Pengukuran TLS dilakukan dengan metode *multi-station* untuk meminimalkan area yang tidak teramati (*occlusion*) dan meningkatkan cakupan pemindaian pada seluruh area penelitian. Seluruh hasil pemindaian kemudian diregistrasi dan diikat ke sistem koordinat yang sama sebelum dilakukan proses analisis.

Data GNSS diperoleh melalui pengamatan pada titik-titik GCP yang tersebar merata di area penelitian. Pengamatan dilakukan menggunakan metode RTK untuk mendapatkan koordinat titik kontrol dengan ketelitian centimeter. Titik-titik GCP tersebut digunakan sebagai kontrol georeferensi pada pengolahan fotogrametri metode GCP. Selain itu, data observasi GNSS dari stasiun referensi CORS digunakan untuk melakukan koreksi diferensial pada koordinat pusat proyeksi foto melalui metode georeferensi PPK.

b. Metodologi



Gambar 3. Alur penelitian

Pengukuran ketelitian vertikal dan perhitungan volume pada penelitian ini diperoleh dari *point cloud* hasil pengolahan fotogrametri metode georeferensi PPK dan GCP serta TLS. *Point cloud* TLS diperoleh dengan pengolahan registrasi metode *cloud to cloud* untuk memastikan setiap *station* pengamatan menjadi *point cloud* utuh dengan sistem koordinat yang sama. Adapun pengolahan yang dilakukan pada hasil foto udara menggunakan perangkat lunak *Emlid Studio* dan *Agisoft Metashape*. Proses pengolahan citra foto metode PPK diawali dengan pengolahan georeferensi pada perangkat lunak *Emlid Studio*, sedangkan pengolahan metode GCP langsung melakukan keseluruhan tahapan di perangkat lunak *Agisoft Metashape*.

Proses untuk menghasilkan *point cloud* dilakukan dengan metode *Structure From Motion* (SfM) dan *Multi View StereoPhotogrammetry* (MVS). Metode SfM melakukan proses proses *bundle adjustment* sehingga setiap posisi di permukaan tanah dapat ditentukan lokasinya pada citra atau foto (Lillesand dkk., 2015). Adapun, metode MVS berperan memuat pemrosesan *depth map* dan *dense reconstruction*. Teknik *dense reconstruction* ini menggabungkan beberapa *depth map* menjadi satu model yang koheren sehingga dapat menghasilkan output *point cloud* (Wang dkk., 2021).

Proses selanjutnya yaitu melakukan perhitungan ketelitian vertikal *point cloud*. Uji ketelitian vertikal menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) dari selisih nilai ketinggian antara *point cloud* metode georeferensi PPK dan GCP dengan *point cloud* TLS. Perhitungan ini menggunakan analisis *Cloud to cloud distance* yang dilakukan di perangkat lunak *CloudCompare*. Perangkat lunak tersebut membandingkan *compared cloud* terhadap cloud acuan (*reference cloud*) berdasarkan prinsip *nearest neighbor distance* (Diaz dkk., 2024). Prinsip tersebut melakukan perhitungan jarak menggunakan prinsip jarak euclidean dengan persamaan I sebagai berikut.

$$d = \sqrt{(X_c - X_r)^2 + (Y_c - Y_r)^2 + (Z_c - Z_r)^2} \quad (I)$$

Dalam hal ini,

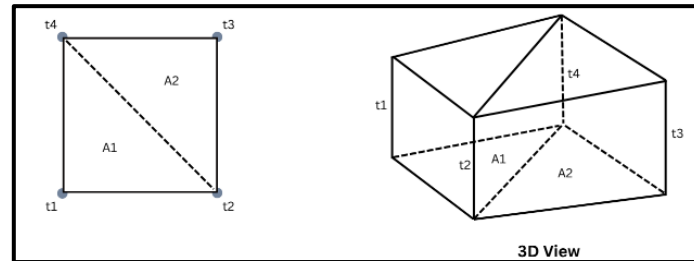
d = jarak euclidean,

X_c, Y_c, Z_c = koordinat titik pada *compared cloud*,

X_r, Y_r, Z_r = koordinat titik pada *reference cloud*.

