

Evaluasi Ketelitian Perhitungan Volume *Stockpile* Batu Bara Menggunakan Foto Udara *Unmanned Aerial Vehicle* Berdasarkan Variasi Tinggi Terbang dan Jumlah *Ground Control Point* (Studi Kasus : PT Putra Perkasa Abadi, *Jobsite* PT Bukit Asam, Tbk.)

Lailla Khoirriyah^a

^aTeknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Research Article

DOI:

10.22146/jgst.v4i2.23893

correspondence:

lailla.khoirriyah@mail.ugm.ac.id

Article history:

Received:

16-08-2025

Accepted:

12-12-2025

Published:

31-12-2025

ABSTRACT

In mining operations, coal stockpile management is crucial to ensure accurate financial reporting and production efficiency. One of the main challenges is the inefficiency of volume measurement. PT Putra Perkasa Abadi currently utilizes Terrestrial Laser Scanner (TLS), which, although accurate, has drawbacks such as high operational costs and safety risks. As an alternative, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology offers a more efficient solution, although its accuracy is significantly influenced by flight altitude and the number of Ground Control Points (GCPs) used.

This Final Project aims to determine the optimal configuration of GCPs and flight altitudes to improve the efficiency and accuracy of stockpile volume measurement. The project was conducted in February 2025 using various GCP configurations (0, 3, 4, 5, and 6) and flight altitudes (60 m, 70 m, and 80 m), with corresponding GSD values of 1.55 cm/pixel, 1.78 cm/pixel, and 2.09 cm/pixel. The data processing involved photo alignment, georeferencing, and dense cloud generation. Volume was calculated using the cut and fill method and compared with TLS data to obtain deviation values.

The results showed that a higher number of GCPs led to smaller and more stable volume deviations, with the best results achieved using 6 GCPs (deviations ranging from -0.871% to -1.495%). The highest deviation occurred with 3 GCPs at a 70-meter flight altitude, reaching 1.941%. Flight altitude also affected accuracy, with 60 meters producing the lowest and most consistent deviations across all GCP configurations. In contrast, the 70-meter altitude showed large and inconsistent deviations despite having low RMSE values.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), coal stockpile, Ground Control Point (GCP), geometric accuracy, volume calculation

INTISARI

Dalam operasional pertambangan, pengelolaan *stockpile* batu bara penting untuk menjamin akurasi pelaporan keuangan dan efisiensi produksi. Salah satu kendala utama adalah pengukuran volume yang kurang efisien. PT Putra Perkasa Abadi saat ini masih menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) yang meskipun akurat, memiliki kekurangan seperti biaya tinggi dan risiko keselamatan. Sebagai alternatif, teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menawarkan solusi yang lebih efisien, namun akurasinya sangat dipengaruhi oleh tinggi terbang dan jumlah *Ground Control Point* (GCP).

Studi ini bertujuan menentukan konfigurasi optimal GCP dan tinggi terbang untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi pengukuran volume *stockpile*. Studi dilaksanakan pada Februari 2025 dengan variasi GCP (0, 3, 4, 5, dan 6) dan tinggi terbang (60 m, 70 m, dan 80m) dengan GSD masing-masing 1,55 cm/piksel, 1,78 cm/piksel, dan 2,09 cm/piksel. Data diproses melalui tahapan *align photos*, *georeferencing*, dan *build dense cloud*. Volume dihitung menggunakan metode *cut and fill* dan dibandingkan dengan data TLS untuk memperoleh deviasi.

Hasil menunjukkan bahwa semakin banyak GCP, deviasi volume semakin kecil dan stabil, dengan hasil terbaik pada 6 GCP (deviasi -0,871% hingga -1,495%). Deviasi terbesar terjadi pada 3 GCP di ketinggian 70 meter sebesar 1,941%. Tinggi terbang juga berpengaruh, di mana 60 meter menghasilkan deviasi paling rendah dan konsisten di semua konfigurasi GCP. Sebaliknya, tinggi 70 meter menunjukkan deviasi besar dan tidak konsisten meskipun RMSE rendah.

