Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21884 - 21892
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

Analisis Akurasi dan Presisi Perhitungan Volume Stockpile Batubara : Studi Komparasi Metode Fotogrametri UAV dan Total Station

Huda Kurniawan*, Sumarno

Program Studi Teknik Geodesi, Institusi Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
***Koresponden email**: huda.kurniawan@mhs.itenas.ac.id

Diterima: 31 Agustus 2026 Disetujui: 12 September 2026

Abstract
Accurate, consistent, and efficient coal stockpile volume measurement is essential for mining inventory management. This study analyzes the accuracy and precision of photogrammetric Unmanned Aerial Vehicle (UAV) data acquired using a DJI Matrice 4E and compares the results with a Sokkia FX200 Total Station as the company's operational benchmark. Measurements were conducted five times on the same stockpile under stable conditions without material addition or removal. UAV images were acquired using Ground Control Points (GCPs) and processed with Agisoft Metashape and MineScape 5.7 to generate surface models and calculate cut-and-fill volumes. Accuracy was evaluated using volume differences and Root Mean Square Error (RMSE), while precision was assessed using standard deviation and coefficient of variation (CV). The results showed average volumes of 30,769.99 m³ for the Total Station and 31,106.26 m³ for the UAV, with an average difference of 336.27 m³ (1.093%) and an RMSE of 343.45 m³. The UAV CV was 0.124%, lower than the Total Station CV of 0.185%, indicating better repeatability. The paired t-test produced a t-calculated value of 9.631, greater than the t-table value of 2.776, indicating a statistically significant difference. Nevertheless, UAV photogrammetry shows potential as an efficient alternative for stockpile volume measurement.
Keywords: *UAV photogrammetry; coal stockpile; Total Station; accuracy; precision*

Abstrak
Perhitungan volume *stockpile* batubara yang akurat, konsisten, dan efisien diperlukan untuk mendukung kegiatan inventarisasi dan *stock opname* pertambangan. Penelitian ini bertujuan menganalisis akurasi dan presisi metode fotogrametri *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) DJI Matrice 4E dengan membandingkannya terhadap Total Station Sokkia FX200 sebagai *benchmark* operasional perusahaan. Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali pada satu objek *stockpile* yang dijaga tetap tanpa aktivitas penambahan maupun pengurangan material. Data UAV diperoleh melalui pemotretan udara dengan dukungan *Ground Control Point* (GCP), kemudian diolah menggunakan Agisoft Metashape dan MineScape 5.7 untuk menghasilkan model permukaan dan volume *cut and fill*. Akurasi dianalisis menggunakan selisih volume dan *Root Mean Square Error* (RMSE), sedangkan presisi dievaluasi melalui standar deviasi dan koefisien variasi (CV). Hasil penelitian menunjukkan rata-rata volume Total Station sebesar 30.769,99 m³ dan UAV sebesar 31.106,26 m³, dengan selisih rata-rata 336,27 m³ atau 1,093% dan RMSE sebesar 343,45 m³. Nilai CV UAV sebesar 0,124% lebih kecil dibandingkan Total Station sebesar 0,185%, menunjukkan repeatability UAV lebih baik. Uji t berpasangan menghasilkan t_{hitung}9,631 > t_{tabel}2,776, sehingga terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik. Meskipun demikian, UAV tetap berpotensi sebagai metode alternatif pengukuran *stockpile* yang lebih efisien.
Kata kunci: *uav fotogrametri; stockpile batubara; total station; akurasi; presisi*

1. Pendahuluan

Stockpile batubara merupakan bagian penting dalam rantai operasi pertambangan karena berfungsi sebagai penyangga antara produksi, pengolahan, dan pengiriman. Informasi kuantitas material pada stockpile diperlukan untuk pengendalian inventori, perencanaan pengiriman, dan evaluasi perubahan stok. Dalam praktik survei, volume material dapat dihitung dari data koordinat tiga dimensi yang dimodelkan menjadi permukaan digital, baik menggunakan pengukuran terestris maupun teknik fotogrametri UAV.

Dalam beberapa penelitian, Total Station bekerja dengan prinsip pengukuran sudut dan jarak secara elektronik serta sangat cocok digunakan dalam pengukuran detail dengan presisi tinggi [1]. Namun, metode ini memiliki kelemahan, yaitu waktu pengerjaan yang cukup lama dan risiko keselamatan surveyor yang tinggi saat harus menaiki tumpukan material yang labil. Selain itu, kerapatan titik yang diambil terbatas (sampling), sehingga bentuk permukaan *stockpile* seringkali tidak terwakili secara sempurna. Kajian mutakhir menunjukkan bahwa fotogrametri UAV telah berkembang sebagai alternatif pengukuran volumetrik karena mampu memperoleh data spasial berkerapatan tinggi dengan waktu akuisisi yang relatif singkat [2], [13], [14].

