

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.)

Laurensia Ayu Anggraeni^{1*} Ruli Andaru²

¹Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

²Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Research Article

DOI:

10.22146/jgst.v4i1.24160

correspondence:

laurensia.ayu2002@mail.ugm.ac.id

Article history:

Received:

28-08-2025

Accepted:

08-02-2026

Published:

31-07-2026

ABSTRACT

The use of photogrammetry methods based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has become increasingly widespread in measuring overburden volumes in the mining industry. One of the factors that can affect the accuracy of measurement results is the number and distribution of Ground Control Points (GCPs) in the aerial triangulation process. This research was conducted at PT Putra Perkasa Abadi, Jobsite PT Bukit Asam, Tbk., using six variations in the number of GCPs (0, 1, 2, 4, 5, and 6 points) as well as testing uniform and non-uniform distribution configurations with 2 GCPs, supported by seven Independent Check Points (ICPs) in each data processing stage. Data were processed using the SFM-MVS Photogrammetry method, while volume calculation was performed using the Cut and Fill method based on boundary areas obtained from GNSS RTK measurements as the reference surface. The results showed that the 6 GCP configuration produced the best accuracy with a volume difference of 3.76%, along with geometric accuracy of CE90 0.0344 m and LE90 0.0510 m. However, using a minimum of 4 GCPs with uniform distribution already met the standards of the Geospatial Information Agency (BIG, 2021), with a volume difference of 6.31%. In contrast, the configuration without GCPs resulted in the largest volume discrepancy (8,571.45%) with CE90 of 6.1055 m. Apart from the number, the distribution of GCPs also affected accuracy; in the 2 GCP configuration, uniform distribution reduced the volume difference to 6.83% compared to 316.70% in the non-uniform distribution. Therefore, the use of at least 4 GCPs with uniform distribution is recommended to achieve better accuracy in overburden volume measurement using UAV photogrammetry, thus producing reliable and effective survey results.

Keywords: UAV photogrammetry, Ground Control Point, overburden, volume, horizontal accuracy, vertical accuracy

INTISARI

Penggunaan metode fotogrametri berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) semakin luas diterapkan dalam pengukuran volume *overburden* di industri pertambangan. Salah satu faktor yang dapat memengaruhi akurasi hasil pengukuran adalah jumlah serta distribusi *Ground Control Point* (GCP) pada proses triangulasi udara. Penelitian ini dilaksanakan di PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam, Tbk., dengan enam variasi jumlah GCP (0, 1, 2, 4, 5, dan 6 titik) serta pengujian distribusi merata dan tidak merata pada konfigurasi 2 GCP, dengan menggunakan tujuh *Independent Check Point* (ICP) pada setiap pemrosesan datanya. Data diolah menggunakan metode *SFM-MVS Photogrammetry*, sedangkan perhitungan volume dilakukan dengan metode *Cut and Fill* berdasarkan batas area dari hasil pengukuran GNSS RTK sebagai acuan permukaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi 6 GCP menghasilkan akurasi terbaik dengan selisih volume 3,76%, serta ketelitian geometrik CE90 0,0344 m dan LE90 0,0510 m. Namun, penggunaan minimal 4 GCP dengan distribusi merata telah memenuhi standar Badan Informasi Geospasial (BIG, 2021) dengan selisih volume 6,31%. Sebaliknya, konfigurasi tanpa GCP menghasilkan selisih volume terbesar (8.571,45%) dengan CE90 6,1055 m. Selain jumlah, distribusi GCP juga memengaruhi

akurasi, pada 2 GCP, distribusi merata menurunkan selisih volume hingga 6,83% dibanding 316,70% pada distribusi tidak merata. Oleh karena itu, direkomendasikan penggunaan minimal 4 GCP dengan distribusi merata untuk memperoleh akurasi volume *overburden* yang lebih baik menggunakan metode fotogrametri UAV, sehingga menghasilkan pengukuran yang akurat dan efektif.

Kata kunci: UAV fotogrametri, Ground Control Point, *overburden*, volume, akurasi horizontal, akurasi vertikal

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Pertambangan merupakan serangkaian aktivitas yang meliputi eksplorasi, studi kelayakan, penambangan, pengolahan, distribusi hingga rehabilitasi pasca tambang, dan memegang peranan penting dalam pemenuhan energi serta bahan baku industri (Mahdiyyah, 2016). Pada penambangan batubara, salah satu faktor yang menentukan ketercapaian target produksi adalah kegiatan pengupasan *overburden*. *Overburden* merupakan lapisan tanah atau batuan penutup yang harus dipindahkan sebelum proses penambangan dimulai (Assidiqi dkk., 2022). Apabila target pengupasan tidak tercapai, maka proses produksi batubara dapat terhambat dan berpotensi menimbulkan kerugian perusahaan (Tenriajeng, 2003).

Dalam memastikan ketercapaian target pengupasan *overburden*, diperlukan pengawasan dan evaluasi melalui pekerjaan uji petik, yaitu pemeriksaan sampel unit angkut guna menilai kesesuaian volume material dengan target produksi. Uji petik berperan penting dalam pengendalian manajemen produksi karena membantu pengawas menilai kondisi muatan, mengidentifikasi potensi kelebihan muatan, dan mengambil langkah perbaikan yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi kerja (Iskandar, 2016).

Pada PT Putra Perkasa Abadi, Jobsite PT Bukit Asam Tbk, pengukuran volume uji petik *overburden* masih mengandalkan metode survei konvensional dengan GNSS *Real-Time Kinematic* (RTK). Seiring berkembangnya teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dengan metode fotogrametri, kegiatan pengukuran dapat dilakukan lebih cepat, efisien, dan akurat untuk area berskala luas (Prayogo dkk., 2020). Pemanfaatan UAV tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga memberikan validasi yang kuat terhadap data yang dikumpulkan.

Namun demikian, akurasi hasil pemodelan volume menggunakan UAV sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah jumlah dan distribusi *Ground Control Point* (GCP) yang digunakan dalam proses triangulasi udara. Jumlah GCP tidak memiliki standar baku dan umumnya disesuaikan dengan luas area serta terdistribusi merata di seluruh area. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah GCP terhadap akurasi pengukuran volume *overburden* menggunakan UAV fotogrametri. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil volume metode fotogrametri terhadap volume hasil pengukuran GNSS RTK sebagai acuan, untuk memastikan keandalan data dalam mendukung peningkatan kinerja operasional tambang.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh variasi jumlah dan distribusi *Ground Control Point* (GCP) terhadap tingkat akurasi pengukuran volume material *overburden* pada uji petik menggunakan metode fotogrametri, serta menghitung selisih volume antara hasil pengukuran metode fotogrametri dan metode GNSS RTK.

1.3. Lingkup Kegiatan

Dalam kegiatan aplikatif ini, terdapat beberapa pekerjaan yang menjadi acuan kerja dan batasan yang dilakukan.