Kata kunci: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, *stockpile* batu bara, *Ground Control Point (GCP)*, ketelitian geometri, perhitungan volume

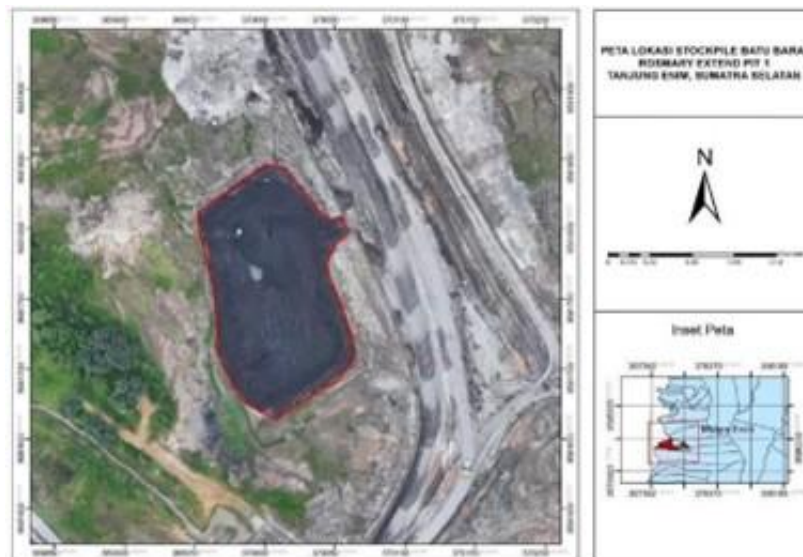
1. Pendahuluan

Batu bara merupakan komoditas utama Indonesia dan sejak 2005 menjadi salah satu eksportir terbesar batu bara termal dunia (Habibie & Sahrul, 2022). Dalam pertambangan, pengukuran volume *stockpile* menjadi tahap awal yang krusial karena memengaruhi akurasi laporan keuangan dan efisiensi produksi. Akurasi ini juga menentukan harga satuan penimbunan serta stabilitas keuangan perusahaan, sehingga pemahaman terhadap proses awal penambangan sangat penting untuk efisiensi operasional.

Pada tambang terbuka, proses awal mencakup pembersihan area, pengupasan *overburden*, dan pengambilan endapan batu bara yang kemudian dipindahkan ke *stockpile* sebelum diproses lebih lanjut atau dijual. Perhitungan volume batu bara sangat penting untuk mengevaluasi kinerja penambangan (Permadi dkk., 2024), dan diperoleh melalui metode survei tambang, yakni teknik pengukuran posisi dan proyeksi objek di area tambang terbuka).

PT Putra Perkasa Abadi menghadapi masalah kurangnya efisiensi pengukuran volume *stockpile*. Saat ini, perusahaan menggunakan *Terrestrial Laser Scanner (TLS)* yang akurat, tetapi memiliki kelemahan berupa biaya tinggi dan risiko keselamatan. Alternatif yang lebih efisien dan aman adalah teknologi *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, yang dapat melakukan pemetaan skala besar secara cepat dan efisien (Prayogo dkk., 2020).

Namun, akurasi UAV tidak hanya ditentukan oleh pengoperasian, tetapi juga oleh kualitas kamera, desain penerbangan, dan kondisi lingkungan. Dua faktor utama yang dapat dikendalikan adalah tinggi terbang dan jumlah GCP. Semakin rendah tinggi terbang, GSD mengecil sehingga meningkatkan resolusi dan akurasi model (Susilo dkk., 2023). Jumlah GCP yang lebih banyak juga menurunkan nilai RMSE, baik horizontal maupun vertikal, menandakan konfigurasi yang lebih optimal (Bandaso dkk., 2023).