Keandalan model UAV tidak hanya ditentukan oleh kamera dan wahana, tetapi juga oleh georeferensi, distribusi Ground Control Point (GCP), tinggi terbang, tumpang tindih citra, serta kondisi tekstur objek. Beberapa studi menunjukkan bahwa distribusi dan jumlah GCP berpengaruh terhadap ketelitian geometri, sedangkan objek dengan tekstur homogen seperti batubara dapat meningkatkan tantangan pencocokan citra. Penelitian terbaru pada stockpile batubara juga memperlihatkan bahwa perubahan jumlah GCP dan tinggi terbang dapat mengubah deviasi volume secara material [3], [15].

Penelitian ini mengambil studi kasus pada satu stockpile batubara PT Indo Perkasa di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Kontribusi utama penelitian adalah menguji tiga aspek secara terpadu, yaitu (1) kedekatan volume UAV terhadap Total Station sebagai benchmark operasional perusahaan, (2) repeatability kedua metode melalui lima pengukuran pada kondisi stockpile yang sama, dan (3) signifikansi perbedaan rata-rata volume menggunakan paired-sample t-test. Pendekatan ini diharapkan memberi dasar yang lebih kuat untuk menentukan posisi UAV sebagai metode alternatif, bukan semata-mata sebagai teknologi yang lebih cepat.

Tujuan penelitian adalah menganalisis akurasi volume UAV menggunakan RMSE dan selisih relatif terhadap Total Station, mengevaluasi presisi berdasarkan standar deviasi dan koefisien variasi dari lima pengukuran, serta menguji apakah perbedaan kedua metode signifikan secara statistik. Hipotesis nol (H0) menyatakan tidak terdapat perbedaan rata-rata volume yang signifikan antara kedua metode, sedangkan hipotesis alternatif (H1) menyatakan terdapat perbedaan rata-rata volume yang signifikan.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada area stockpile batubara PT Indo Perkasa, Desa Bakungan, Kecamatan Loa Janan, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Koordinat lokasi yang dicatat pada penelitian adalah sekitar 117°02'03.5278" BT dan 0°36'01.7567" LS (Lihat **Gambar 1**).



Gambar 1. Objek Stockpile Batubara

Pengambilan data utama dilakukan pada 1 Februari 2026 dalam satu hari, sedangkan keseluruhan penelitian berlangsung Januari–Maret 2026. Objek dipilih pada kondisi statis, tanpa aktivitas dumping maupun loading selama rangkaian pengukuran lima kali. Desain tersebut dimaksudkan untuk mengurangi pengaruh perubahan fisik material terhadap perbedaan volume yang diamati.

Spesifikasi kamera DJI Matrice 4E yang digunakan dalam penelitian konsisten dengan spesifikasi pabrikan, yaitu kamera wide 4/3-inch CMOS dengan 20 MP dan panjang fokus ekuivalen 24 mm, seperti

pada **Tabel 1**. Spesifikasi tersebut mendukung akuisisi citra beresolusi tinggi untuk pemodelan fotogrametri jarak dekat (DJI, 2026).

Tabel 1. Spesifikasi dan Parameter Alat Ukur

Komponen	Spesifikasi/Parameter
Total Station	Sokkia FX200; ketelitian sudut 1"; pengukuran jarak berbasis prisma
UAV	DJI Matrice 4E; kamera wide 4/3 CMOS 20 MP; equivalent focal length 24 mm
Tinggi terbang	60 m
GSD	±1.62 cm/pixel
Front overlap	80%
Side overlap	70%
Kecepatan terbang	3 m/s
Sistem koordinat	WGS84/UTM Zone 50S
GCP	9 target premark pada area studi
Perangkat lunak	Agisoft Metashape Professional; MineScape 5.7; ArcGIS Pro

2.1 Akuisisi Data Total Station

Total Station didirikan pada BM22 dan diorientasikan terhadap titik backsight BM20. Sebelum pengukuran, dilakukan centering dan leveling instrumen serta pengecekan backsight. Hasil pengecekan pada dokumen penelitian menunjukkan kesalahan sudut horizontal 0 detik, perbedaan jarak horizontal 6 mm pada jarak sekitar 25 m, penyimpangan koordinat dNorth 5 mm dan dEast 2 mm, serta beda tinggi 2 mm. Titik detail kemudian diambil pada kaki, lereng, puncak, dan bagian lain yang merepresentasikan bentuk permukaan stockpile. Prosedur yang sama diterapkan pada lima pengukuran.

