

Evaluasi Ketelitian Perhitungan Volume Uji Petik Overburden Berdasarkan Variasi Tinggi Terbang Pada Foto Udara Menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Syafira Nurhaliza^{1*} Ir. Erlyna Nour Arrofiqoh¹

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

Research Article

DOI:

10.22146/jgst.v4i1.23993

correspondence:

syafira.nurhaliza@mail.ugm.ac.id

Article history:

Received:

21-08-2025

Accepted:

11-11-2025

Published:

31-07-2026

ABSTRACT

Load sampling is the activity of measuring the volume of overburden piles for production monitoring and control. At PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam Tbk, the current method used is GNSS Real Time Kinematic (RTK), which is less time-efficient. Therefore, an alternative method, such as photogrammetry, is considered. One crucial parameter in UAV measurements is flight height, as it affects the quality of aerial imagery and the accuracy of volume calculation. This study aims to compare volume measurements between the UAV method and the GNSS RTK method, and to determine the optimal flight height for load sampling volume measurements. Data were acquired at three flight heights: 30 meters, 40 meters, and 50 meters. Ground Control Points (GCP) and Independent Check Points (ICP) were measured using the RTK method. The aerial images were processed using Agisoft Metashape, and the point clouds were exported to Surpac for volume calculation. A t-test was used to analyze the significance of differences between flight heights and between measurement methods. The resulting volumes were 340.92 m³ at 30 meters (acquisition time: 4 minutes), 340.68 m³ at 40 meters (2 minutes), and 351.83 m³ at 50 meters (1 minute). The volume measured using the GNSS RTK method was 328.26 m³. The differences between UAV and GNSS RTK volumes were 3.79% at 30 meters, 3.66% at 40 meters, and 7.09% at 50 meters. T-test results indicated no significant difference between 30 and 40 meters flight heights. Additionally, only the 40-meter UAV result showed no significant difference when compared to the GNSS RTK method. Based on acquisition time and statistical analysis, a 40-meter flight height is recommended as the optimal altitude for measuring overburden pile volume using UAV photogrammetry.

Keywords: overburden, photogrammetry, unmanned aerial vehicle, volume calculation, t-test

INTISARI

Uji petik merupakan kegiatan pengukuran volume sampel tumpukan *overburden* sebagai monitoring dan kontrol manajemen produksi perusahaan. PT Putra Perkasa Abadi *Jobsite* PT Bukit Asam Tbk melakukan uji petik menggunakan GNSS metode *Real Time Kinematic* (RTK) yang cenderung kurang efisien secara waktu sehingga diperlukan metode alternatif, yaitu fotogrametri. Salah satu parameter yang ditentukan dalam pengukuran adalah tinggi terbang yang akan berpengaruh pada kualitas foto udara dan volume yang dihasilkan. Tujuan penelitian ini untuk membandingkan hasil volume UAV dengan GNSS metode RTK, serta menentukan tinggi terbang optimal dalam pengukuran volume uji petik. Akuisisi data dilakukan dengan tiga variasi tinggi terbang, yaitu 30 meter, 40 meter, dan 50 meter. Pengukuran GCP dan ICP menggunakan metode RTK, hasil foto udara diolah menggunakan Agisoft Metashape, kemudian *point cloud* diekspor ke Surpac untuk dihitung volumenya. Hasil perhitungan volume dianalisis melalui uji t untuk mengetahui signifikansi perbedaan antar tinggi terbang dan kedua metode pengukuran. Hasil perhitungan volume tinggi terbang 30 meter sebesar 340,92 m³ dengan waktu akuisisi data selama 4 menit, tinggi terbang 40 meter sebesar 340,68 m³ dalam waktu 2 menit dan 351,83 m³ untuk tinggi terbang 50 meter dalam waktu 1 menit. Uji t antar variasi tinggi terbang menunjukkan nilai volume antara tinggi 30 dengan 40 meter tidak memiliki perbedaan signifikan. Sementara itu, hasil dari perhitungan volume menggunakan alat GNSS metode RTK sebesar 328,26 m³ sehingga diperoleh selisih volume antara UAV dengan GNSS metode RTK untuk tinggi terbang 30 meter sebesar 3,79%, tinggi terbang 40 meter sebesar 3,66%, dan 7,09% untuk tinggi

terbang 50 meter. Hasil uji t antara UAV dengan GNSS metode RTK menunjukkan volume tinggi terbang 40 meter tidak memiliki perbedaan signifikan dengan GNSS metode RTK. Berdasarkan waktu akuisisi data foto udara dan hasil dari uji statistik t, tinggi terbang optimal yang disarankan untuk pengukuran volume uji petik tumpukan overburden adalah 40 meter.

Kata kunci: *overburden*, fotogrametri, *unmanned aerial vehicle*, perhitungan volume, uji t

1. Pendahuluan

Batu bara merupakan sumber energi dalam pembangkit listrik dan operasional kegiatan industri yang diperoleh dari proses penambangan. Menurut Siahaan (2018), proses produksi penambangan batu bara dimulai dari kegiatan *land clearing* atau pembersihan lahan. Selanjutnya, dilakukan kegiatan pengupasan lapisan tanah penutup atau *overburden*.