1. Titik GCP yang digunakan untuk pengukuran berjumlah 6 titik, yang tersebar merata secara visual dengan mempertimbangkan kondisi *terrain*, mencakup sisi perimeter area dan bagian tengah area/*scene*, serta titik ICP yang digunakan berjumlah 7 titik tersebar merata di antara titik GCP.
2. Pengumpulan data posisi titik *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) dengan GNSS metode *Real Time Kinematic* (RTK) untuk efisiensi pengambilan data.
3. Pengambilan data foto udara dilakukan menggunakan UAV DJI Mavic 3 Pro.

4. Penerbangan UAV dilakukan pada ketinggian 30 meter, dengan resolusi kamera 5280 x 2970, *overlap* 80%, dan sudut pengambilan *vertical/ortho*, untuk mendapatkan foto udara dari area uji petik *overburden*.
5. Pengolahan data dilakukan dengan enam variasi jumlah GCP, yaitu 0 GCP, 1 GCP, 2 GCP, 4 GCP, 5 GCP, dan 6 GCP. Tumpukan *overburden* berjumlah 5 untuk setiap variasinya.
6. Pengolahan data menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape Pro untuk menghasilkan model permukaan 3D dari tumpukan sampel uji petik.
7. Perhitungan volume material *overburden* dengan perangkat lunak Surpac menggunakan metode *Cut and Fill*.
8. Evaluasi akan dilakukan dengan perhitungan selisih volume pengukuran metode fotogrametri dan pengukuran GNSS RTK dari perusahaan.

2. Data

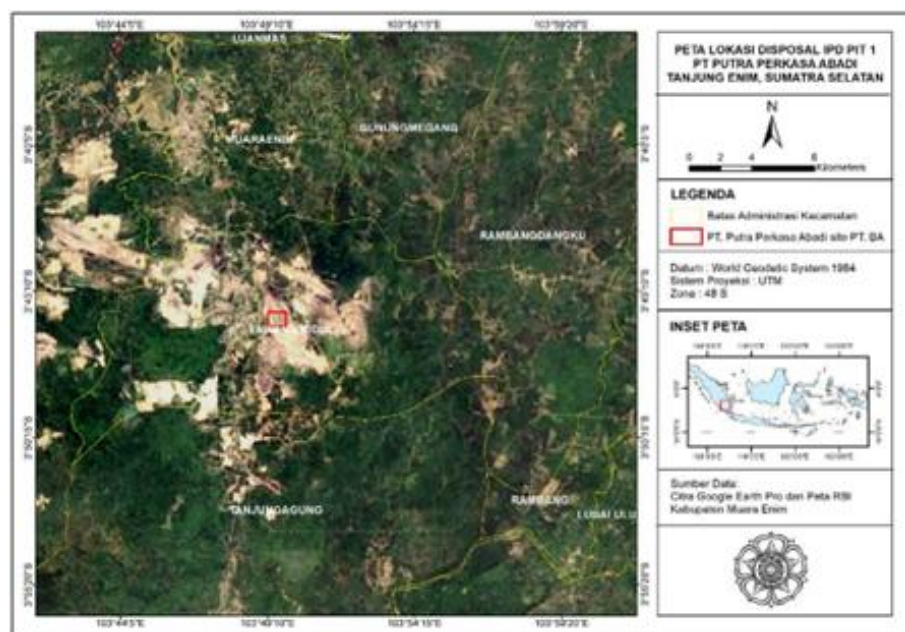
2.1. Peralatan dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini mendukung kegiatan pengukuran lapangan, akuisisi data, serta pengolahan data fotogrametri. Pengukuran posisi *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) dilakukan menggunakan GNSS Leica GS18 yang dilengkapi pole dan bipod untuk menjaga kestabilan pengamatan. Akuisisi data foto udara dilakukan dengan UAV DJI Mavic 3 Pro, dengan perencanaan jalur terbang menggunakan situs *Waypointmap*. Penandaan titik kontrol di lapangan menggunakan *premark* GCP, lakban hitam, pita warna, paku payung, serta triplek berukuran 80 × 80 cm sebagai landasan GCP dan ICP. Proses pengolahan data dilakukan menggunakan laptop HP 14s-dq5000TU dengan spesifikasi Intel Core i5-1240P, RAM 8 GB, dan sistem operasi Windows 11, dengan dukungan perangkat lunak Agisoft Metashape Pro, Surpac 6.6.2, ArcMap, serta Microsoft Word dan Excel.

Bahan penelitian yang digunakan untuk penelitian ini meliputi desain sebaran *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP), data koordinat titik base, GCP, dan ICP hasil pengukuran GNSS RTK, data foto udara hasil akuisisi UAV DJI Mavic 3 Pro, data volume uji petik *overburden* hasil pengukuran GNSS RTK dari perusahaan, data *point cloud* tumpukan uji petik *overburden*, serta data boundary RTK yang diperoleh dari perusahaan sebagai batas area pengolahan.

2.2. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim, Kecamatan Lawang Kidul, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan, pada Januari–Maret 2025. Lokasi penelitian berada di Disposasi IPD PIT 1 dengan luas area uji petik *overburden* sekitar ±0,3 Ha.

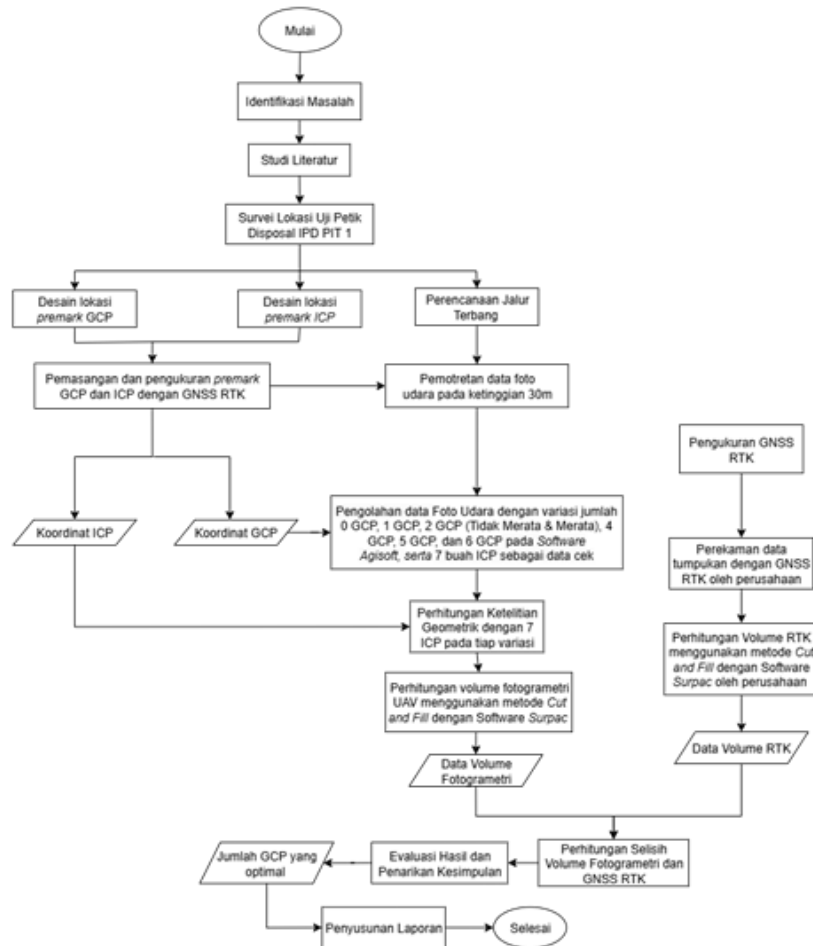


Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian Disposasi IPD PIT 1. Gambar Lokasi penelitian berada di PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam Tbk. Kotak merah menunjukkan area penelitian

3. Metodologi

3.1. Diagram Alir

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan yang dimulai dari persiapan, akuisisi data, pengolahan data fotogrametri, perhitungan ketelitian geometrik, perhitungan volume, hingga evaluasi data.