2.2 Akuisisi Data Fotogrametri UAV

Lima GCP dipasang menyebar pada area studi menggunakan premark berukuran sekitar 1 m × 1 m. Koordinat GCP diukur dengan Total Station menggunakan pengamatan seri rangkap (set collection), kemudian diimpor ke Agisoft Metashape sebagai referensi geospasial. Distribusi GCP yang baik penting karena ketelitian model dipengaruhi jumlah dan persebaran titik kontrol.

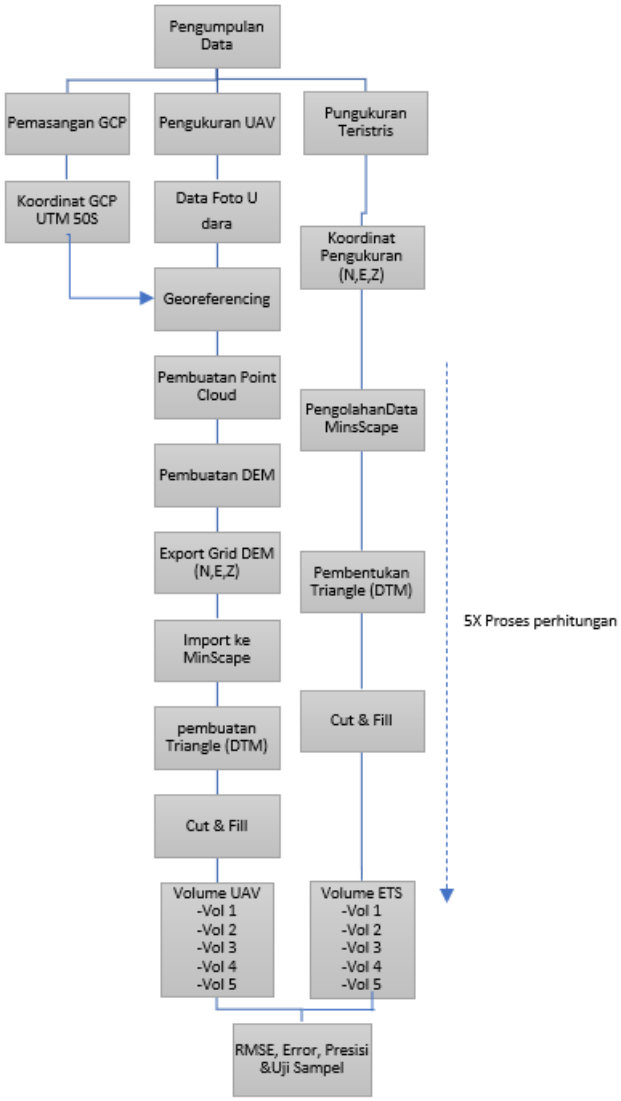
Penerbangan dilakukan menggunakan jalur paralel otomatis dengan tinggi 60 m, front overlap 80%, side overlap 70%, kecepatan sekitar 3 m/s, serta pengambilan citra nadir dan tambahan oblique pada area lereng melalui fitur optimasi elevasi. Setiap penerbangan dilakukan bersamaan dengan satu sesi pengukuran Total Station sehingga kedua metode membentuk lima pasangan pengamatan.

2.3 Pengolahan Fotogrametri dan Perhitungan Volume

Citra UAV diproses pada Agisoft Metashape melalui pembuatan project, import foto, penetapan sistem koordinat, align photos, import dan digitasi GCP, optimize camera alignment, pembentukan dense cloud, DEM, dan orthomosaic. Data DEM diekspor ke format XYZ kemudian diimpor ke MineScape 5.7. Data Total Station dipindahkan ke komputer, disusun dalam format string XYZ, kemudian diolah dengan alur yang sama pada MineScape agar permukaan atas dan batas perhitungan menggunakan basis yang konsisten [4].

Perhitungan volume dilakukan menggunakan metode cut and fill dengan tiga komponen utama, yaitu top surface hasil pengukuran, bottom surface berupa bedding/base stockpile yang digunakan perusahaan, dan polygon batas hitungan. Konsistensi bottom surface dan polygon sangat penting agar perbedaan volume lebih merepresentasikan perbedaan metode akuisisi daripada perbedaan definisi area atau bidang dasar. Pendekatan berbasis permukaan juga lazim digunakan dalam penelitian volume stockpile UAV [5].

Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21884 - 21892
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934



Gambar 2. Alur komparasi pengukuran Total Station dan fotogrametri UAV

2.4 Analisis Akurasi, Presisi, dan Signifikansi

Akurasi volume dinilai terhadap Total Station sebagai benchmark operasional perusahaan, bukan sebagai nilai benar absolut. Dua ukuran digunakan. Pertama, selisih tiap pasangan volume $\Delta V = \bar{X}_{UAV} - \bar{X}_{TS}$.