Lapisan tanah yang telah dikupas akan dibawa oleh *Heavy Duty* (HD). HD menuju tempat penimbunan yang disebut dengan disposal. Pada truk HD, terdapat timbangan atau *payload* untuk mengukur berat muatan yang dibawa *vessel* HD. Untuk memastikan jumlah *overburden* yang dibawa sesuai dengan target, maka dilakukan uji petik. Uji petik merupakan kegiatan monitoring sebagai kontrol manajemen produksi perusahaan. Hasil dari uji petik adalah perhitungan volume *overburden*, volume ini berperan penting terhadap perhitungan biaya operasional, perencanaan produksi, serta estimasi cadangan batu bara (Aulia dkk., 2023).

PT Putra Perkasa Abadi (PPA) merupakan perusahaan yang menyediakan jasa pertambangan dengan salah satu lokasi kerjanya berada di PT Bukit Asam Tbk. PT Putra Perkasa Abadi *Jobsite* PT Bukit Asam Tbk melakukan pengukuran volume uji petik menggunakan GNSS (*Global Navigation Satellite System*) metode *Real Time Kinematic* (RTK). Metode ini cenderung membutuhkan waktu lama karena dalam menghasilkan nilai volume akurat dibutuhkan detail yang banyak. Hal ini berpengaruh pada *cost efficiency* atau biaya efisiensi. *Cost efficiency* mencakup efisiensi teknis, dimana efisiensi teknis ini mengukur kemampuan dalam menghasilkan output maksimal dari sejumlah input tertentu, termasuk waktu sebagai salah satu input utama (Bradrania dkk., 2017).

Untuk meningkatkan efisiensi operasional, maka diperlukan adanya pembaruan metode pengukuran, yaitu menggunakan fotogrametri. Wahana yang digunakan dalam pengukuran ini adalah *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang dapat melakukan akuisisi data foto udara secara cepat, serta menghasilkan resolusi spasial tinggi dengan biaya terjangkau. Dalam akuisisi data fotogrametri, salah satu perencanaan yang dilakukan adalah penentuan tinggi terbang. Tinggi terbang berpengaruh terhadap resolusi spasial foto udara, waktu akuisisi data di lapangan, jumlah foto yang dihasilkan, serta waktu pengolahan data. Uji variasi tinggi terbang diperlukan untuk menentukan tinggi terbang optimal saat melakukan pengukuran sampel tumpukan *overburden* sehingga dapat memberikan hasil yang sesuai dalam menghasilkan volume yang teliti, serta memerhatikan dari segi efisiensi operasional.

1.1. Overburden

Overburden atau penutup lapisan tanah merupakan lapisan tanah yang menutupi lapisan batu bara dan tidak mengandung mineral berharga (Londong dkk., 2016). *Overburden* harus dipindahkan untuk menambang batu bara yang berada di bawahnya. Menurut Manik dkk. (2022) terdapat enam sifat material *overburden*, yaitu material yang memiliki tekstur sangat lunak, setengah lunak, setengah keras, keras, dan sangat keras.



Gambar 1. Tumpukan *Overburden*.

1.2. Fotogrametri

Fotogrametri adalah bagian dari seni, ilmu, dan teknologi untuk mendapatkan informasi tentang objek dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran, interpretasi gambar fotografi dan pola radiasi kinerja elektromagnetik yang direkam (Wolf dkk., 2014). Fotogrametri bertujuan untuk menghubungkan antara objek dan sebuah citra dalam hubungan geometrik, serta memberikan informasi tentang objek secara detail dan teliti (Pranoto dkk., 2020).

1.3. Ground Control Point (GCP) dan Independent Check Point (ICP)

GCP merupakan titik yang diperlukan untuk mengkoreksi data foto udara yang terdiri dari koordinat X dan Y (Darmawan, 2008 dalam Pardo dkk., 2019). ICP merupakan titik kontrol tanah yang digunakan untuk kontrol kualitas dari objek pada foto udara dengan membandingkan koordinat model dengan koordinat sebenarnya (Pardo dkk., 2019). Menurut Peraturan BIG Nomor 1 Tahun 2020, GCP ditempatkan pada pojok, perimeter, dan tengah dari area pekerjaan, serta untuk ICP diletakkan tersebar secara merata.

Berdasarkan area uji petik yang memiliki luas 1.200 m², maka jumlah GCP yang digunakan sebanyak lima GCP dengan empat berada di pojok kanan kiri, serta satu GCP di tengah area penelitian, sedangkan jumlah titik ICP sebanyak enam titik yang diletakkan diantara GCP. Menurut Pandego dkk. (2024), jumlah GCP dan ICP dapat disesuaikan dengan luas area of interest karena hal ini berpengaruh terhadap efektivitas dan efisiensi, baik secara waktu, biaya, maupun jumlah tenaga kerja. Pengukuran GCP dan ICP menggunakan metode *Real Time Kinematik* (RTK), yaitu suatu penentuan posisi secara diferensial dengan data fase. Pengamatan yang dilakukan metode ini secara *real time* dengan mengirimkan sinyal menggunakan sistem komunikasi data dari *base station* ke *rover*. Ketelitian posisi dari hasil RTK sekitar 1 hingga 5 cm dengan ketentuan bahwa ambiguitas fase dipastikan secara benar (Abidin, 2024).