Nilai perhitungan ketelitian vertikal harus memenuhi spesifikasi teknis yang tercantum dalam regulasi resmi. Hal tersebut digunakan untuk menentukan klasifikasi hasil pemetaan ke dalam kelas yang sesuai. Klasifikasi ini mengacu pada standar Spesifikasi Teknis Stereo Model dari Foto Udara Hasil Survei Udara menggunakan Kamera Udara Non Metrik (Peraturan Badan Informasi Geospasial Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2021 Tentang Tata Cara Penyelenggaraan Informasi Geospasial, 2021).

Proses selanjutnya yaitu pembuatan DTM dan perhitungan volume. Metode interpolasi dalam pembuatan DTM menggunakan metode *Triangulated Irregular Network (TIN) Delaunay Triangulation*. *Delaunay triangulation* menerapkan pembentukan segitiga dengan perbedaan sudut yang minimum (Dinas & Martínez, 2020). Interpolasi tersebut akan menghasilkan DTM yang akan dilakukan perhitungan dengan persamaan II sebagai berikut.



Gambar 4. Perhitungan volume TIN

$$\text{Volume} = A1 \times \frac{(t1+t2+t4)}{3} + A2 \times \frac{(t2+t3+t4)}{3} \quad (\text{II})$$

Dalam hal ini,

A1, A2 = luas penampang alas (m²),

t1...t4 = tinggi permukaan di atas bidang referensi (m).

Proses terakhir yaitu analisis perbandingan volume *true value* hasil pengukuran TLS dengan metode georeferensi PPK dan GCP. Perbandingan volume ini dilakukan dengan dua metode analisis. Metode analisis yang pertama menggunakan aturan yang ditetapkan oleh ASTM (*American Society for Testing and Materials*). ASTM D6172-98 menetapkan standar teknik pengukuran volume tumpukan material (*bulk material*), dengan nilai batas toleransi maksimal di bawah 2% merupakan nilai *industry accepted error* (ASTM International, 2010).

Analisis yang kedua menggunakan perhitungan uji statistika. Perhitungan uji statistika ini dilakukan untuk mengetahui nilai rerata populasi (μ) dari rerata sampel dan varian dari sampel serta nilai derajat kebebasan (Ghilani & Wolf, 2006). Pada proyek akhir ini sampel yang digunakan sepuluh gundukan ($n < 30$) ditampilkan pada Gambar 5. Penggunaan sepuluh gundukan sebagai sampel mempertimbangkan kondisi operasional area pertambangan yang memiliki perubahan topografi relatif cepat akibat aktivitas produksi. Maka nilai uji t-hitung dapat diketahui dengan persamaan III berikut (Spiegel dkk., 2013).

$$t = \frac{D - \delta}{S} \sqrt{n - 1} \quad (\text{III})$$

Dalam hal ini,

D : selisih antara dua data,

δ : nilai yang diharapkan (0),

S : simpangan baku sampel, dan

n : jumlah sampel.

Tingkat kepercayaan yang digunakan yaitu 95%, yaitu setara dengan taraf signifikansi (α) sebesar 0,05 sehingga untuk taraf signifikansi *two-tailed* maka menggunakan nilai 0,025.



Gambar 5. Sampel sepuluh gundukan

3. Hasil dan Pembahasan

a. Hasil Ketelitian Vertikal

Tahapan ini membandingkan antara koordinat *Z point cloud* pada data foto udara metode GCP dan PPK terhadap data TLS menggunakan metode *cloud to cloud distance*. Hasil ketelitian untuk masing-masing metode foto udara disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketelitian vertikal *point cloud* hasil georeferensi metode GCP dan PPK

Metode	Mean vertical distance (m)	Std Deviation (m)	RMSEz (m)	LE90	Kelas
GCP	-0,030124	0,091330	0,096170	0,1586	Kelas 3 (Skala 1:1.000)
PPK	0,389249	0,135011	0,411998	0,6797	Kelas 2 (Skala 1:5.000)