Kedua, RMSE volume dihitung sebagai

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_{ts} - V_{uav})^2}{2}}$$

Persentase selisih rata-rata dihitung dari rata-rata volume UAV dikurangi rata-rata volume Total Station, dibagi rata-rata volume Total Station, kemudian dikalikan 100%. Presisi atau repeatability dinilai dari standar deviasi sampel

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\chi_i - \bar{\chi})^2}{n-1}}$$

dan koefisien variasi

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \times 100\%$$

Definisi metrologi menyatakan bahwa precision adalah kedekatan kesepakatan hasil pengukuran berulang pada kondisi yang ditetapkan, dan dapat dinyatakan dengan standar deviasi, varians, atau koefisien variasi. Dengan demikian, CV digunakan untuk membandingkan konsistensi relatif dua metode yang memiliki skala volume berbeda. Signifikansi perbedaan diuji dengan paired-sample t-test karena setiap pengukuran UAV dipasangkan dengan pengukuran Total Station pada objek dan waktu yang sama. Statistik uji dihitung dari rata-rata selisih dibagi standard error selisih. Uji dua arah digunakan pada tingkat signifikansi $\alpha = 0.05$ dan derajat kebebasan $n-1$. Keputusan pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai t-hitung dengan t-tabel serta mempertimbangkan arah dan besar selisih volume.

3. Hasil dan Pembahasan

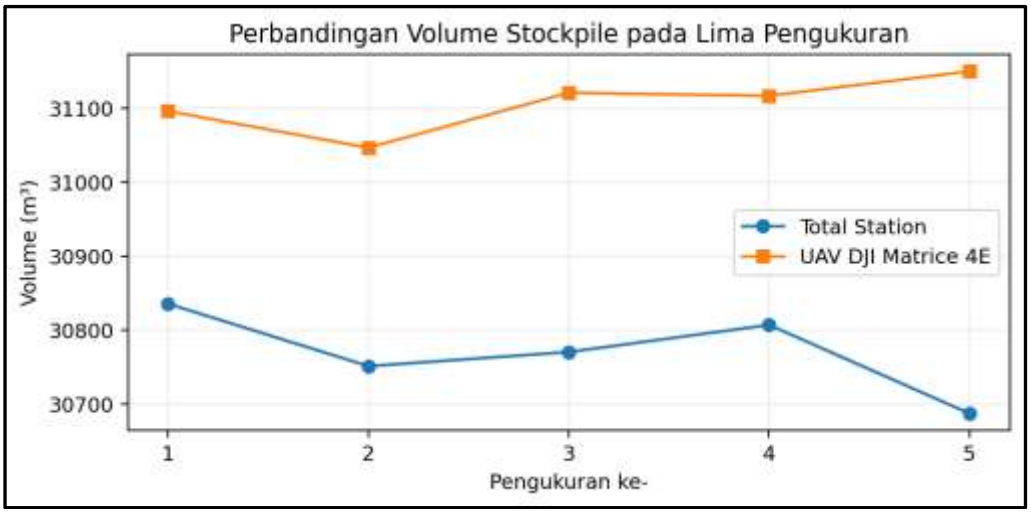
3.1 Hasil Pengukuran Volume

Dibawah ini nilai hasil pengukuran dan perhitungan volume hasil UAV dan Total station.

Tabel 2. Perbandingan volume stockpile hasil lima pengukuran berpasangan

No.	Total Station (m³)	UAV (m³)	Selisih (m³)	Selisih (%)
1	30,835.389	31,096.172	260.783	0.846
2	30,750.938	31,046.709	295.771	0.962
3	30,770.078	31,121.195	351.117	1.141
4	30,806.713	31,117.043	310.330	1.007
5	30,686.840	31,150.203	463.363	1.510
Rerata	30,769.992	31,106.264	336.273	1.093

Lima pasangan pengukuran menunjukkan bahwa volume UAV selalu lebih besar daripada Total Station. Nilai Total Station berkisar 30,686.84–30,835.39 m³, sedangkan UAV berkisar 31,046.71–31,150.20 m³. Rata-rata volume Total Station adalah 30,769.99 m³ dan UAV 31,106.26 m³, sehingga rata-rata selisih mencapai 336.27 m³ atau 1.093% terhadap Total Station. Selisih terbesar terjadi pada pengukuran kelima (463.36 m³; 1.510%), sedangkan yang terkecil pada pengukuran pertama (260.78 m³; 0.846%).