1.4. Digital Elevation Model (DEM)

Digital Elevation Model atau DEM merupakan data digital yang menunjukkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang dibentuk dari himpunan titik koordinat hasil *sampling* dari permukaan dengan algoritma yang mendefinisikan permukaan tersebut berdasarkan titik-titik tersebut. (Tempfli, 1991 dalam Wardana dkk., 2019). Model DEM terbentuk berdasarkan titik-titik koordinat yang dihubungkan dengan segitiga tidak beraturan yang mempunyai texture sehingga dapat merepresentasikan permukaan objek yang dimodelkan (Wardana dkk., 2019).

1.5. Perhitungan Ketelitian Geometri

Informasi geometri yang dihasilkan dari foto udara dilakukan perhitungan ketelitian yang mengacu pada perbedaan nilai koordinat (X, Y, Z) dari titik uji hasil orthophoto dan DEM dengan titik sebenarnya. Perbedaan nilai koordinat yang terjadi dinyatakan dengan nilai Root Mean Square Error (RMSE). Berdasarkan ketentuan BIG (2014) nilai RMSE dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\text{RMSE horizontal} = \sqrt{\frac{\sum (X_{\text{data}} - X_{\text{cek}})^2 + (Y_{\text{data}} - Y_{\text{cek}})^2}{n}} \quad (1)$$

$$\text{RMSE vertikal} = \sqrt{\frac{\sum (Z_{\text{data}} - Z_{\text{cek}})^2}{n}} \quad (2)$$

Dalam hal ini, X_{data} : Data nilai koordinat X titik ICP pada *orthophoto*, X_{cek} : Data nilai koordinat X titik ICP hasil pengukuran GNSS, Y_{data} : Data nilai koordinat Y titik ICP pada *orthophoto*, Y_{cek} : Data nilai koordinat Y titik ICP hasil pengukuran GNSS, Z_{data} : Data nilai koordinat Z titik ICP pada *orthophoto*, Z_{cek} : Data nilai koordinat Z titik ICP hasil pengukuran GNSS, n : Jumlah titik sampel ICP.

Kemudian, hasil RMSE horizontal dan vertikal dihitung *Circular Error* 90 (CE90) dan *Linear Error* 90 (LE90) yang terdapat pada persamaan (3) dan (4).

$$\text{CE90} = 1.5175 \times \text{RMSEr} \quad (3)$$

$$\text{LE90} = 1.6499 \times \text{RMSEz} \quad (4)$$

Dalam hal ini, RMSEr : *Root Mean Square Error* nilai X dan Y (horizontal), RMSEz : *Root Mean Square Error* nilai Z (vertikal), CE90 : Ukuran ketelitian geometri horizontal, LE90 : Ukuran ketelitian geometri vertikal.

Ketentuan mengenai standar ketelitian geometri mengacu pada spesifikasi teknis stereo model dari hasil survei udara menggunakan kamera udara non metrik berdasarkan Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 18 Tahun 2021 yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Stereo Model dari Foto Udara Hasil Survei Udara Menggunakan Kamera Udara Non meterik

No.	Aspek	Skala 1 : 5000			Skala 1 : 1000		
		Kelas 1	Kelas 2	Kelas3	Kelas 1	Kelas 2	Kelas3
1.	Resolusi Spasial foto udara (m)	0,25	0,50	0,75	0,05	0,10	0,15
2.	Kanal warna	RGB	RGB	RGB	RGB	RGB	RGB
3.	Pertampalan ke muka	80%	80%	80%	80%	80%	80%
4.	Pertampalan ke samping	60%	60%	60%	60%	60%	60%
5.	Bebas paralaks antarmodel dan antarjalur	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
6.	Ketelitian horizontal (CE90) (m)	0,5	1	2	0,125	0,25	0,375
7.	Ketelitian vertikal (LE90) (m)	0,5	0,75	1	0,1	0,15	0,2
8.	Beda tinggi antarmodel	0,2	0,3	0,4	0,04	0,06	0,08

1.6. Perhitungan Volume Cut and Fill

Cut and fill merupakan salah satu perhitungan volume. Prinsip perhitungan ini adalah menghitung luas dari dua penampang serta jarak antara penampang atas dan penampang bawah sehingga setiap penampang dapat dihitung luasnya. (Geodis-Ale, 2012 dalam Rassarandi dkk., 2015). Rumus perhitungan volume terdapat pada persamaan (5).

$$V_i = A_i \times d_i \quad (5)$$

Dalam hal ini, V_i : Volume prisma, A_i : Luas bidang permukaan proyeksi, d_i : Jarak antara pusat massa dua segitiga *design surface* dan *base surface*.