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

2. DATA

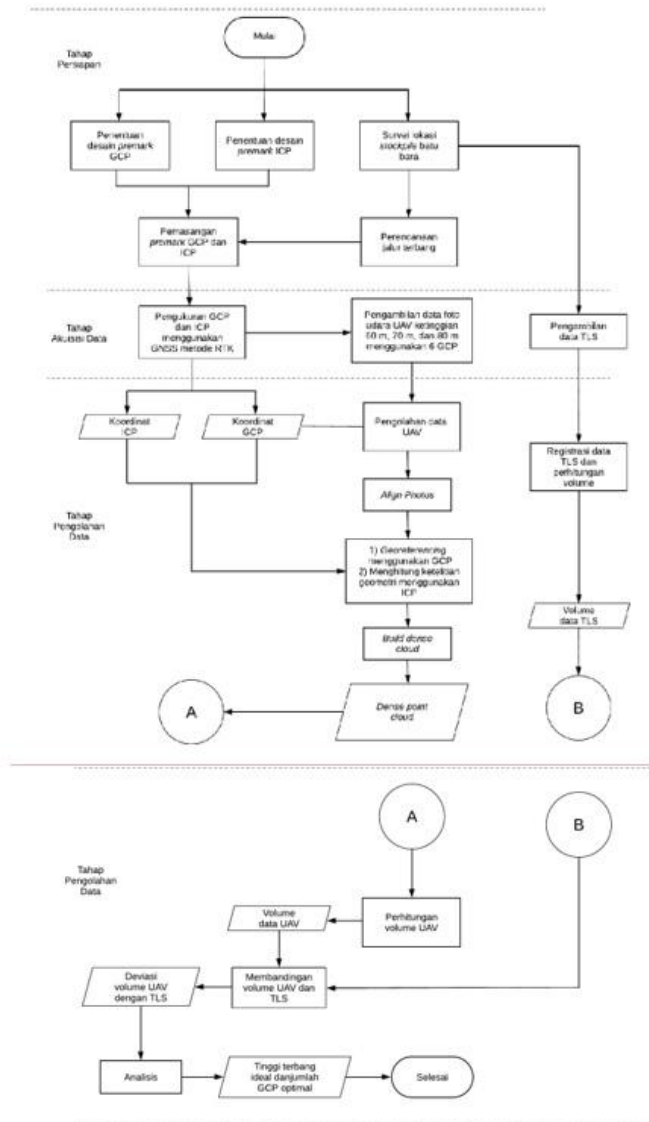
Data yang digunakan untuk pengerjaan proyek akhir, di antaranya adalah :

1. Data foto udara *stockpile*. Data ini terdapat 3 set data foto udara yang diakuisisi yaitu pada ketinggian 60m, 70m, dan 80 m.
2. Data TLS *stockpile*. Data tersebut diambil dalam waktu yang bersamaan dengan pengambilan data UAV.

3. Data base *stockpile* batu bara. Data base ini diperoleh dari hasil akuisisi di lapangan dengan menggunakan TLS sebelum *stockpile* dilakukan proses penambangan.
4. Data koordinat GCP dan ICP. Data tersebut diperoleh dari akuisisi di lapangan dengan metode RTK. Terdapat 6 data GCP dan 5 data ICP.

Studi ini dilaksanakan pada Februari 2025 di PT Putra Perkasa Abadi, *Jobsite* PT Bukit Asam, Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Berikut merupakan lokasi penelitian pada Gambar 1.

3. METODOLOGI



Gambar 2. Diagram alir.

3.1. Tahap Persiapan

Tahap perencanaan penelitian meliputi perancangan GCP dan ICP, serta survei lokasi *stockpile* batu bara. GCP dan ICP dirancang berbentuk persegi berukuran 80 × 80 cm menggunakan papan triplek, dengan pola hitam-putih pada GCP dan tanda silang (+) pada ICP untuk memudahkan identifikasi pada citra UAV. Sebanyak enam titik GCP dan lima titik ICP ditempatkan secara strategis di sekitar area penelitian guna meningkatkan akurasi georeferensi dan evaluasi ketelitian pemetaan. Survei lokasi dilakukan dengan mempertimbangkan luas area dan tingkat aktivitas produksi agar pengambilan data dapat berlangsung efisien tanpa mengganggu operasional. Perencanaan jalur terbang UAV dilakukan menggunakan waypoint maps berdasarkan *Area of Interest* (AOI). Jalur terbang dirancang sejajar dengan pengaturan *forward overlap* dan *side overlap* sebesar 80% serta variasi tinggi terbang 60 m, 70 m, dan 80 m. Pengaturan ini bertujuan untuk menghasilkan cakupan

citra yang optimal, meminimalkan area kosong, serta mendukung kualitas data fotogrametri yang diperlukan dalam proses pengolahan dan analisis volume *stockpile*.