Gambar 3. Perbandingan volume stockpile hasil Total Station dan UAV

Pola pada **Gambar 3** memperlihatkan adanya offset sistematis: kurva UAV berada di atas kurva Total Station pada seluruh pengulangan. Karena kondisi stockpile dipertahankan statis, konsistensi arah selisih ini lebih mudah ditafsirkan sebagai perbedaan sistematis antar metode dan bukan perubahan stok. Namun, penyebab spesifik tidak dapat dipisahkan hanya dari data volume. Potensi kontributor meliputi perbedaan kerapatan titik, representasi area lereng dan puncak, kualitas pencocokan citra, georeferensi, distribusi GCP, serta karakteristik homogen permukaan batubara. Perbedaan tersebut dapat berkaitan dengan karakteristik akuisisi dan pemodelan permukaan pada masing-masing metode [6]. Secara praktis, selisih rata-rata 1.093% menunjukkan bahwa UAV menghasilkan estimasi yang dekat dengan benchmark perusahaan. Nilai tersebut diposisikan sebagai hasil studi kasus dan tidak digeneralisasi sebagai ambang universal.

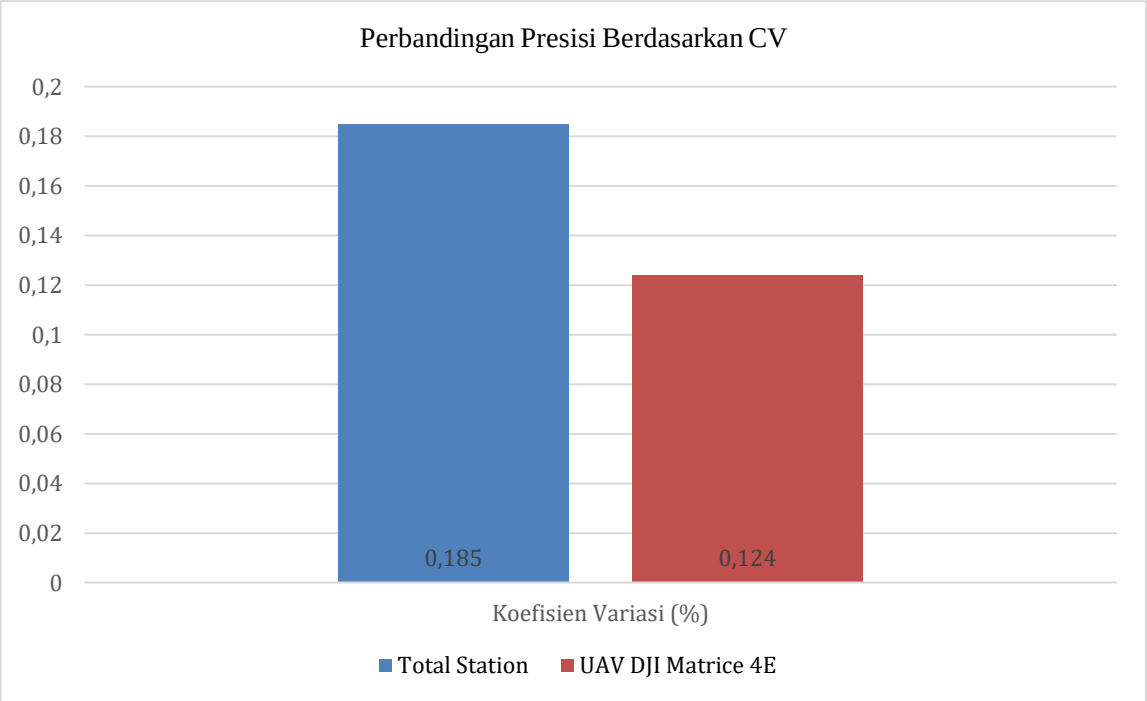
Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21884 - 21892
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

3.2 Analisis Presisi dan Repeatability

Standar deviasi Total Station sebesar 56.79 m³, sedangkan UAV sebesar 38.47 m³. Koefisien variasi masing-masing 0.185% dan 0.124%. Dengan ukuran relatif tersebut, penyebaran hasil UAV lebih kecil daripada Total Station. Rentang hasil UAV juga lebih kecil, yaitu 103.49 m³, dibandingkan rentang Total Station sebesar 148.55 m³. Berdasarkan definisi precision sebagai kedekatan hasil pengukuran berulang, hasil ini menunjukkan repeatability UAV yang lebih baik pada kondisi pengujian yang digunakan.