1.7. Uji Statistik T Sampel Berpasangan

Uji t dilakukan perbandingan rata-rata antara dua variabel yang digunakan untuk menguji apakah nilai tertentu berbeda secara signifikan atau tidak. Hipotesis yang digunakan untuk uji t sampel berpasangan, yaitu hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_a), terdapat dalam persamaan berikut (Pratikno dkk., 2020).

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (6)$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (7)$$

H_a berarti bahwa nilai antar variabel satu dengan variabel dua memiliki perbedaan signifikan. Persamaan berikut merupakan rumus perhitungan uji statistik t sampel berpasangan (Pratikno dkk., 2020).

$$t_{hit} = \frac{|\bar{x}d|}{sd/\sqrt{n}} \quad (8)$$

Dalam hal ini,

$$\bar{x}d = \frac{\sum d}{n} \quad (9)$$

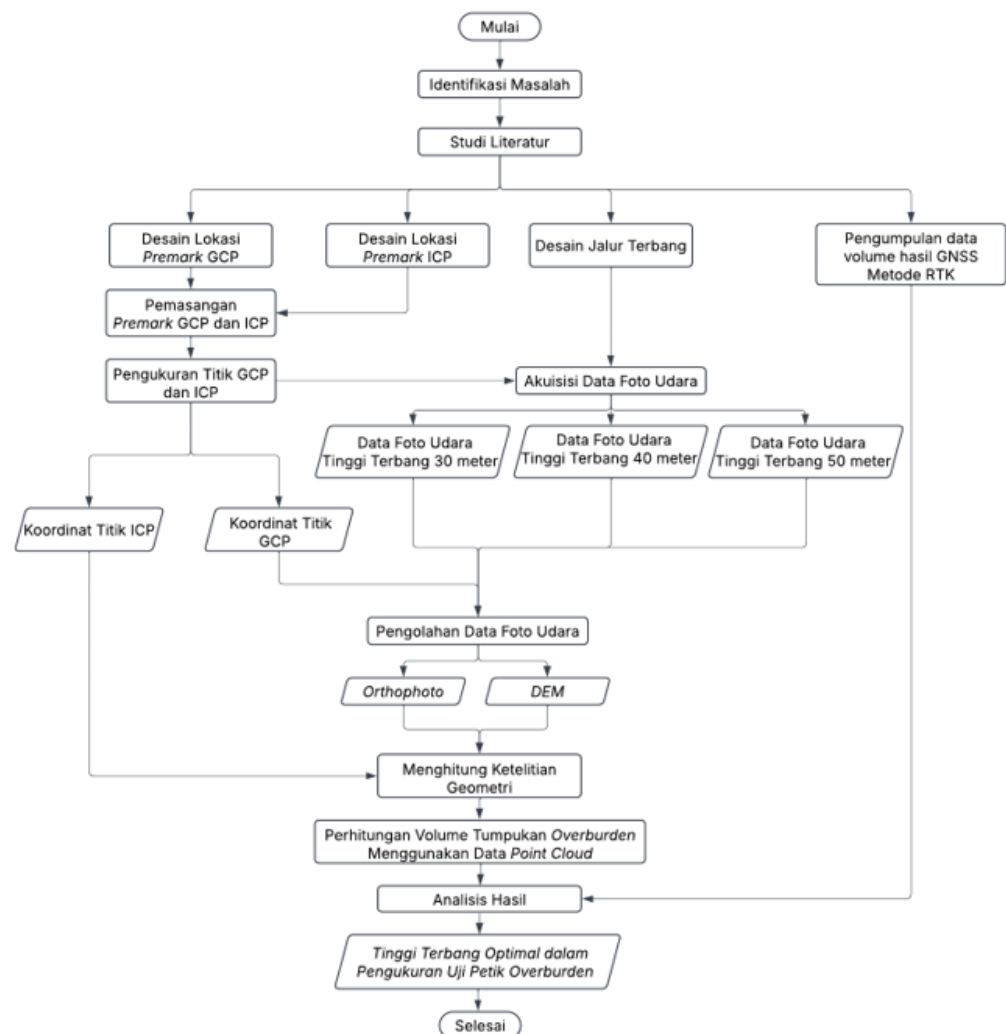
$$sd = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum |d|)^2}{n}}{n-1}} \quad (10)$$

Dalam hal ini, t_{hit} : Nilai t hitung, $\bar{x}d$: Rerata dari selisih dua kelompok data, sd : Standar deviasi dari selisih dua kelompok data, n : Jumlah sampel data, d : Selisih dari dua kelompok data.

2. Data

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data yang digunakan untuk proses pengolahan. Terdapat dua jenis data yaitu data primer dan data sekunder. Data primer berupa koordinat titik *base* digunakan untuk titik referensi *receiver* GNSS RTK, koordinat GCP dan ICP, data foto udara yang merupakan data hasil pemotretan lokasi penelitian pada 5 Maret 2025, dan data *point clouds* berupa data tumpukan *overburden* hasil pengolahan foto udara yang akan digunakan untuk perhitungan volume. Sementara itu, data sekunder berupa data *boundary* tumpukan hasil pengukuran GNSS metode RTK dari PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam Tbk dalam format file (*.str), dan data volume tumpukan *overburden* hasil pengukuran GNSS metode RTK dari PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam Tbk pada 5 Maret 2025 dalam format file (*.pdf).