Gambar 2. Diagram Alir Pelaksanaan. Alur penelitian digambarkan dalam bentuk diagram alir yang menunjukkan keterkaitan antar tahapan secara berurutan dan berkesinambungan.

3.2. Tahap Persiapan Data

Tahap persiapan data dilakukan dengan identifikasi masalah melalui studi literatur dan observasi lapangan untuk merumuskan fokus penelitian, yaitu pengaruh jumlah serta distribusi *Ground Control Point* (GCP) terhadap akurasi pengukuran volume *overburden*. Survei lokasi dilakukan di Disposasi IPD PIT 1 untuk menentukan area uji petik, diikuti proses *dumping* dengan lima unit *Heavy Duty* (HD) dan pengambilan data uji petik menggunakan GNSS RTK oleh perusahaan. Selanjutnya, dilakukan perencanaan jalur terbang UAV. Pada tahap ini juga dilakukan pemasangan enam titik *Premark* GCP dan tujuh titik ICP yang tersebar merata di area penelitian dengan mempertimbangkan kondisi *terrain*, elevasi, dan visibilitas dari udara.

3.3. Tahap Akuisisi Data

Tahap akuisisi data dilakukan melalui pemasangan enam titik GCP dan tujuh titik ICP yang tersebar merata di area uji petik sebagai acuan georeferensi. Pengukuran koordinat dilakukan menggunakan GNSS Leica GS18 dengan metode RTK, yang memiliki ketelitian 1-5cm (Abidin, 2007), kemudian dilanjutkan dengan pemotretan udara menggunakan UAV DJI Mavic 3 Pro. Kamera yang digunakan memiliki resolusi sebesar 5280×2970 piksel, dengan ukuran piksel $3,66 \times 3,66 \mu\text{m}$ dan panjang fokus 12,29 mm. Berdasarkan parameter tersebut, *Ground Sampling Distance* (GSD) yang dihasilkan adalah 7,65 mm/piksel, sehingga setiap piksel pada citra merepresentasikan area seluas 7,65 mm di

permukaan tanah. Proses akuisisi dilaksanakan pada kondisi cuaca cerah untuk memastikan cakupan area yang optimal serta kualitas citra yang baik.



Gambar 3. Pengukuran GCP dan ICP di Lapangan. Proses pengukuran dilakukan bersama tim survei menggunakan perangkat GNSS dengan metode RTK di lokasi tambang PT Putra Perkasa Abadi

3.4. Tahap Pengolahan Data Fotogrametri

Pengolahan data fotogrametri dilakukan menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape Pro dengan pendekatan *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS) (Westoby dkk., 2012; Li dkk., 2010). Proses dimulai dari *align photos* untuk menghasilkan *tie points* dan parameter orientasi kamera, kemudian dilakukan georeferensi melalui penempatan titik GCP sebagai referensi spasial serta ICP sebagai data evaluasi ketelitian. Selanjutnya, dilakukan optimasi posisi kamera untuk meningkatkan akurasi model, yang dilanjutkan dengan pembuatan *dense point cloud* guna membentuk titik yang lebih rapat. Hasil *point cloud* diekspor dalam format DXF, yang nantinya digunakan untuk pembuatan DTM dan perhitungan volume pada perangkat lunak Surpac.

3.5. Tahap Perhitungan Ketelitian Geometrik

Perhitungan ketelitian *orthophoto* yang dihasilkan dari pengolahan data menggunakan UAV dilakukan dengan memanfaatkan *Ground Control Points* (GCP) dan *Independent Check Points* (ICP), sesuai dengan peraturan Kepala BIG Nomor 6 Tahun 2018 Tentang Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014. Untuk menentukan ketelitian horizontal, dilakukan perhitungan antara koordinat X dan Y pada data ICP hasil pengolahan dengan data ICP dari lapangan. Sedangkan ketelitian vertikal dihitung berdasarkan perbandingan koordinat Z hasil pengolahan dengan koordinat Z dari lapangan. Sebanyak 7 titik ICP digunakan sebagai data *check* untuk memverifikasi akurasi posisi horizontal dan vertikal dari model 3D yang dihasilkan.

Menurut Peraturan Kepala BIG Nomor 6 Tahun 2018, akurasi peta dievaluasi berdasarkan selisih koordinat hasil pemetaan dengan data lapangan, dengan ketelitian horizontal dinyatakan melalui CE90 dan ketelitian vertikal melalui LE90. Analisis dilakukan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) yang merepresentasikan selisih posisi antara hasil pengolahan data dan kondisi sebenarnya. Berikut merupakan proses perhitungan rumus RMSE tersebut.

$$RMSE \text{ horizontal} = \sqrt{\frac{\sum ((x_{DEM} - x_{CEK})^2) + ((y_{DEM} - y_{CEK})^2)}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE \text{ vertikal} = \sqrt{\frac{\sum ((z_{DEM} - z_{CEK})^2)}{n}} \quad (2)$$

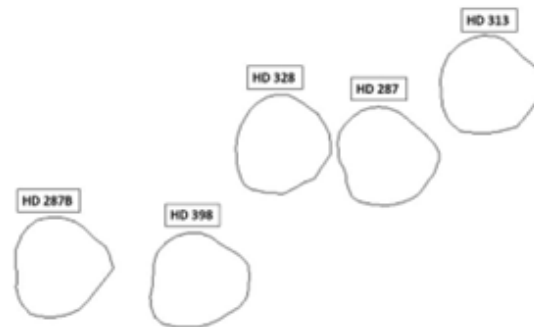
$$CE90 = 1,5175 \times RMSEr \quad (3)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSEz \quad (4)$$

Dimana, CE90 : Cek nilai akurasi horizontal, LE90 : Cek nilai akurasi vertikal, n : Jumlah total titik kontrol yang digunakan, x/y/z DEM : Nilai koordinat titik uji pada model elevasi digital hasil pengolahan, x/y/z CEK : Nilai koordinat titik uji hasil pengukuran di lapangan.