Tabel tersebut menunjukkan bahwa metode GCP memberikan tingkat ketelitian vertikal yang lebih tinggi dibandingkan metode PPK. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai RMSEz yang dihasilkan metode GCP 0,096170 meter, lebih kecil dibandingkan dengan metode PPK dengan nilai 0,411998 meter. Sementara itu, nilai LE90 metode GCP sebesar 0,1586 meter menunjukkan bahwa kesalahan vertikal berada dalam rentang yang relatif kecil, sehingga hasilnya lebih akurat dan konsisten dibandingkan dengan metode PPK yang menghasilkan nilai LE90 sebesar 0,6797 meter.

b. Hasil Pengolahan *Digital Terrain Model*

Pengolahan *Digital Terrain Model* (DTM) pada tahapan ini digunakan untuk perhitungan volume *overburden*. Perhitungan volume *overburden* dilakukan menggunakan dua permukaan DTM, yaitu permukaan dasar yang diperoleh dari pengukuran TLS, serta untuk permukaan atas menggunakan hasil pengukuran dua metode georeferensi foto udara. Visualisasi setiap DTM ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Visualisasi DTM disposal permukaan atas dan bawah

Metode	Visualisasi DTM disposal					
GCP	HD 4329	HD 4315	HD 4330	HD 4128	HD 4327	HD 4329
	HD 4315	HD 4330	HD 4128	HD 4327		
PPK	HD 4329	HD 4315	HD 4330	HD 4128	HD 4327	HD 4329
	HD 4315	HD 4330	HD 4128	HD 4327		
TLS	HD 4329	HD 4315	HD 4330	HD 4128	HD 4327	HD 4329
	HD 4315	HD 4330	HD 4128	HD 4327		

Permukaan atas pada metode GCP secara visual bertampalan baik dengan permukaan bawah TLS. Adapun untuk permukaan atas metode PPK secara visual tidak bertampalan dengan baik dengan permukaan bawah TLS. Hal tersebut diakibatkan oleh selisih rerata jarak permukaan atas PPK dibandingkan dengan permukaan atas TLS memiliki nilai 0,389249 meter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

c. Hasil Signifikasi Perbedaan Volume

Uji paired t-test digunakan untuk mengevaluasi rerata selisih antara dua kelompok data berpasangan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini adalah hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode dengan TLS, dan hipotesis alternatif (H_1) yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan.

a) Hasil Uji t Metode GCP terhadap TLS

Selisih perbedaan volume antara volume metode georeferensi GCP dengan volume TLS ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Selisih volume metode GCP terhadap TLS

No. Hauler	Volume GCP (m ³)	Volume TLS (m ³)	Selisih volume (m ³)
HD 4329	54.54	56.73	-2.19
HD 4315	61.53	64.08	-2.55
HD 4330	51.44	53.38	-1.94
HD 4128	52.97	54.54	-1.57
HD 4327	54.00	56.04	-2.04
HD 4329	61.30	63.03	-1.73
HD 4315	58.24	59.55	-1.31
HD 4330	59.09	59.33	-0.24
HD 4128	71.87	72.16	-0.29
HD 4327	57.27	54.68	2.59
Rerata selisih			-1.127

Tabel 4. Tabel uji signifikasi metode GCP

Parameter	Nilai
Jumlah data	10
Rerata selisih	-1.127
Standar deviasi	5.704
t hitung	-0.625
t tabel ($\alpha = 0,05$)	2.262

Tabel 4 menunjukkan nilai $t_{hitung} = -0,625$ yang berarti nilai tersebut berada di antara $-2,262$ dan $2,262$, sehingga H_0 diterima. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara volume hasil pengukuran menggunakan metode georeferensi GCP terhadap volume TLS.

b) Hasil Uji t Metode PPK terhadap TLS

Selisih perbedaan volume antara volume metode georeferensi GCP dengan volume TLS ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Tabel selisih volume metode PPK terhadap TLS