3.2. Tahap Akuisisi Data

Tahap pengambilan data meliputi pengukuran GCP dan ICP, akuisisi data UAV, serta pengambilan data TLS. Pengukuran GCP dan ICP dilakukan menggunakan GNSS dengan metode *Real Time Kinematic* (RTK). Metode ini dipilih karena lebih efektif dan efisien serta tidak mengganggu aktivitas penambangan di area *stockpile*, mengingat keterbatasan jumlah peralatan survei yang digunakan secara bergantian. Sebanyak enam titik GCP dan lima titik ICP diukur untuk mendukung proses *georeferensi* dan evaluasi ketelitian.

Pengambilan data UAV dilakukan menggunakan drone DJI Mavic 3 Pro dengan variasi ketinggian terbang 60 m, 70 m, dan 80 m. Pemilihan variasi tinggi terbang tersebut didasarkan pada keseimbangan antara resolusi spasial, cakupan area, efisiensi operasional, dan akurasi fotogrametri, sehingga bentuk geometris *stockpile* tetap terjaga tanpa distorsi. Pengaturan *overlap* sebesar 80% diterapkan untuk menjamin kontinuitas data, dengan nilai *Ground Sampling Distance* (GSD) di bawah 8 cm sesuai Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 1 Tahun 2020. Keberadaan GCP digunakan untuk meningkatkan akurasi hasil pemetaan.

Selain itu, pengambilan data TLS dilakukan menggunakan instrumen Riegl VZ-2000i dengan satu kali survei yang terdiri dari delapan posisi berdiri alat untuk memastikan seluruh objek *stockpile* terekam secara optimal. Pemindaian dilakukan menggunakan *scan pattern* panorama 50 dan 60 yang sesuai untuk objek bertingkat seperti *stockpile*, dengan mempertimbangkan cakupan vertikal dan durasi pemindaian.

3.3. Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data UAV dilakukan menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape melalui pendekatan fotogrametri berbasis *Structure from Motion* (SfM). Tahap awal meliputi align photo untuk membentuk hubungan antar foto dan menghasilkan parameter orientasi kamera serta *tie points*. Selanjutnya, dilakukan *georeferensi* dengan memasukkan koordinat GCP untuk mengoreksi posisi geometrik model dan meningkatkan ketelitian spasial. Setelah proses *georeferensi*, dibentuk *dense point cloud* menggunakan metode *Multi-View Stereo* (MVS) yang merepresentasikan permukaan *stockpile* secara tiga dimensi dan menjadi dasar dalam pembentukan model permukaan dan perhitungan volume.

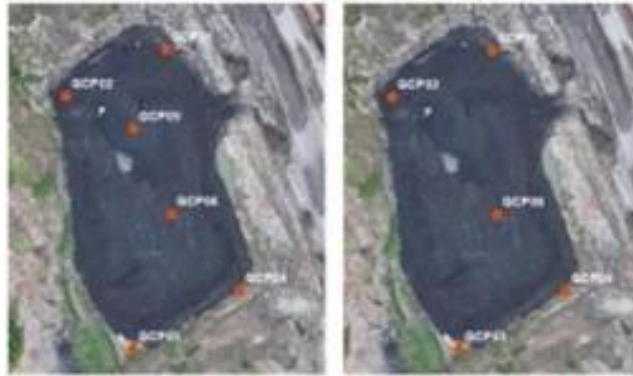
Uji ketelitian geometri dilakukan menggunakan ICP yang tidak dilibatkan dalam proses *georeferensi*. Ketelitian horizontal dievaluasi berdasarkan selisih koordinat X dan Y, sedangkan ketelitian vertikal dievaluasi berdasarkan selisih koordinat Z antara hasil pengolahan dan data pengukuran lapangan. Selisih koordinat tersebut dianalisis secara statistik menggunakan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk menggambarkan tingkat akurasi model fotogrametri yang dihasilkan.