Gambar 3. Diagram Alir Pelaksanaan

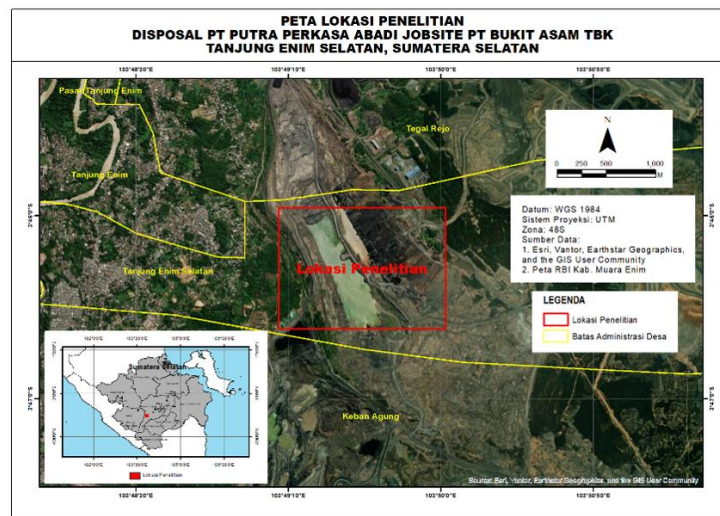
2.2. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada salah satu area disposal PT Putra Perkasa Abadi Jobsite PT Bukit Asam Tbk yang berada di Tanjung Enim Selatan, Kec. Lawang Kidul, Kab. Muara Enim, Sumatera Selatan.

2.3. Peralatan

Alat yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat keras dan perangkat lunak, yaitu Drone DJI Mavic 3 Pro untuk akuisisi data foto udara, satu set *receiver* GNSS Geodetik untuk akuisisi data koordinat titik GCP dan ICP, *Bipod* dan *pole* sebagai penyangga *receiver*, papan GCP dan ICP, laman *WaypointMap* untuk perencanaan jalur terbang, laptop dengan terdapat perangkat lunak Agisoft Metashape untuk pengolahan foto udara, ArcMap untuk melakukan cek akurasi foto udara, Surpac

untuk perhitungan volume, Global Mapper untuk visualisasi hasil DEM, serta Microsoft Excel untuk menghitung untuk menghitung nilai uji ketelitian geometri, selisih volume, dan uji t sampel berpasangan.

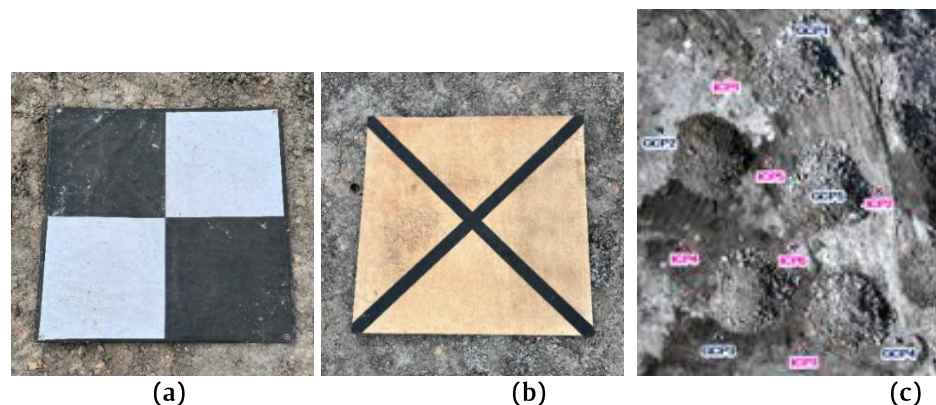


Gambar 2. Lokasi penelitian.

3. Metodologi

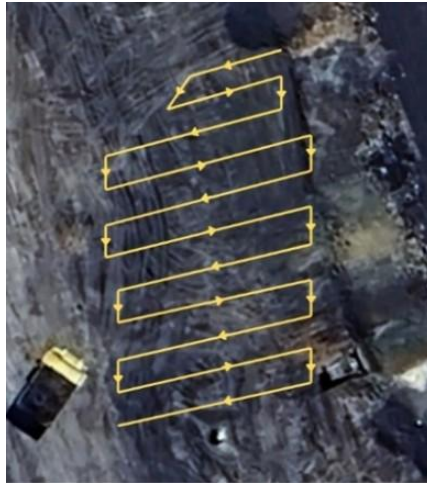
3.1. Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan ini dilakukan desain lokasi premark GCP dan ICP, serta desain jalur terbang. Gambar 4 menunjukkan desain persebaran GCP dan ICP. Premark GCP dibuat berwarna hitam dan putih berbentuk persegi dengan ukuran 80 x 80 cm, sedangkan untuk desain premark ICP, dibuat menggunakan lakban hitam dengan membentuk tanda silang pada triplek berukuran 80 x 80 cm yang tersebar secara merata di area penelitian.