3.6. Tahap Perhitungan Volume

Tahap perhitungan volume uji petik *overburden* dilakukan menggunakan perangkat lunak Surpac dengan metode *Cut and Fill*, berdasarkan dua permukaan DTM yaitu permukaan dasar (*bottom*) dan permukaan atas (*top*). Permukaan dasar merepresentasikan kondisi sebelum pekerjaan, sedangkan permukaan atas berasal dari hasil pemrosesan *point cloud* UAV. Untuk memastikan kesesuaian area, kedua permukaan dipotong menggunakan boundary hasil pengukuran GNSS metode RTK yang juga dipakai pada perhitungan volume GNSS. *Boundary* ini ditampilkan pada Gambar 4 dan divisualisasikan dalam *overlay orthophoto* pada Gambar 5.



Gambar 4. Visualisasi *Boundary* Data GNSS RTK.

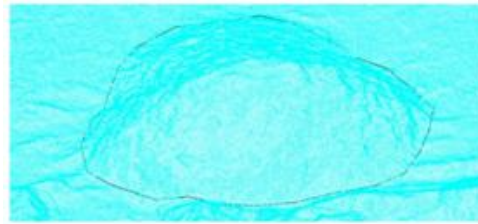


Gambar 5. Ilustrasi *Overlay Orthophoto* dengan *Boundary*.

Permukaan dasar dibentuk dari boundary GNSS RTK yang diolah menjadi DTM menggunakan perintah *Graphics Create DTM (GCD)* di Surpac, seperti pada Gambar 6. Sementara itu, permukaan atas diperoleh dari *point cloud* UAV hasil *Build Dense Cloud* di Agisoft Metashape, yang diekspor ke format *.dxf*, dikonversi menjadi *.str*, lalu dipotong berdasarkan *boundary* GNSS RTK. Ilustrasi *overlay point cloud* dengan *boundary* ditampilkan pada Gambar 7 dan DTM top yang terbentuk ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 6. *Base Surface*.



Gambar 7. Ilustrasi *Overlay Point cloud UAV dengan Boundary*.



Gambar 8. Ilustrasi *DTM UAV Overburden*.

Setelah kedua DTM (*top* dan *bottom*) disesuaikan areanya, volume dihitung menggunakan fitur *Cut and Fill between DTMs* pada menu *Surfaces* di Surpac, dengan hasil perhitungan ditampilkan dalam format .pdf. Nilai volume ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran GNSS RTK, yang dianggap sebagai data acuan. Perbandingan dilakukan dengan menghitung selisih volume antara metode fotogrametri UAV dan GNSS RTK, di mana volume GNSS RTK digunakan sebagai data pembagi karena dianggap sebagai data acuan.

$$\text{Selisih Volume} = \text{Volume Fotogrametri} - \text{Volume RTK} \quad (5)$$

$$\text{Persentase selisih (\%)} = \frac{(\text{Volume Fotogrametri} - \text{Volume RTK})}{\text{Volume RTK}} \times 100\% \quad (6)$$

Dimana, % : Persentase selisih perhitungan volume antara UAV dan RTK, Volume Fotogrametri : Hasil volume dari data fotogrametri, dan Volume RTK : Hasil volume dari data GNSS Metode RTK.

3.7. Tahap Evaluasi Data

Tahap ini dilakukan dengan mengevaluasi hasil volume metode fotogrametri pada variasi jumlah dan distribusi GCP terhadap volume acuan dari pengukuran GNSS RTK. Evaluasi ini juga melibatkan informasi parameter akurasi geometrik seperti CE90, LE90, serta persentase selisih volume, termasuk saran jumlah GCP yang optimal untuk digunakan perusahaan agar pengukuran volume lebih akurat dan representatif.

4. Hasil

4.1. Hasil Proses Akuisisi Data

4.1.1. Hasil Pengukuran GCP dan ICP dengan GNSS RTK

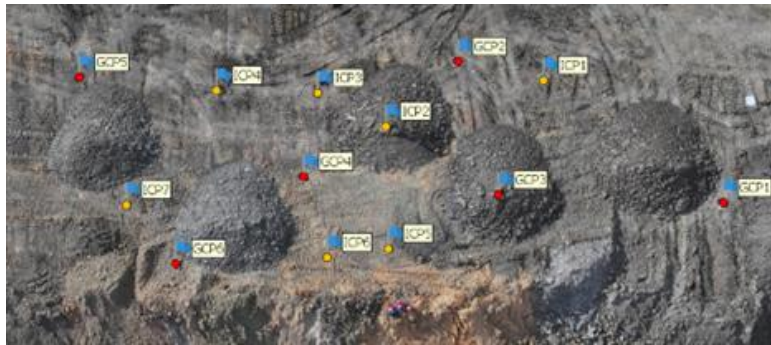
Pengukuran GCP yang dilakukan mendapatkan 6 titik dan pengukuran ICP mendapatkan 7 titik. Sistem proyeksi yang digunakan adalah UTM zona 48S (EPSG:32748). Satuan unit untuk GCP dan ICP adalah meter. Berikut koordinat hasil perekaman posisi ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Koordinat GCP

Nama Titik	Koordinat GCP		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
GCP1	369702,9312	9583275,659	31,9271
GCP2	369677,5969	9583277,363	31,8856
GCP3	369685,8289	9583267,877	34,3547
GCP4	369669,8951	9583262,311	32,1537
GCP5	369646,9765	9583261,632	32,0035
GCP6	369663,1566	9583250,589	32,1908

Tabel 2. Koordinat ICP

Nama Titik	Koordinat GCP		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ICP1	369685,0495	9583278,913	32,0484
ICP2	369674,7655	9583269,034	34,1433
ICP3	369667,617	9583269,579	32,0644
ICP4	369659,1828	9583265,889	32,0202
ICP5	369679,3345	9583259,88	32,2419
ICP6	369674,9035	9583256,886	32,1729
ICP7	369656,6012	9583253,224	32,149



Gambar 9. Persebaran Titik GCP dan ICP.

Persebaran titik GCP dan ICP ditampilkan pada Gambar 9 pada perangkat lunak Agisoft Metashape. Sebanyak 6 titik GCP ditandai dengan marker berwarna merah, sedangkan 7 titik ICP ditandai dengan marker berwarna kuning. Kedua jenis titik tersebut tersebar di sekitar area tumpukan overburden secara visual.