No. Hauler	Volume PPK (m ³)	Volume TLS (m ³)	Selisih volume (m ³)
HD 4329	85.62	56.73	28.89
HD 4315	94.43	64.08	30.35
HD 4330	80.85	53.38	27.47
HD 4128	81.58	54.54	27.04
HD 4327	86.92	56.04	30.88
HD 4329	93.27	63.03	30.24
HD 4315	86.74	59.55	27.19

No. Hauler	Volume PPK (m ³)	Volume TLS (m ³)	Selisih volume (m ³)
HD 4330	91.14	59.33	31.81
HD 4128	97.62	72.16	25.46
HD 4327	77.07	54.68	22.39
Rerata selisih			28.172

Tabel 6. Tabel uji signifikansi metode PPK

Parameter	Nilai
Jumlah data	10
Rerata selisih	28.172
Standar deviasi	15.655
t hitung	5.691
t tabel ($\alpha = 0,05$)	2.262

Tabel 6 menunjukkan nilai $t_{hitung} = 5,691$ berada di luar rentang $-2,262$ hingga $2,262$, sehingga H_0 ditolak. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara volume hasil pengukuran menggunakan metode georeferensi PPK terhadap volume TLS.

d. Hasil Perbandingan Volume berdasarkan ASTM

Hasil tahapan ini menyajikan perbandingan volume antara data hasil pengukuran *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) sebagai acuan (*true value*) dengan volume yang diperoleh dari foto udara UAV metode PPK dan GCP. Analisis tersebut dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode tersebut terhadap standar ketelitian yang ditetapkan oleh ASTM D6172-98, khususnya dalam pengukuran volume material timbunan (*bulk material*). Perbandingan ini dinyatakan dalam bentuk persentase selisih. Presentase selisih tersebut digunakan untuk menilai apakah hasil pengukuran masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima secara industri, yaitu kurang dari 2%.

Tabel 7. Tabel perbandingan volume GCP dalam bentuk persentase selisih

No. Hauler	Volume UAV GCP (m ³)	Volume TLS (m ³)	Selisih (%)
HD 4329	54.54	56.73	-3.86%
HD 4315	61.53	64.08	-3.98%
HD 4330	51.44	53.38	-3.63%
HD 4128	52.97	54.54	-2.88%
HD 4327	54.00	56.04	-3.64%
HD 4329	61.30	63.03	-2.74%
HD 4315	58.24	59.55	-2.20%
HD 4330	59.09	59.33	-0.40%
HD 4128	71.87	72.16	-0.40%
HD 4327	57.27	54.68	4.74%
Rerata selisih			-1.90%

Tabel 8. Tabel perbandingan volume GCP dalam bentuk persentase selisih

No. Hauler	Volume UAV PPK (m ³)	Volume TLS (m ³)	Selisih (%)
HD 4329	85.62	56.73	50.93%
HD 4315	94.43	64.08	47.36%
HD 4330	80.85	53.38	51.46%
HD 4128	81.58	54.54	49.58%
HD 4327	86.92	56.04	55.10%
HD 4329	93.27	63.03	47.98%
HD 4315	86.74	59.55	45.66%
HD 4330	91.14	59.33	53.62%
HD 4128	97.62	72.16	35.28%
HD 4327	77.07	54.68	40.95%
Rerata selisih			47.79%

Berdasarkan Tabel 7 dan Tabel 8 diatas, hasil perhitungan menunjukkan bahwa metode GCP memiliki rentang persentase selisih antara -3,98% hingga 4,74%, dengan nilai rerata selisih sebesar -1,90%. Secara umum, nilai rerata tersebut masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan ASTM, meskipun terdapat beberapa sampel yang melampaui ambang batas $\pm 2\%$. Hal ini mengindikasikan bahwa metode GCP secara keseluruhan masih dapat diterima secara industri, namun memiliki

inkonsistensi pada beberapa titik pengamatan. Inkonsistensi pada beberapa titik tersebut disebabkan oleh variasi kondisi permukaan timbunan yang kompleks, seperti perubahan kemiringan lereng, tekstur material, serta distribusi titik kontrol yang kurang merata sehingga mempengaruhi akurasi model permukaan.