Setelah model UAV dinyatakan memenuhi ketelitian geometrik, tahap selanjutnya adalah perhitungan volume *stockpile* menggunakan perangkat lunak Surpac dengan metode *cut and fill*. Metode ini menghitung volume material berdasarkan selisih antara *Digital Terrain Model* (DTM) permukaan atas dan permukaan bawah di dalam batas area kerja (*boundary*) yang sama. Penetapan *boundary* dilakukan untuk memastikan keseragaman luasan perhitungan, sehingga volume yang dihasilkan merepresentasikan kondisi material secara akurat dan dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan data TLS.

4. Hasil

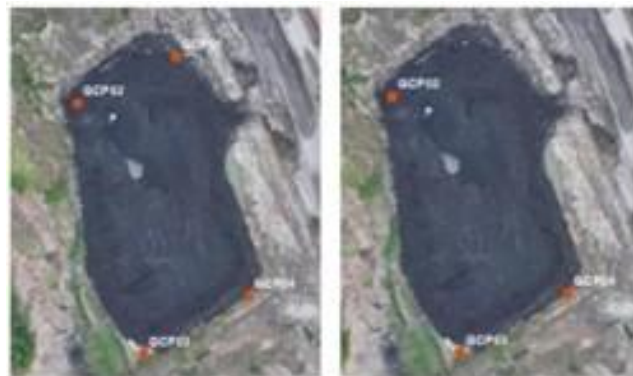
4.1. Hasil Pengukuran GCP dan ICP Data

Pengukuran GCP dan ICP dilakukan menggunakan GNSS dengan metode RTK. GCP digunakan sebagai referensi koreksi posisi geometrik citra UAV. Meskipun akuisisi dilakukan dengan 6 GCP, pengolahan data divariasikan menjadi 6, 5, 4, 3 GCP, serta tanpa GCP. Ilustrasi variasi jumlah GCP ditampilkan pada Gambar 3 dan 4.



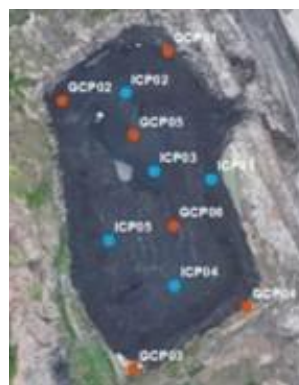
Gambar 3. Persebaran variasi 6 GCP dan 5 GCP.

Gambar 3 memperlihatkan distribusi titik GCP untuk konfigurasi 6 dan 5 GCP. Pada konfigurasi 6 GCP, empat titik berada di kaki *stockpile* dan dua di atasnya, sementara pada 5 GCP, satu titik di tengah bagian atas dihilangkan. Selain itu, juga digunakan variasi 4 dan 3 GCP, yang distribusinya ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Persebaran variasi 4 GCP dan 3 GCP.

Gambar 4 menunjukkan distribusi 4 dan 3 GCP, di mana konfigurasi 4 GCP berada di kaki *stockpile*, sedangkan 3 GCP hanya tersisa 3 GCP di bagian bawah kaki *stockpile*. Selain itu, titik ICP digunakan sebagai titik uji akurasi dengan membandingkan posisi lapangan dan hasil fotogrametri, ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Persebaran GCP dan ICP.

Gambar 5 menunjukkan distribusi titik ICP yang merata pada *stockpile* dan sekitar GCP. Titik-titik ICP ditempatkan diantara GCP dan di area-area strategis pada area *stockpile*. Persebaran ICP meliputi bagian atas *stockpile* dan di kaki *stockpile*.

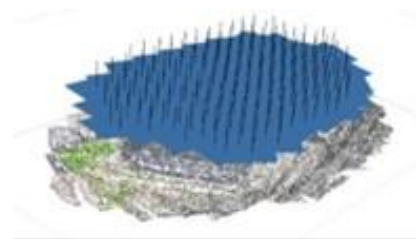
4.2. Hasil Pengolahan Data UAV

4.2.1. Hasil *Align Photos*

Tahap awal pengolahan foto udara adalah *align photos*, yaitu proses menyelaraskan citra berdasarkan kesamaan titik untuk membentuk satu sistem koordinat dan memperkirakan posisi kamera secara otomatis. Ilustrasinya ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Hasil Point Cloud Proses Align Photos.