Tabel 3. Statistik presisi pengukuran berulang

Parameter	Total Station	UAV DJI Matrice 4E
Rata-rata volume (m³)	30,769.99	31,106.26
Standar deviasi (m³)	56.79	38.47
Koefisien variasi (%)	0.185	0.124
Rentang volume (m³)	148.55	103.49



Gambar 4. Perbandingan koefisien variasi sebagai ukuran presisi relatif

Temuan ini perlu dibaca terpisah dari akurasi. CV yang lebih kecil hanya menunjukkan bahwa hasil pengukuran UAV lebih konsisten satu sama lain; CV tidak membuktikan bahwa nilai UAV lebih dekat dengan benchmark. Hal ini terlihat jelas pada penelitian ini: UAV mempunyai CV 0.124%, tetapi rata-ratanya tetap lebih tinggi 336.27 m³ daripada Total Station. Pembedaan antara precision dan accuracy penting agar konsistensi internal tidak disamakan dengan kesetaraan terhadap nilai referensi.

Dari perspektif operasional, hasil repeatability ini cukup relevan untuk kegiatan monitoring berkala. Bila kondisi akuisisi relatif dapat dikendalikan, kestabilan hasil UAV dapat memudahkan identifikasi perubahan stok dari waktu ke waktu. Namun, penggunaan UAV untuk keputusan kuantitas tetap memerlukan kontrol geometri yang baik dan prosedur terbang yang konsisten, karena perubahan tinggi terbang dan jumlah GCP dapat memengaruhi deviasi volume [7].

3.3 Analisis Akurasi Volume menggunakan RMSE

Berdasarkan lima pasangan data, residual volume ΔV adalah 260.783, 295.771, 351.117, 310.330, 463.363 m³. RMSE volume yang dihitung langsung dari lima residual tersebut adalah 343.45 m³. Nilai mean absolute error (MAE) sebesar 336.27 m³. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh titik evaluasi menghasilkan residual bernilai positif. Kondisi ini menyebabkan nilai RMSE dan MAE yang diperoleh tidak hanya menunjukkan besaran galat (error) secara umum, tetapi merepresentasikan adanya kesalahan sistematis atau bias satu arah dari hasil UAV terhadap titik *benchmark [8]*.

RMSE pada penelitian ini dipakai sebagai indikator ukuran kesalahan agregat terhadap benchmark volume. Nilainya tidak seharusnya dibandingkan langsung dengan standar ketelitian koordinat seperti CE90 atau LE90, karena RMSE yang dihitung di sini mempunyai satuan volume (m^3) [9].

3.4 Uji Signifikansi Perbedaan Volume

Uji paired-sample t-test menghasilkan t-hitung sebesar 9.631 dengan derajat kebebasan (df) 4. Pada taraf signifikansi 5% untuk pengujian dua arah, nilai t-tabel sebesar 2.776. Karena t-hitung > t-tabel (9.631 > 2.776), H_0 ditolak. Artinya, pada kondisi eksperimen ini terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara rata-rata volume UAV dan Total Station.

Tabel 4. Hasil paired-sample t-test antara Total Station dan UAV

Statistik	Nilai
Rata-rata selisih UAV − TS (m^3)	336.273
SD selisih (m^3)	78.078
t hitung	9.631
df	4
t-tabel	2.776

Hasil ini merupakan bagian penting dari validasi metode. Sebuah metode dapat memiliki selisih relatif kecil dan repeatability yang baik, tetapi tetap menunjukkan perbedaan rata-rata yang signifikan ketika seluruh pasangan data konsisten mengarah pada bias yang sama. Dengan demikian, kesimpulan penelitian tidak tepat apabila hanya didasarkan pada pernyataan bahwa selisih 1.093% 'kecil'. Secara statistik, terdapat bias sistematis yang perlu dipertimbangkan ketika volume UAV digunakan untuk menggantikan angka Total Station dalam pelaporan yang membutuhkan kesetaraan metode.

Di sisi lain, signifikansi statistik tidak otomatis berarti metode UAV tidak layak dipakai. Signifikansi adalah bukti bahwa kedua set nilai tidak identik dalam rerata, sedangkan kelayakan operasional bergantung pada tujuan penggunaan, ukuran bias, repeatability, waktu akuisisi, biaya, dan risiko keselamatan. Dalam penelitian ini, penerbangan UAV hanya memerlukan sekitar 9 menit per sesi, sedangkan satu pengukuran Total Station membutuhkan rata-rata sekitar 54 menit. Perbedaan waktu ini memberikan keuntungan operasional yang nyata bagi UAV, terutama pada monitoring rutin dan area yang sulit dijangkau secara aman.