Gambar 4. Desain Persebaran GCP dan ICP menunjukkan: (a) Premark GCP (b) Premark ICP (c) Persebaran GCP dan ICP.

Perencanaan jalur terbang pada penelitian ini menggunakan laman WaypointMap, parameter yang diatur dalam perencanaan ini, yaitu tinggi terbang 30, 40, dan 50 meter, posisi kamera vertikal, overlap dan sidelap sebesar 80%, serta arah terbang dari kanan ke kiri lokasi uji petik seperti yang terdapat pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain Jalur Terbang.

3.2. Tahap Akuisisi Data

Pada tahap akuisisi data, meliputi pengukuran titik GCP dan ICP, serta akuisisi data foto udara. Pengambilan data koordinat GCP dan ICP dilakukan menggunakan metode *Real Time Kinematic* (RTK) dengan lima titik GCP dan 6 titik ICP. Koordinat hasil pengukuran ini didapat secara real time tanpa melakukan pengolahan lebih lanjut sehingga pengukuran menjadi lebih efisien.

Pemotretan tumpukan sampel *overburden* menggunakan drone DJI Mavic 3 Pro, penelitian ini dilakukan tiga kali pemotretan dengan variasi tinggi terbang 30 meter, 40 meter, dan 50 meter. Hasil dari akuisisi data ini menghasilkan tiga set data foto udara berdasarkan tinggi terbang.

3.3. Tahap Pengolahan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengolahan data foto udara hasil pemotretan tiga tinggi terbang berbeda, perhitungan ketelitian geometri dan perhitungan volume sampel tumpukan *overburden*. Pengolahan data foto udara menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape. Proses pengolahan dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu align photo, georeferencing, build dense point cloud, build mesh, build texture, build DEM, dan build orthomosaic.

Tahapan setelah diperoleh *orthophoto* dan DEM adalah perhitungan ketelitian geometri. Tahapan ini dilakukan melalui ekstraksi koordinat X, Y, dan Z pada *premark* yang tampak di foto udara, lalu dibandingkan dengan koordinat hasil pengukuran di lapangan. Komponen horizontal (X, Y) dihitung antara koordinat ICP dengan *orthophoto* dan untuk komponen vertikal atau nilai Z dihitung antara koordinat ICP terhadap DEM.

Point cloud yang dihasilkan dari pengolahan foto udara dilakukan perhitungan volume sebagai *design surface* dengan data lain yang digunakan, yaitu *boundary* dan *base surface*. Data *boundary* menggunakan data yang sama dengan *boundary* untuk perhitungan volume hasil pengukuran GNSS metode RTK, dan data *base* merupakan dasar permukaan dalam perhitungan volume, data ini dibentuk dari *boundary* yang diolah menjadi *Digital Terrain Model* (DTM). Perhitungan volume menggunakan perangkat lunak Surpac.

3.4. Tahap Analisis Hasil

Volume yang dihasilkan dari setiap tinggi terbang, dianalisis untuk mengetahui apakah memiliki perbedaan secara signifikan dari ketiga nilai volume tersebut, kemudian hasil volume dari pengukuran fotogrametri dibandingkan dengan hasil volume menggunakan GNSS metode RTK. Pengujian dilakukan dengan uji t sampel berpasangan. Tujuan uji t ini untuk mengetahui apakah terdapat perubahan signifikan dan hubungan antara dua kelompok data. Selain dari hasil perhitungan volume, tahap ini juga mempertimbangkan waktu akuisisi dan pengolahan data untuk menentukan tinggi terbang optimal saat melakukan kegiatan uji petik.

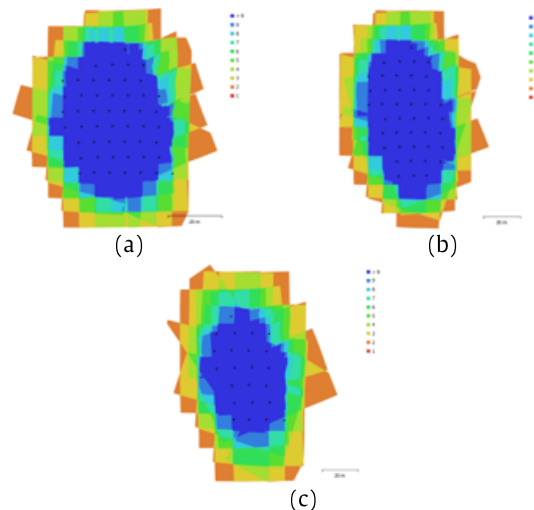
4. Hasil

4.1. Hasil Align Photos

Dari akuisisi data foto udara setiap tinggi terbang menghasilkan 62 foto untuk ketinggian 30 meter dengan waktu pemotretan 4 menit, tetapi foto yang digunakan saat pengolahan data hanya 51 foto