Gambar 7. Hasil Posisi Kamera Proses Align Photos.

4.2.2. Hasil Georeferencing

Georeferencing merupakan proses penentuan titik GCP pada foto udara yang belum memiliki referensi koordinat, untuk mengintegrasikan data tersebut ke dalam sistem koordinat yang sesuai dengan kondisi nyata di permukaan bumi. Hasil interval *error* akurasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil interval *error* akurasi

GCP	Tinggi Terbang	Error (m)	Error (pix)
6 GCP	60 m	0,025773	0,175
5 GCP	60 m	0,025642	0,175
4 GCP	60 m	0,017011	0,142
3 GCP	60 m	0,013237	0,124
6 GCP	70 m	0,026483	0,244
5 GCP	70 m	0,026874	0,241
4 GCP	70 m	0,017488	0,203
3 GCP	70 m	0,017225	0,201
6 GCP	80 m	0,027526	0,280
5 GCP	80 m	0,027103	0,276
4 GCP	80 m	0,017070	0,219
3 GCP	80 m	0,015802	0,212

Tabel 1 merupakan nilai *error* hasil *georeferencing*. *Error* tersebut mempunyai kesalahan sebesar 1,317 kali GSD pada ketinggian 60 meter, 1,236 kali GSD pada 70 meter, dan 1,046 kali GSD pada 80 meter.

4.2.3. Hasil Proses Build Dense Cloud

Tahap proses *build dense cloud* ini dilakukan untuk mendetailkan titik-titik setelah dilakukan proses *align photos*. Berikut merupakan hasil jumlah titik *dense cloud* pada setiap tinggi terbang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Jumlah Titik Pada Proses *Build Dense Cloud*

Tinggi Terbang	Jumlah point
60 meter	14072996
70 meter	11327793
80 meter	9213618

Pada Tabel 2 terlihat jumlah titik hasil *dense cloud* menunjukkan semakin rendah tinggi terbang, semakin kecil nilai GSD. GSD pada ketinggian 60 meter sebesar 1,55 cm/piksel, ketinggian 80 meter

sebesar 1,78 cm/piksel, dan ketinggian 80 meter sebesar 2,09 cm/piksel. GSD kecil berarti setiap piksel merepresentasikan area lebih kecil di permukaan tanah, sehingga detail objek lebih jelas dan jumlah titik meningkat. Semakin kecil GSD akan menghasilkan akurasi pengukuran yang lebih tinggi.

4.3. Hasil Ketelitian Geometri

Uji ketelitian geometri dilakukan dengan membandingkan koordinat foto dan ICP hasil GNSS, yaitu koordinat X dan Y untuk ketelitian horizontal, serta koordinat Z untuk ketelitian vertikal. Hasil ketelitian geometri dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil interval *error* akurasi

GCP	Tinggi Terbang	CE90 (Hor)	LE90 (Vert)	Kelas	Berapa Kali GSD CE90	Berapa Kali GSD LE90
6 GCP	60 m	0,1202	0,0695	Kelas 1	7,754	4,483
5 GCP	60 m	0,1248	0,0691	Kelas 1	8,051	4,458
4 GCP	60 m	0,1308	0,1849	CE90 = Kelas 2, LE90 = Kelas 3	8,438	11,929
3 GCP	60 m	0,1286	0,2237	CE90 = Kelas 2, LE90 = Kelas 3	8,296	14,432
6 GCP	70 m	0,1156	0,0886	Kelas 1	6,494	4,977
5 GCP	70 m	0,1217	0,0837	Kelas 1	6,837	4,702
4 GCP	70 m	0,1366	0,1943	CE90 = Kelas 2, LE90 = Kelas 3	7,674	10,915
3 GCP	70 m	0,1452	0,3093	CE90 = Kelas 2, LE90 = Kelas 3	8,157	17,376
6 GCP	80 m	0,1145	0,0969	Kelas 1	5,478	4,636
5 GCP	80 m	0,1252	0,0820	Kelas 1	5,990	3,923
4 GCP	80 m	0,1469	0,0879	CE90 = Kelas 2, LE90 = Kelas 1	7,028	4,205
3 GCP	80 m	0,1449	0,1222	Kelas 2	6,933	5,846
Tanpa GCP	60 m	3,6088	10,4044	Tidak memenuhi	2328258	6712516,1
Tanpa GCP	70 m	3,3831	13,6774	Tidak memenuhi	1900618	7683932,6
Tanpa GCP	80 m	2,2274	13,3682	Tidak memenuhi	1065742	6396267,9