Sementara itu, metode PPK menunjukkan nilai persentase selisih yang jauh lebih besar, yaitu berkisar antara 35,28% hingga 55,10%, dengan rerata selisih sebesar 47,79%. Seluruh hasil pada metode PPK berada jauh di luar batas toleransi yang ditetapkan ASTM, sehingga dapat disimpulkan bahwa metode ini tidak memenuhi standar ketelitian untuk pengukuran volume material timbunan dalam konteks penelitian ini. Besarnya deviasi yang terjadi pada metode PPK karena faktor ketelitian vertikal yang dihasilkan. Ketelitian vertikal hasil pengukuran PPK menghasilkan RMSEz dengan nilai 0,411 meter sehingga mempengaruhi besaran volume yang dihitung.

e. Analisis Pengaruh Metode Georeferensi terhadap Ketelitian Vertikal *Point Cloud* dan Volume *Overburden*

Berdasarkan hasil ketelitian vertikal *point cloud*, metode georeferensi GCP menunjukkan nilai kesalahan yang lebih kecil dibandingkan metode georeferensi PPK. Perbedaan ketelitian vertikal tersebut berpengaruh langsung terhadap hasil perhitungan volume *overburden*. Pengaruh ketelitian vertikal *point cloud* terhadap hasil perhitungan volume dijelaskan pada Tabel 9.

Tabel tersebut menunjukkan hubungan antara ketelitian vertikal *point cloud* dan volume dapat dilihat dari kecenderungan bahwa semakin kecil nilai kesalahan vertikal *point cloud*, maka semakin kecil pula selisih volume yang dihasilkan. Dengan demikian, ketelitian vertikal menjadi faktor utama dalam proses perhitungan volume, khususnya pada kegiatan perhitungan volume *overburden* di bidang pertambangan.

Tabel 9. Analisis pengaruh ketelitian vertikal terhadap hasil volume

Parameter	GCP	PPK
Kesalahan vertikal <i>point cloud</i> (RMSEz)	0,096170 m	0,411998 m
Visualisasi selisih elevasi DTM terhadap <i>base</i>		
Rerata selisih volume terhadap volume TLS	-1,127 m ³	28,172 m ³
Pengaruh	Kesalahan vertikal lebih kecil menghasilkan selisih volume yang lebih kecil	Kesalahan vertikal lebih besar menghasilkan selisih volume yang lebih besar

4. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa ketelitian vertikal *point cloud* memiliki pengaruh langsung dan menjadi faktor utama terhadap akurasi hasil perhitungan volume *overburden*, yang merupakan temuan utama dalam penelitian ini. Hubungan tersebut ditunjukkan melalui kecenderungan bahwa semakin kecil nilai kesalahan vertikal *point cloud*, maka semakin kecil pula selisih volume yang dihasilkan terhadap data acuan TLS, sehingga hasil perhitungan semakin merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan. Temuan ini mempertegas bahwa kualitas georeferensi tidak hanya memengaruhi ketelitian geometrik *point cloud*, tetapi juga berdampak signifikan pada hasil perhitungan volume. Dalam penelitian ini, metode georeferensi *Ground Control Point* (GCP) menghasilkan ketelitian vertikal yang lebih tinggi dengan nilai LE90 sebesar 0,1586 meter dibandingkan *Post-Processing Kinematic* (PPK) sebesar 0,6797 meter, yang berimplikasi pada hasil volume dengan rerata selisih -1,90% dan memenuhi standar ASTM D6172-98. Sebaliknya, metode PPK menghasilkan rerata selisih volume sebesar 47,79% dan terbukti berbeda signifikan terhadap data TLS, sehingga metode GCP lebih direkomendasikan untuk perhitungan volume *overburden* pada area pertambangan terbuka. Pada saat proses akuisisi data *Ground Control Point* (GCP), sebaiknya melakukan akuisisi data GNSS dengan metode statik. Hal tersebut agar menghasilkan ketelitian posisi GCP menjadi lebih baik dibandingkan dengan GNSS metode RTK sehingga menghasilkan perhitungan volume mendekati kondisi aktualnya. Selain itu, penggunaan perangkat lunak pengolahan foto udara berbasis PPK lainnya dapat dilakukan sebagai pembandingan dalam mengevaluasi kualitas hasil pengolahan data.