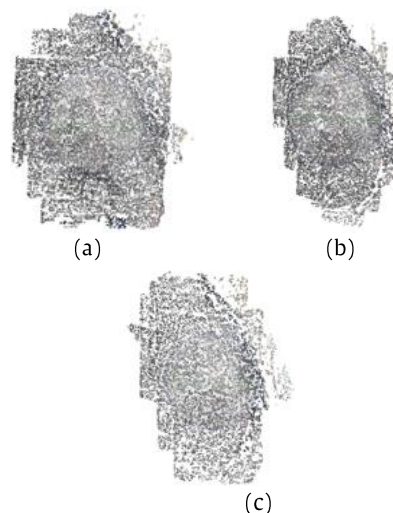
karena menyesuaikan area penelitian, untuk tinggi terbang 40 meter menghasilkan 43 foto dengan waktu pengambilan data 2 menit, dan foto yang dihasilkan dari tinggi 50 meter sebanyak 23 foto selama 1 menit. Hasil foto udara 40 dan 50 meter digunakan keseluruhan saat pengolahan data.

Proses yang dilakukan setelah import data foto adalah *align photo*, proses ini menghasilkan titik-titik jarang atau *sparse point cloud*, serta mengetahui posisi dan orientasi kamera. Gambar 6 menampilkan posisi kamera yang ditunjukkan dengan titik hitam. Dari visualisasi tersebut, setiap tinggi terbang menghasilkan *overlap* yang baik dengan posisi kamera saling terhubung dengan garis yang rapat dan merata.



Gambar 6. Posisi kamera dan overlap foto menunjukkan: (a) Tinggi Terbang 30 meter (b) Tinggi Terbang 40 meter dan (c) Tinggi Terbang 50 meter.

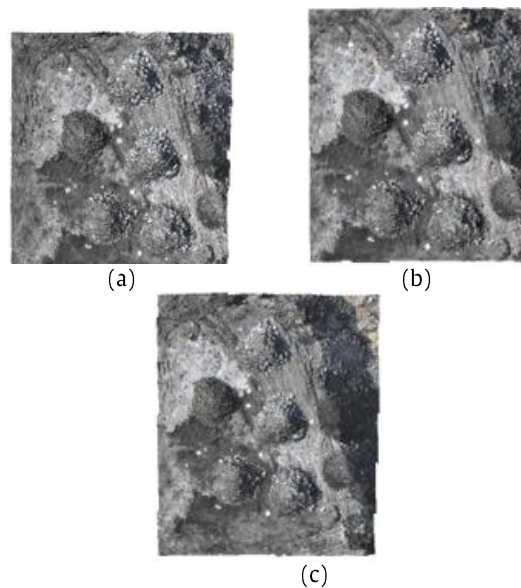
Tie points yang dihasilkan dari proses *align photos* ini adalah 28.180 titik untuk tinggi 30 meter, 24.565 titik pada ketinggian 40 meter dan 15.469 titik untuk tinggi 50 meter. Dilihat dari Gambar 7 hasil *sparse point cloud* masih terdapat area yang tidak padat dan kosong, serta hasil tinggi terbang 50 meter memiliki *point cloud* lebih renggang dibandingkan dengan tinggi 30 dan 40 meter.



Gambar 7. Hasil align photos menunjukkan: (a) Tinggi Terbang 30 meter (b) Tinggi Terbang 40 meter dan (c) Tinggi Terbang 50 meter.

4.2. Hasil Build Dense Clouds

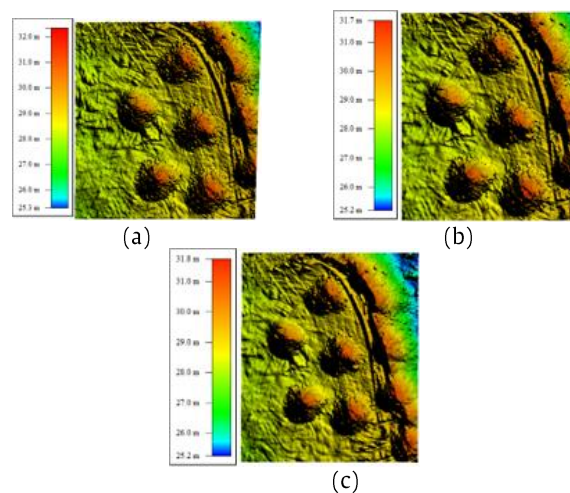
Build dense clouds merupakan hasil komputasi lanjutan dari *sparse point cloud* yang menghasilkan titik lebih padat. Semakin rendah tinggi terbang, maka semakin detail *point cloud* yang dihasilkan. Visualisasi dari hasil build dense clouds tertera pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil build dense clouds menunjukkan: (a) Tinggi Terbang 30 meter (b) Tinggi Terbang 40 meter dan (c) Tinggi Terbang 50 meter.