4.2. Hasil Pengolahan Data Fotogrametri

4.2.1. Hasil Align Photos

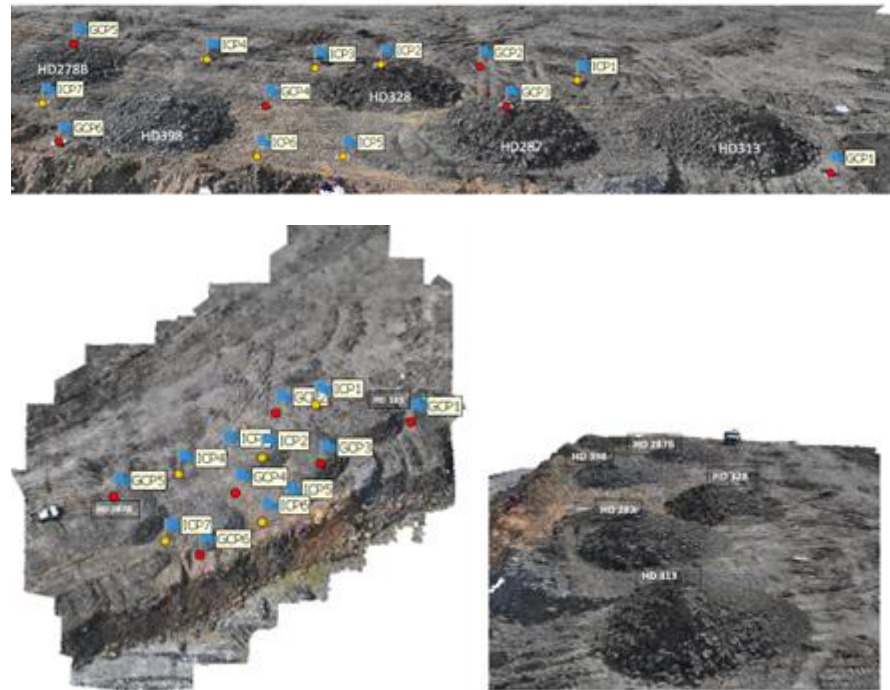
Pada tahap awal pemrosesan data fotogrametri dilakukan *Align Photos*, yaitu proses pendeteksian *feature points* berdasarkan pola intensitas piksel yang unik pada area tumpang tindih foto udara. Titik-titik tersebut kemudian dicocokkan (*image matching*) untuk menghasilkan *tie points* yang digunakan dalam triangulasi guna memperkirakan parameter orientasi kamera, baik Interior Orientation Parameters (IOP) maupun Exterior Orientation Parameters (EOP). Hasil triangulasi ini membentuk *sparse point cloud*, yakni sekumpulan titik tiga dimensi awal yang masih kasar, jarang, dan belum merepresentasikan bentuk permukaan objek secara detail. Pada penelitian ini, jumlah *tie points* yang diperoleh mencapai 53.505 titik untuk setiap variasi jumlah dan sebaran GCP, dengan visualisasi awal *sparse point cloud* ditampilkan pada Gambar 10.

Gambar 10. Tampilan Awal *Sparse Point cloud* dari Proses *Align Photo*.

4.2.2. Hasil Proses Build Dense Cloud

Proses *Build Dense Cloud* menghasilkan *point cloud* padat yang merepresentasikan permukaan area uji secara tiga dimensi. Kepadatan dan keakuratan *dense cloud* berpengaruh terhadap ketelitian

model permukaan dan perhitungan volume. Gambar 11 menampilkan visualisasi *point cloud* hasil pemodelan beserta sebaran GCP dan ICP sebagai kontrol dan validasi data fotogrametri.



Gambar 11. Visualisasi *Point cloud* Hasil Proses *Build Dense Cloud*.

4.2.3. Tampilan Lokasi Persebaran GCP dan ICP

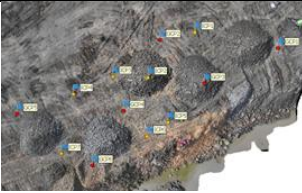
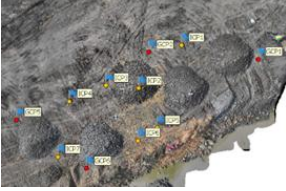
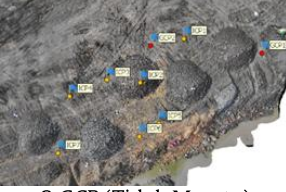
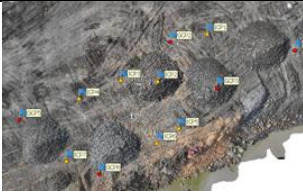
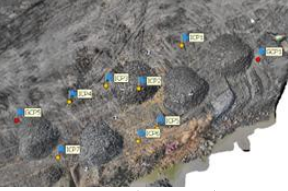
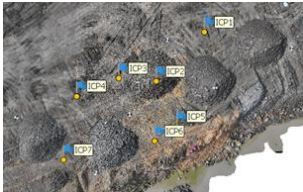
Penelitian ini menggunakan variasi jumlah *Ground Control Point* (GCP) sebanyak 0, 1, 2, 4, 5, dan 6 titik, dengan 7 *Independent Check Point* (ICP) yang ditempatkan secara konsisten pada setiap pengujian. Distribusi GCP pada konfigurasi 6 titik dilakukan merata di seluruh area, mencakup bagian atas tumpukan, tengah, dan tepi, sedangkan pada jumlah yang lebih sedikit pengurangan titik tetap memperhatikan keseimbangan geometris. Pada variasi 5 GCP, satu titik tengah dihilangkan namun cakupan masih merata, sedangkan pada 4 GCP titik tengah kembali dikurangi sehingga area tersebut kurang terwakili. Variasi 2 GCP disimulasikan dalam dua skema, yaitu penempatan tidak merata (GCP1 dan GCP2) yang menimbulkan ketidakseimbangan kontrol, serta penempatan merata (GCP1 dan GCP5) yang menjaga kestabilan geometri. Pada 1 GCP, hanya digunakan GCP1 di sisi kanan area, mencerminkan kondisi kendali spasial yang sangat terbatas, sementara pada 0 GCP tidak ada titik kontrol eksternal sehingga pemodelan sepenuhnya mengandalkan data GNSS internal UAV. Lokasi persebaran titik GCP dan ICP ditampilkan pada Tabel 3.

4.3. Hasil Perhitungan Ketelitian Geometrik

4.3.1. Hasil Error Proses Georeferencing

Hasil georeferensi menunjukkan bahwa peningkatan jumlah dan sebaran GCP menurunkan nilai error, yang ditampilkan pada Tabel 4. Konfigurasi 6 GCP memberikan akurasi terbaik dengan *error control* 0,039 meter dan *check point* 0,038 meter. Sebaran GCP yang tidak merata menyebabkan peningkatan error check point secara tajam. Penggunaan 1 GCP dan tanpa GCP menghasilkan *error check point* sangat tinggi akibat *overfitting* lokal dan tidak adanya referensi spasial. Error dalam satuan piksel relatif stabil, menunjukkan bahwa akurasi citra tidak selalu mencerminkan akurasi spasial.