Tabel 5. Ringkasan waktu akuisisi lapangan

Metode	Durasi per sesi	Pengulangan	Catatan operasional
Total Station	42–65 menit; rata-rata ±54 menit	5	Memerlukan surveyor dan crew; titik detail diambil pada permukaan stockpile
UAV	±8 menit 59 detik	5	Akuisisi jarak jauh; tidak memerlukan surveyor menaiki stockpile untuk pengambilan citra

3.5 Efisiensi Operasional dan Implikasi K3

Pada lima sesi pengukuran, waktu akuisisi UAV sekitar sembilan menit per penerbangan, sedangkan pengukuran Total Station berkisar 42–65 menit per sesi. Hasil ini menunjukkan bahwa UAV memerlukan waktu akuisisi lapangan yang lebih singkat pada kondisi penelitian ini. Keuntungan tersebut juga berkaitan dengan K3. Survei Total Station pada stockpile dapat mengharuskan personel bekerja dekat lereng material yang labil, area operasional alat berat, dan permukaan yang berpotensi tidak stabil.

UAV memungkinkan data permukaan diperoleh tanpa kontak fisik langsung dengan seluruh area stockpile. Meski demikian, operasi UAV tetap memerlukan pengendalian risiko penerbangan, zona aman, kondisi cuaca, dan kepatuhan terhadap prosedur operasi perusahaan. Karena itu, keuntungan K3 tidak berarti risiko UAV nol; yang berkurang terutama adalah kebutuhan akses personel ke permukaan stockpile.

3.6 Pembahasan terhadap State of the Art dan Kebaruan

Penelitian yang lebih baru juga memperlihatkan pentingnya konfigurasi GCP dan tinggi terbang. Penelitian terdahulu dalam TA ini juga menunjukkan bahwa UAV dapat digunakan sebagai alternatif survei, tetapi karakteristik hasil tetap perlu dibandingkan dengan metode terestris. Menekankan keunggulan

UAV dari sisi waktu dan tenaga [10], sedangkan penelitian lain menunjukkan bahwa pendekatan UAV yang dipadukan dengan metode terestris atau GNSS dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi sekaligus mempertahankan kontrol pengukuran [11].

Kebaruan penelitian ini berada pada desain pengujian yang memasangkan lima pengukuran Total Station dan lima penerbangan UAV pada satu objek stockpile yang dijaga statis dalam satu hari. Desain tersebut memungkinkan pemisahan yang lebih baik antara variasi metode dan perubahan objek dibandingkan perbandingan satu kali pengukuran. Selain RMSE dan persentase selisih, penelitian ini secara bersamaan menggunakan CV untuk repeatability dan paired-sample t-test untuk menguji signifikansi bias rata-rata. Kombinasi ketiga lapisan evaluasi tersebut memberikan pembacaan yang lebih lengkap: UAV konsisten, dekat secara volumetrik, tetapi tetap menunjukkan bias sistematis yang signifikan terhadap benchmark.

3.7 Keterbatasan Penelitian

Pertama, Total Station diperlakukan sebagai benchmark karena merupakan standar operasional perusahaan, bukan karena telah dibuktikan sebagai true value absolut. Kedua, pengujian dilakukan pada satu stockpile dan satu hari sehingga hasil tidak langsung digeneralisasi ke material, bentuk, kondisi pencahayaan, atau skala stockpile yang berbeda. Ketiga, pembahasan bias belum dapat mengisolasi kontribusi masing-masing faktor seperti GCP, image matching, interpolasi, dan digitasi batas.

Keterbatasan tersebut justru menjadi arah pengembangan penelitian berikutnya. Pengujian dapat diperluas dengan menambahkan independent check point, beberapa konfigurasi GCP, variasi tinggi terbang, pengukuran di beberapa kondisi stokpile, serta metode pembanding yang lebih independen seperti TLS atau GNSS RTK. Pendekatan tersebut akan memperkuat pemisahan error geometri dari error pemodelan volume [15].

4. Kesimpulan

Penelitian komparatif pada stockpile batubara PT Indo Perkasa menunjukkan bahwa lima pengukuran UAV menghasilkan volume yang konsisten lebih tinggi dibandingkan Total Station. Rata-rata volume Total Station sebesar 30,769.99 m^3 dan UAV sebesar 31,106.26 m^3, dengan selisih rata-rata 336.27 m^3 atau 1.093%. RMSE volume sebesar 343.45 m^3 menunjukkan tingkat kedekatan volumetrik sekitar satu persen terhadap benchmark.

Dari sisi presisi, UAV menunjukkan repeatability lebih baik pada desain pengujian ini. Standar deviasi UAV sebesar 38.47 m^3 dan CV 0.124% lebih kecil daripada Total Station yang masing-masing 56.79 m^3 dan 0.185%. Dengan demikian, hasil UAV lebih konsisten antar pengulangan, meskipun konsistensi tersebut tidak berarti akurasi absolut lebih tinggi.