Referensi

- Arkali, M., & Atik, M. E. (2025). Accuracy Assessment of RTK, PPK, and PPP-AR Techniques for Direct Georeferencing in UAV-Based Photogrammetric Mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(M-6–2025), 325–330. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-6-2025-325-2025>
- ASTM International. (2010). *Standard Test Method for Determining the Volume of Bulk Materials Using Contours or Cross Sections Created by Direct Operator Compilation Using Photogrammetric Procedures 1*. <https://doi.org/10.1520/D6172-98R10>
- Atik, M. E., & Arkali, M. (2025). Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production. *Drones*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/drones9010015>
- Ayu, L. (2025). *Pengaruh Jumlah dan Distribusi Ground Control Point (GCP) terhadap Tingkat Akurasi Pengukuran Volume Metode Fotogrametri pada Pekerjaan Uji Petik Overburden (Studi Kasus PT Putra Perkasa Abadi, Jobsite PT Bukit Asam, Tbk. Gadjah Mada University*.
- Diaz, V., Oosterom, P., Meijers, M., Verbree, E., Ahmed, N., & Lankveld, T. (2024). *Comparison of Cloud-to-Cloud Distance Calculation Methods - Is the Most Complex Always the Most Suitable?* (hlm. 329–334). https://doi.org/10.1007/978-3-031-43699-4_20
- Dinas, S., & Martínez, H. (2020). *Delaunay Triangulation* (hlm. 1–6). https://doi.org/10.1007/978-3-319-08234-9_393-1
- Erol, B., Turan, E., Erol, S., & Alper Kuçak, R. (2024). Comparative performance analysis of precise point positioning technique in the UAV – based mapping. *Measurement*, 233, 114768. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114768>
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2006). *Adjustment computations : spatial data analysis*. John Wiley & Sons.
- Kurniawan, S., & Hariyanto, T. (2023). Analysis of the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Accuracy Using Post-Processing Kinematic (PPK) Method for Measuring the Situation of Open Pit Mining in PT. Berau Coal. *2023 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology: Global Challenges in Geoscience, Electronics, and Remote Sensing: Future Directions in City, Land, and Ocean Sustainable Development, AGERS 2023*, 104–108. <https://doi.org/10.1109/AGERS61027.2023.10490978>
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (Seventh). John Wiley & Son.
- Maharani, M., & Azis, A. (2025). Perbandingan Akurasi UAV Multirotor dan Fixed Wing Berbasis Post Processing Kinematic (PPK) untuk Pemetaan Skala Besar. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 5(2), 127–139. <https://doi.org/10.31315/imagi.v5i2.15792>
- Peraturan Badan Informasi Geospasial Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2021 Tentang Tata Cara Penyelenggaraan Informasi Geospasial, Badan Informasi Geospasial (2021).
- Šašak, J., Gallay, M., Kaňuk, J., Hofierka, J., & Minár, J. (2019). Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry in Mapping Alpine Terrain. *Remote Sensing*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/rs11182154>
- Spiegel, M. R., Schiller, J. J., & Srinivasan, R. Alu. (2013). *Probability and statistics* (Fourth). McGraw-Hill.
- Tampubolon, P., Putu Putrawiyanta, I., & Candra Manurung, G. (2026). Perhitungan Volume Overburden menggunakan Metode Survey dan Truck Count Pit 72 PT. Unirich Mega Persada Provinsi Kalimantan Tengah. *Jurnal Teknik Pertambangan*, 26(2).
- Wang, X., Wang, C., Liu, B., Zhou, X., Zhang, L., Zheng, J., & Bai, X. (2021). Multi-view stereo in the Deep Learning Era: A comprehensive review. *Displays*, 70, 102102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.displa.2021.102102>