Tabel 3. Koordinat GCP

Lokasi Persebaran GCP	
	6 GCP
	5 GCP
	4 GCP
	2 GCP (Tidak Merata)
	2 GCP (Merata)
	1 GCP
	0 GCP

Tabel 4. Hasil Error Proses Georeferencing

GCP	Total Error Control Point		Total Error Check Point	
	Error (m)	Error (pix)	Error (m)	Error (pix)
6 GCP	0,039	0,159	0,038	0,178
5 GCP	0,041	0,172	0,045	0,178
4 GCP	0,050	0,181	0,059	0,176
2 GCP Merata	0,072	0,218	0,148	0,177
2 GCP Tidak Merata	0,145	0,198	3,497	0,175
1 GCP	0,019	0,281	52,219	0,177
0 GCP	-	-	77,860	0,177

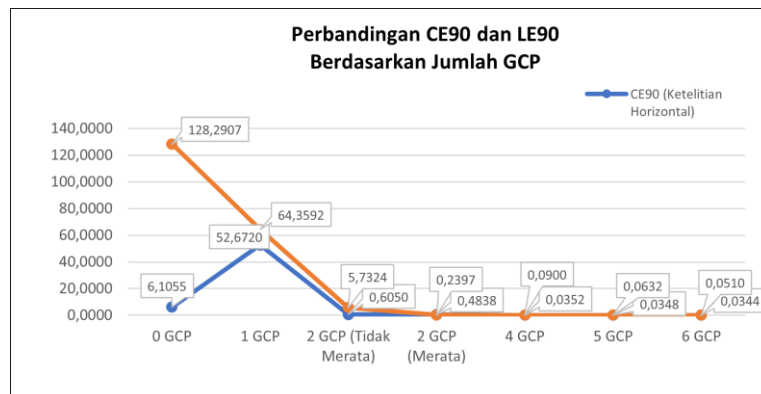
4.3.2. Hasil Perhitungan Ketelitian Geometrik

Perhitungan ketelitian geometrik dilakukan pada variasi jumlah GCP, termasuk perlakuan khusus pada konfigurasi 2 GCP dengan distribusi merata dan tidak merata. Hasil pada Tabel 5 menunjukkan bahwa semakin sedikit GCP yang digunakan, ketelitian model semakin menurun, terutama jika distribusi titik tidak merata. Berdasarkan standar BIG (2021), konfigurasi dengan 4, 5, dan 6 GCP memenuhi ketentuan Kelas 1 skala 1:1.000, sedangkan jumlah di bawah 4 GCP tidak mampu mencapai tingkat akurasi yang dipersyaratkan, sehingga jumlah sekaligus sebaran GCP menjadi faktor penting dalam menjamin keandalan ketelitian spasial.

Tabel 5. Tabel Ketelitian Geometrik

Variasi	Ketelitian Geometrik		Kelas
	Horizontal (m)	Vertikal (m)	
6 GCP	0,0344	0,0510	Kelas 1 (Skala 1:1.000)
5 GCP	0,0348	0,0632	Kelas 1 (Skala 1:1.000)
4 GCP	0,0352	0,0900	Kelas 1 (Skala 1:1.000)
2 GCP (Merata)	0,4838	0,2397	Kelas 1 (Skala 1:5.000)
2 GCP (Tidak Merata)	0,6050	5,7324	CE90 = Kelas 2 (Skala 1:5.000), LE90 = Tidak Memenuhi
1 GCP	52,6720	64,3592	Tidak Memenuhi

Gambar 12 memperlihatkan perbandingan nilai CE90 dan LE90 pada tiap variasi jumlah GCP. Konfigurasi 6 GCP menghasilkan akurasi terbaik dengan kesalahan horizontal 0,0344 meter dan vertikal 0,0510 meter, sedangkan 1 GCP menimbulkan kesalahan horizontal hingga 52,6720 meter akibat koreksi geometri yang hanya bersifat lokal. Tanpa GCP, kesalahan vertikal mencapai 128,2907 meter karena model tidak memiliki referensi ketinggian absolut, meskipun kesalahan horizontal relatif kecil. Distribusi GCP juga terbukti berpengaruh, di mana 2 GCP yang ditempatkan merata menghasilkan ketelitian lebih baik dibanding distribusi tidak merata.



Gambar 12. Grafik Perbandingan CE90 dan LE90 berdasarkan Jumlah GCP.

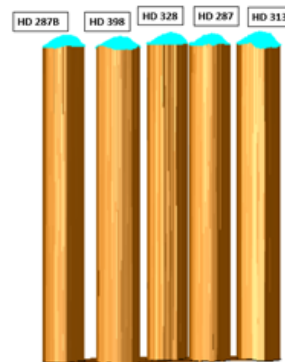
4.4. Digital Terrain Model pada Perhitungan Volume

Perhitungan volume material *overburden* dilakukan dengan menggunakan permukaan dasar hasil pengukuran GNSS RTK dan permukaan atas dari pemodelan fotogrametri UAV, dengan *boundary* yang sama sebagai batas area perhitungan. Visualisasi perhitungan volume menampilkan permukaan atas hasil fotogrametri UAV dan permukaan dasar GNSS RTK, dengan lima objek uji petik volume yang ditandai label HD 287B, HD 398, HD 328, HD 287, dan HD 313.

Tabel 6. Tampilan DTM Berdasarkan Variasi Jumlah GCP

Variasi	Pemodelan DTM
6 GCP	
5 GCP	
4 GCP	
2 GCP (Merata)	
2 GCP (Tidak Merata)	
1 GCP	

0 GCP



Berdasarkan hasil visualisasi pada Tabel 6, konfigurasi 6, 5, dan 4 GCP menghasilkan permukaan DTM yang stabil dan konsisten terhadap permukaan dasar. Pada konfigurasi 2 GCP, kualitas model sangat dipengaruhi oleh distribusi titik, di mana distribusi merata menghasilkan permukaan yang lebih seimbang dibandingkan distribusi berdekatan. Penggunaan 1 GCP menunjukkan ketidaksesuaian permukaan yang ekstrem akibat koreksi geometri yang bersifat lokal, sedangkan tanpa GCP permukaan DTM tampak mengambang karena tidak adanya acuan geospasial absolut. Jumlah dan distribusi GCP berperan penting dalam menjaga kestabilan geometri.

4.5. Hasil Perhitungan Volume

Hasil pengukuran volume material *overburden* menggunakan metode fotogrametri, yang dibandingkan dengan GNSS RTK pada lima unit *hauler*, menunjukkan bahwa perbedaan volume cenderung meningkat seiring dengan berkurangnya jumlah GCP yang digunakan.