Tabel 3 menunjukkan secara umum, penambahan GCP dari 3 hingga 6 meningkatkan akurasi di semua ketinggian, dengan model terbaik pada 6 GCP di 60 meter dan terburuk pada 3 GCP di 70 meter. Tanpa GCP, akurasi sangat rendah karena tidak ada referensi koordinat. Jumlah GCP juga memengaruhi rasio ketelitian terhadap GSD, di mana semakin banyak GCP, semakin baik akurasinya. Berdasarkan Peraturan BIG No. 18 Tahun 2021, ketelitian horizontal dan vertikal pada penggunaan 6 dan 5 GCP di ketinggian 60, 70, dan 80 meter termasuk dalam kelas 1 untuk peta skala 1:1.000. Sementara itu, penggunaan 3 dan 4 GCP tidak memenuhi syarat kelas 1, namun masih sesuai untuk skala peta 1:1.000.

4.4. Hasil Perhitungan Volume *Stockpile*

Data acuan yang digunakan untuk perhitungan volume UAV adalah hasil data yang diambil dengan TLS yaitu sebesar 60.462,01 m³. Perhitungan ketelitian volume batu bara mengacu pada persamaan berikut :

$$\text{Prosentase perbedaan (\%)} = \frac{\text{volume UAV} - \text{volume TLS}}{\text{volume TLS}} \times 100\% \quad (1)$$

Berikut hasil deviasi volume yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan volume *stockpile*

Jumlah GCP	Tinggi Terbang	CE90 (Hor)	LE90 (Vert)	Kelas	Volume UAV (m ³)	Deviasi (%)
6 GCP	60 meter	0,1202	0,0695	Kelas 1	59.935,57	-0,871%
	70 meter	0,1156	0,0886	Kelas 1	59.557,81	-1,495%
	80 meter	0,1145	0,0969	Kelas 1	59.810,69	-1,077%
5 GCP	60 meter	0,1248	0,0691	Kelas 1	59.946,63	-0,852%
	70 meter	0,1217	0,0837	Kelas 1	59.632,64	-1,372%
4 GCP	80 meter	0,1252	0,0820	Kelas 1	59.935,85	0,870%
	60 meter	0,1308	0,1849	CE90=Kelas 2, LE90=Kelas 3	60.826,40	0,603%

Jumlah GCP	Tinggi Terbang	CE90 (Hor)	LE90 (Vert)	Kelas	Volume UAV (m ³)	Deviasi (%)
	70 meter	0,1366	0,1943	CE90=Kelas 2, LE90=Kelas 3	60.894,40	0,715%
	80 meter	0,1469	0,0879	CE90=Kelas 2, LE90=Kelas 1	59.954,48	-0,839%
	60 meter	0,1286	0,2237	CE90=Kelas 2, LE90=Kelas 3	60.957,37	0,819%
3 GCP	70 meter	0,1452	0,3093	CE90=Kelas 3, LE90=Kelas 3	61.635,44	1,941%
Tanpa GCP	80 meter	0,1449	0,1222	Kelas 2	60.467,67	0,009%
	60 meter	3,608879	10,40447	Tidak memenuhi	130.815,47	116,360%
	70 meter	3,383122	13,67742	Tidak memenuhi	153.951,89	154,626%
	80 meter	2,227488	13,36829	Tidak memenuhi	151.144,51	149,983%

Tabel 4 menunjukkan bahwa tinggi terbang 60 meter merupakan yang paling akurat untuk pemetaan volume *stockpile*, karena menghasilkan deviasi terkecil dan paling stabil di semua variasi GCP. Sementara itu, pada tinggi 70 meter menunjukkan deviasi yang fluktuatif pada semua jumlah GCP.