Uji paired-sample t-test menghasilkan t-hitung sebesar 9.631, sedangkan t-tabel pada taraf signifikansi 5% dan df = 4 adalah 2.776. Karena 9.631 > 2.776, H_0 ditolak sehingga terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan secara statistik. Kesimpulan utama adalah bahwa UAV DJI Matrice 4E pada studi kasus ini belum dapat dinyatakan identik dengan Total Station, tetapi layak dipertimbangkan sebagai metode alternatif untuk monitoring dan stock opname ketika prioritas mencakup kecepatan, efisiensi tenaga, dan pengurangan akses personel ke permukaan stockpile. Untuk penggunaan sebagai pengganti penuh pada pelaporan yang mensyaratkan kesetaraan angka volume, diperlukan kalibrasi bias, pengujian tambahan pada beberapa stockpile, dan validasi geometri independen.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Indo Perkasa atas dukungan data dan akses lapangan, serta kepada seluruh personel survei yang membantu proses pengukuran Total Station dan penerbangan UAV. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak yang mendukung pengolahan dan interpretasi data fotogrametri.

6. Daftar Pustaka

[1] E. B. Ginting, Riyanto Haribowo, and Andre Primantyo H, “Studi Perbandingan Perhitungan Volume Galian dan Timbunan Menggunakan Data Total Station dan Drone (UAV),” *J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 4, no. 1, pp. 616–626, Jan. 2024, doi: 10.21776/ub.jtresda.2024.004.01.052.

[2] A. Alsayed and M. R. A. Nabawy, “Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments: A Review,” *Drones*, vol. 7, no. 8, p. [2], 2023, doi: 10.3390/drones7080537.

[3] Sarwan Budianur *et al.*, "Pemanfaatan Total Station dan GPS Dalam Ilmu Ukur Tanah," *J. Cakrawala Akad.*, vol. 2, no. 3, pp. 784–788, 2025, doi: 10.70182/jca.v2i3.1166.

[4] F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, and P. Martínez-Carricondo, "Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 98, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2016.12.002.

[5] F. Benassi *et al.*, "Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with gnss-supported aerial triangulation," *Remote Sens.*, vol. 9, no. 2, 2017, doi: 10.3390/rs9020172.

[6] L. Khoirriyah, "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.)," *J. Geospatial Sci. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 14–22, 2025, doi: 10.22146/jgst.v4i2.23893.

[7] O. G. Ajayi and J. Ajulo, "Investigating the Applicability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry for the Estimation of the Volume of Stockpiles," *Quaest. Geogr.*, vol. 40, no. 1, pp. 25–38, 2021, doi: 10.2478/quageo-2021-0002.

[8] K. Lee and W. H. Lee, "Earthwork Volume Calculation, 3D Model Generation, and Comparative Evaluation Using Vertical and High-Oblique Images Acquired by Unmanned Aerial Vehicles," *Aerospace*, vol. 9, no. 10, 2022, doi: 10.3390/aerospace9100606.

[9] T. Filkin, N. Sliusar, M. Huber-Humer, M. Ritzkowski, and V. Korotaev, "Estimation of dump and landfill waste volumes using unmanned aerial systems," *Waste Manag.*, vol. 139, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2021.12.029.

[10] E. W. Nota, W. Nijland, and T. de Haas, "Improving UAV-SfM time-series accuracy by co-alignment and contributions of ground control or RTK positioning," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 109, 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102772.

[11] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature," *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, no. 3, 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014.

[12] K. O. Hastaoglu, H. S. Kapicioglu, Y. Gül, and F. Poyraz, "Investigation of the effect of height difference and geometry of GCP on position accuracy of point cloud in UAV photogrammetry," *Surv. Rev.*, vol. 55, no. 391, 2023, doi: 10.1080/00396265.2022.2097998.

[13] H. . M. Maulana R. and Henri K, "Evaluasi Pendekatan Hybrid Dalam Pengukuran Volume Stockpile Batubara Menggunakan UAV, GNSS RTK dan Total Station," *J. Serambi Eng.*, vol. X(4), no. 4, pp. 15653–15659, 2025.

[14] S. Qoyimah, H. S. Firdaus, and M. A. Syariz, "Studi Awal Visualisasi Dan Akurasi Geometri Model 3 Dimensi Pada Textureless-Object," *Elipsoida J. Geod. dan Geomatika*, vol. 7, no. 2, pp. 93–103, 2024, [Online]. Available: https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/elipsoida/article/view/24835

[15] E. Sanz-Ablanedo, J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez, and C. Ordóñez, "Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 10, 2018, doi: 10.3390/rs10101606.