Tabel 7. Tabel Volume Fotogrametri dan Perbandingannya dengan GNSS RTK

Jumlah GCP	Hauler	Volume Fotogramteri (M ³)	Volume RTK (M ³)	Selisih	Persen Selisih	Rerata Selisih
6 GCP	HD313	75,15	74,842	0,308	0,41%	3,76%
	HD287	71,68	73,344	-1,664	-2,27%	
	HD328	67,17	67,021	0,149	0,22%	
	HD389	71,26	70,814	0,446	0,63%	
	HD287B	73,27	61,169	12,101	19,78%	
	Rata-rata	71,706	69,438	2,268	3,76%	
5 GCP	HD313	75,51	74,842	0,668	0,89%	4,70%
	HD287	72,25	73,344	-1,094	-1,49%	
	HD328	67,71	67,021	0,689	1,03%	
	HD389	72,18	70,814	1,366	1,93%	
	HD287B	74,1	61,169	12,931	21,14%	
	Rata-rata	72,35	69,438	2,912	4,70%	
4 GCP	HD313	76,52	74,842	1,678	2,24%	6,31%
	HD287	74,03	73,344	0,686	0,94%	
	HD328	69,23	67,021	2,209	3,30%	
	HD389	73,6	70,814	2,786	3,93%	
	HD287B	74,09	61,169	12,921	21,12%	
	Rata-rata	73,494	69,438	4,056	6,31%	
2 GCP (Merata)	HD313	84,34	74,842	9,498	12,69%	6,83%
	HD287	75,19	73,344	1,846	2,52%	
	HD328	76,1	67,021	9,079	13,55%	
	HD389	63,31	70,814	-7,504	-10,60%	

Jumlah GCP	Hauler	Volume Fotogramteri (M ³)	Volume RTK (M ³)	Selisih	Persen Selisih	Rerata Selisih
2 GCP (Tidak Merata)	HD287B	70,96	61,169	9,791	16,01%	316,70%
	Rata-rata	73,98	69,438	4,542	6,83%	
	HD313	73,22	74,842	-1,622	-2,17%	
	HD287	215,25	73,344	141,906	193,48%	
	HD328	198,66	67,021	131,639	196,41%	
	HD389	461,15	70,814	390,336	551,21%	
	HD287B	455,44	61,169	394,271	644,56%	
	Rata-rata	280,744	69,438	211,306	316,70%	
	HD313	566,14	74,842	491,298	656,45%	
	HD287	879,91	73,344	806,566	1099,70%	
1 GCP	HD328	1394,33	67,021	1327,31	1980,44%	2006,46%
	HD389	1847,61	70,814	1776,8	2509,10%	
	HD287B	2377,4	61,169	2316,23	3786,61%	
	Rata-rata	1413,078	69,438	1343,64	2006,46%	
	HD313	6407,78	74,842	6332,94	8461,74%	
0 GCP	HD287	6269,25	73,344	6195,91	8447,73%	8871,45%
	HD328	6021,8	67,021	5954,78	8884,95%	
	HD389	6162,85	70,814	6092,04	8602,87%	
	HD287B	6153,57	61,169	6092,4	9959,95%	
	Rata-rata	6203,05	69,438	6133,61	8871,45%	

Perbedaan volume yang ditampilkan pada Tabel 7 menunjukkan bahwa konfigurasi 6 GCP menghasilkan selisih volume rata-rata yang relatif rendah sebesar 3,76%. Sebaliknya, pada kondisi tanpa GCP selisih volume meningkat sangat besar hingga lebih dari 6.100 m³ atau sekitar 8.871%. Perbedaan tersebut disebabkan oleh distorsi elevasi pada model DTM, di mana penggunaan GCP dalam jumlah terbatas menyebabkan permukaan menjadi kurang akurat dan cenderung mengambang, sehingga perhitungan volume mengalami overestimasi.

4.6. Pengaruh Jumlah GCP terhadap Akurasi

Pengaruh jumlah dan distribusi *Ground Control Point* (GCP) terhadap akurasi geometrik dan selisih volume pemodelan fotogrametri ditunjukkan pada Tabel 8, yang memuat nilai CE90, LE90, selisih volume, serta persentase selisih terhadap pengukuran GNSS RTK. Perhitungan menunjukkan bahwa variasi jumlah GCP mempengaruhi ketelitian geometrik dan besarnya selisih volume yang dihasilkan.

Tabel 8. Akurasi Geometrik dan Selisih Volume pada Variasi Jumlah GCP

Jumlah GCP	CE90	LE90	Hauler	Volume Fotogramteri (M³)	Volume RTK (M³)	Selisih	Persen Selisih	Rerata Selisih
6 GCP	0,0344	0,0510	HD313	75,15	74,842	0,308	0,41%	3,76%
			HD287	71,68	73,344	-1,664	-2,27%	
			HD328	67,17	67,021	0,149	0,22%	
			HD389	71,26	70,814	0,446	0,63%	
			HD287B	73,27	61,169	12,101	19,78%	
	Rata-rata			71,706	69,438	2,268	3,76%	
5 GCP	0,0348	0,0632	HD313	75,51	74,842	0,668	0,89%	4,70%
			HD287	72,25	73,344	-1,094	-1,49%	
			HD328	67,71	67,021	0,689	1,03%	

Jumlah GCP	CE90	LE90	Hauler	Volume Fotogramteri (M ³)	Volume RTK (M ³)	Selisih	Persen Selisih	Rerata Selisih
4 GCP	0,0352	0,0900	HD389	72,18	70,814	1,366	1,93%	6,31%
			HD287B	74,1	61,169	12,931	21,14%	
			Rata-rata	72,35	69,438	2,912	4,70%	
			HD313	76,52	74,842	1,678	2,24%	
			HD287	74,03	73,344	0,686	0,94%	
			HD328	69,23	67,021	2,209	3,30%	
			HD389	73,6	70,814	2,786	3,93%	
			HD287B	74,09	61,169	12,921	21,12%	
			Rata-rata	73,494	69,438	4,056	6,31%	
			HD313	84,34	74,842	9,498	12,69%	
			HD287	75,19	73,344	1,846	2,52%	
			HD328	76,1	67,021	9,079	13,55%	
2 GCP (Merata)	0,0438	0,2397	HD389	63,31	70,814	-7,504	-10,60%	6,83%
			HD287B	70,96	61,169	9,791	16,01%	
			Rata-rata	73,98	69,438	4,542	6,83%	
			HD313	73,22	74,842	-1,622	-2,17%	
			HD287	215,25	73,344	141,906	193,48%	
			HD328	198,66	67,021	131,639	196,41%	
2 GCP (Tidak Merata)	0,6050	5,7324	HD389	461,15	70,814	390,336	551,21%	316,70%
			HD287B	455,44	61,169	394,271	644,56%	
			Rata-rata	280,744	69,438	211,306	316,70%	
			HD313	566,14	74,842	491,298	656,45%	
			HD287	879,91	73,344	806,566	1099,70%	
			HD328	1394,33	67,021	1327,31	1980,44%	
1 GCP	52,6719	64,3591	HD389	1847,61	70,814	1776,8	2509,10%	2006,46%
			HD287B	2377,4	61,169	2316,23	3786,61%	
			Rata-rata	1413,078	69,438	1343,64	2006,46%	
			HD313	6407,78	74,842	6332,94	8461,74%	
			HD287	6269,25	73,344	6195,91	8447,73%	
			HD328	6021,8	67,021	5954,78	8884,95%	
0 GCP	6,1055	128,291	HD389	6162,85	70,814	6092,04	8602,87%	8871,45%
			HD287B	6153,57	61,169	6092,4	9959,95%	
			Rata-rata	6203,05	69,438	6133,61	8871,45%	