5. Pembahasan

5.1. Pengaruh Jumlah Ground Control Point (GCP)

Berdasarkan Tabel 4, jumlah GCP berpengaruh terhadap deviasi volume. Penggunaan 6 GCP menghasilkan deviasi paling rendah (-0,871% hingga -1,495%), diikuti 5 GCP dengan deviasi yang masih baik. Namun, pada 3-4 GCP, deviasi meningkat, terutama 3 GCP di 70 meter akibat minimnya referensi koreksi geometri. Tanpa GCP, deviasi melebihi 100%, menegaskan pentingnya GCP dalam georeferencing.

5.2. Pengaruh Tinggi Terbang UAV

Hasil deviasi volume menunjukkan pola yang fluktuatif terhadap variasi tinggi terbang. Contohnya, pada 5 GCP, ketinggian 70 meter menghasilkan deviasi -1,372%, lebih tinggi dibandingkan 60 meter (-0,852%) dan 80 meter (-0,870%). Ini menunjukkan bahwa deviasi pada 70 meter cenderung lebih besar dan tidak stabil.

5.3. Korelasi RMSE dan Deviasi Volume

Berdasarkan hasil perhitungan volume, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan antara keterkaitan antara nilai RMSE dan hasil deviasi. Pada Tabel 5, ketinggian 70 meter menghasilkan deviasi volume tertinggi pada semua variasi GCP. Meskipun nilai CE90 dan LE90 tergolong kecil, deviasi volume tetap besar, menunjukkan ketidaksesuaian antara RMSE dan akurasi volume. Hal ini disebabkan karena volume tidak hanya bergantung pada ketelitian, tetapi juga pada bentuk dan kerapatan DTM.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi, akurasi volume UAV berkisar antara 59.557,81 m³ hingga 61.635,44 m³, dengan hasil terbaik pada ketinggian 60 meter (rata-rata 60.416,49 m³), mendekati volume acuan 60.462,01 m³. Penggunaan 6 GCP menghasilkan deviasi terkecil (-0,871% hingga -1,495%) dengan rata-rata volume 59.768,02 m³. Meski kombinasi 60 meter dan 6 GCP paling akurat, konfigurasi 3 GCP pada ketinggian 70-80 meter masih berada dalam batas deviasi maksimum 2%, sehingga tetap layak digunakan.

7. Ucapan Terima Kasih / Acknowledgment

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh dosen Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar atas ilmu, bimbingan, dan nasihat yang telah diberikan selama masa perkuliahan hingga penyusunan penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Departemen *Engineering* PT Putra Perkasa Abadi *Jobsite* PT Bukit Asam Tbk yang telah memberikan izin dan fasilitas untuk pelaksanaan penelitian.

8. Daftar Pustaka

- Badan Informasi Geospasial. 2021. Tata Cara Penyelenggaraan Informasi Geospasial. Jakarta: Badan Informasi Geospasial
- Bandaso, S., Winarno, A., Hasan, H., Respati, L., & Magdalena, H. (2023). Studi Kehilangan Batubara dari Stockpile Ke Tongkang Di PT. Indochin Resources Kecamatan Palaran Samarinda Provinsi

- Kalimantan Timur. *Journal of Comprehensive Science (JCS)*, 2(11), 1813–1820.
<https://doi.org/10.59188/jcs.v2i11.543>
- Permadi, S., Magdalena, H., Hasan, H., Winarno, A., & Windhu Nugroho. (2024). Perbandingan Volume Overburden Berdasarkan Data Survey Dan Truck Count di PT Alam Karya Gemilang Kecamatan Muara Badak. *Journal of Comprehensive Science*, 3(1), 158–166.
<https://jcs.greenpublisher.id/index.php/jcs/article/view/598>.
- Prayogo, I., Manoppo, F., & Lefrandt, L. (2020). Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter Dalam Pemetaan Digital (Fotogrametri) Menggunakan Kerangka Ground Control Point (GCP). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 10(1), 47–58.
<https://doi.org/10.3846/987-s>.