Berdasarkan Tabel 8, konfigurasi 6 GCP menghasilkan akurasi terbaik dengan selisih volume rata-rata sebesar 3,76%, nilai CE90 sebesar 0,0344 meter, dan LE90 sebesar 0,0510 meter. Pada konfigurasi 5 dan 4 GCP, akurasi menurun yang ditunjukkan oleh peningkatan selisih volume menjadi 4,70% dan 6,31%, serta kenaikan nilai CE90 dan LE90. Kondisi dengan 2 GCP menunjukkan penurunan akurasi yang lebih besar, terutama pada distribusi tidak merata, akibat distorsi geometri yang mempengaruhi hasil perhitungan volume. Pada konfigurasi 1 GCP, nilai CE90 dan LE90 meningkat drastis hingga puluhan meter sehingga model tidak lagi merepresentasikan kondisi lapangan secara memadai. Sementara itu, konfigurasi tanpa GCP menghasilkan nilai CE90 sebesar 6,1055 meter yang lebih rendah dibandingkan 1 GCP karena pemodelan sepenuhnya mengandalkan sistem navigasi UAV yang konsisten secara internal meskipun tidak akurat terhadap referensi lapangan. Jumlah GCP yang memadai dan tersebar merata berperan penting dalam mengurangi distorsi spasial, sedangkan

penggunaan GCP yang terlalu sedikit atau tidak representatif justru dapat menurunkan kualitas model lebih drastis dibandingkan pemodelan tanpa GCP.

5. Pembahasan

5.1. Evaluasi Pengaruh Jumlah GCP Terhadap Akurasi

Evaluasi menunjukkan bahwa variasi jumlah dan distribusi GCP menghasilkan pola perubahan akurasi geometrik dan selisih volume yang tidak linier. Penggunaan jumlah GCP yang memadai cenderung menghasilkan model dengan ketelitian horizontal dan vertikal yang lebih baik serta selisih volume yang lebih kecil. Sebaliknya, pengurangan jumlah GCP menyebabkan peningkatan distorsi geometri yang berdampak langsung pada overestimasi volume.

Kondisi dengan jumlah GCP yang sangat terbatas, khususnya 1 GCP, menunjukkan penurunan kualitas model yang paling ekstrem akibat koreksi geometri yang hanya bersifat lokal. Sementara itu, pemodelan tanpa GCP menunjukkan kesalahan geometrik yang lebih stabil dibandingkan 1 GCP, meskipun tetap tidak akurat terhadap referensi lapangan. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan GCP yang terlalu sedikit atau tidak representatif justru dapat menurunkan kualitas model lebih besar dibandingkan pemodelan tanpa GCP. Oleh karena itu, jumlah GCP yang cukup dan terdistribusi merata menjadi faktor kunci dalam menjaga kestabilan geometri, ketelitian spasial, dan keandalan hasil perhitungan volume fotogrametri.

5.2. Penentuan Jumlah GCP Optimal untuk Pengukuran Volume

Evaluasi terhadap variasi jumlah dan distribusi GCP menunjukkan bahwa konfigurasi 6 GCP menghasilkan selisih volume rata-rata terendah sebesar 3,76%, sedangkan 4 GCP juga memberikan akurasi yang baik dan memenuhi acuan Badan Informasi Geospasial (BIG, 2021). Penambahan jumlah GCP umumnya meningkatkan akurasi geometrik, namun dapat berdampak pada waktu pengambilan dan pemrosesan data yang lebih lama. Dengan mempertimbangkan bahwa perusahaan belum memiliki standar toleransi khusus untuk selisih volume pada pengukuran fotogrametri, maka mengacu pada BIG (2021), penggunaan minimal 4 GCP dengan distribusi yang merata diseluruh area dapat dipertimbangkan sebagai pilihan yang efisien sekaligus akurat, karena mampu menghasilkan model DTM dan estimasi volume yang andal dengan waktu, peralatan, dan sumber daya yang lebih hemat.

6. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah dan distribusi *Ground Control Point* (GCP) sangat berpengaruh terhadap akurasi pengukuran volume material *overburden* menggunakan metode fotogrametri. Penggunaan minimal 4 GCP dengan distribusi merata direkomendasikan karena mampu menghasilkan akurasi volume yang baik dan memenuhi standar Badan Informasi Geospasial (BIG, 2021), sedangkan penambahan jumlah GCP hingga 6 titik semakin meningkatkan ketelitian dengan nilai CE90 0,0344 meter, LE90 0,0510 meter, dan selisih volume 3,76%. Sebaliknya, konfigurasi tanpa GCP menghasilkan kesalahan sangat besar dengan selisih volume mencapai 8.571,45%, sehingga membuktikan bahwa GCP tetap diperlukan sebagai acuan geospasial untuk memperoleh hasil pengukuran volume yang akurat.

7. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam, Tbk., para dosen, teman-teman, keluarga, serta semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyusunan penelitian ini.

8. Daftar Pustaka

- Abidin, D. H. Z. (2007). Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Assidiqi, A., Rosalinda, R., & Wiratama, J. (2022). Optimalisasi Produktivitas Alat Gali Muat dan Angkut pada Kegiatan Pengupasan Overburden untuk Mencapai Target Produksi. Jurnal GEOSAPTA, 8(2), 165. <https://doi.org/10.20527/jg.v8i2.13028>.
- Badan Informasi Geospasial. (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014. Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar, 1–17. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/269446/perka-big-no-15-tahun-2014>.
- Badan Informasi Geospasial. (2018). Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 Tentang Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Badan Informasi Geospasial.

- Badan Informasi Geospasial. (2021). Peraturan Badan Informasi Geospasial Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2021 Tentang Tata Cara Penyelenggaraan Informasi Geospasial. In Badan Informasi Geospasial.
- Iskandar, A. P. (2016). Perhitungan Volume Uji Petik Material Overburden Menggunakan Software Minescape Di PT. Alam Karya Gemilang.
- Li, J., Li, E., Chen, Y., Xu, L., & Zhang, Y. (2010). Bundled depth-map merging for multi-view stereo. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, March 2014, 2769–2776. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5540004>.
- Mahdiyyah, S. A. (2016). Perhitungan Volume Uji Petik Overburden Menggunakan Aplikasi SURPAC di PT Antareja Mahada Makmur.
- Prayogo, I. putu H., Manoppo, F. J., & Lefrandt, L. I. R. (2020). Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter Dalam Pemetaan Digital (Fotogrametri) Menggunakan Kerangka Ground Control Point (GCP). Jurnal Ilmiah Media Engineering, 10(1). <https://doi.org/10.3846/987-s>.
- Tenriajeng, A. T. (2003). Pemindahan Tanah Mekanis. Jakarta: Gunadarman.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, Effective Tool for Geoscience Applications. Geomorphology. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). Elements of Photogrammetry, with Application in GIS, McGraw Hill. In Boston, MA. McGraw-Hill Education.