4.3. Hasil DEM

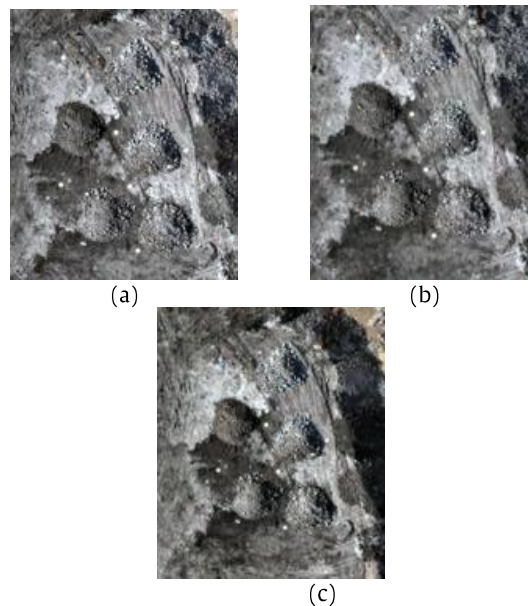
DEM atau *Digital Elevation Model* merupakan model digital permukaan bumi yang dibentuk dari *dense cloud* hasil *stereo matching* foto dan setiap pikselnya berisi informasi ketinggian. Berdasarkan hasil pengolahan DEM pada Gambar 9 diketahui bahwa dari segi visual tidak memiliki perbedaan antar tinggi terbang. Gradasi warna pada DEM menunjukkan nilai ketinggian yang mana area penelitian didominasi oleh warna kuning dan oranye. Rata-rata nilai ketinggian terendah adalah 25,23 meter dan rata-rata nilai ketinggian tertinggi adalah 31,83 meter.



Gambar 9. Hasil DEM menunjukkan: (a) Tinggi Terbang 30 meter (b) Tinggi Terbang 40 meter dan (c) Tinggi Terbang 50 meter.

4.4. Hasil Orthophoto

Hasil *orthophoto* yang diperoleh dari setiap tinggi terbang menghasilkan detail yang jelas dan tidak terdapat kerusakan data terutama pada area tumpukan, serta memiliki nilai resolusi spasial yang baik. Nilai GSD untuk tinggi terbang 30 meter sebesar 7,7 mm/piksel, 40 meter memiliki GSD sebesar 1,05 cm/piksel, dan 1,32 cm/piksel untuk ketinggian 50 meter. Dari nilai GSD tersebut, diketahui bahwa semakin tinggi terbang, semakin rendah resolusi spasial yang dihasilkan. Hasil *orthophoto* tertera pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil *Orthophoto* menunjukkan: (a) Tinggi Terbang 30 meter (b) Tinggi Terbang 40 meter dan (c) Tinggi Terbang 50 meter.

4.5. Perhitungan Ketelitian Geometri

Setelah diperoleh DEM dan *orthophoto*, maka dilakukan perhitungan ketelitian geometri untuk mengetahui tingkat ketelitian dan skala maksimal peta yang ditentukan berdasarkan peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021.

Tabel 2. Hasil CE90 dan LE90

Tinggi Terbang (m)	CE90 (m)	LE90 (m)	Kelas
30	0,024	0,034	1
40	0,027	0,065	1
50	0,029	0,051	1

Tabel 2 menunjukkan hasil nilai CE90 dan LE90 setiap tinggi terbang yang memiliki ketelitian horizontal $\leq 0,125$ meter dan ketelitian vertikal $\leq 0,1$ meter sehingga tinggi terbang 30, 40, dan 50 meter memenuhi standar ketelitian geometri pada kelas 1 dengan skala peta 1:1.000.

4.6. Perhitungan Volume Tumpukan Overburden

4.6.1. Perbandingan Volume Berdasarkan Variasi Tinggi Terbang

Hasil perhitungan volume tumpukan overburden menggunakan UAV setiap tinggi terbang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan volume menggunakan UAV

Tinggi Terbang (m)	Volume (m ³)
30	340,92
40	340,68
50	351,83

Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa adanya perbedaan atau selisih hasil perhitungan volume dari setiap tinggi terbang. Tinggi terbang 30 meter menghasilkan volume sebesar 340,92 m³, pada 40 meter sebesar 340,68 m³. Selisih nilai volume antara kedua tinggi terbang ini sebesar 0,24 m³, sedangkan tinggi terbang 50 meter menghasilkan total volume yang lebih banyak daripada lainnya yaitu 351,83 m³.

Hasil perhitungan volume dilakukan perbandingan menggunakan uji statistik t dengan nilai derajat kebebasan sebesar 4 dan derajat kepercayaan yang digunakan sebesar 95% dengan hipotesis awal (H_0) yaitu tidak ada perbedaan secara signifikan dari hasil perhitungan volume antar tinggi terbang dan hipotesis alternatif (H_a) yaitu ada perbedaan secara signifikan dari hasil perhitungan volume antar tinggi terbang. Pada Tabel 4 menunjukkan hasil dari uji statistik antar variasi tinggi terbang.

Tabel 4. Hasil Uji Statistik Variasi Tinggi Terbang

Perbandingan Tinggi Terbang	Hasil Uji t	Keterangan
30 m dan 40 m	$t_{hitung} < t_{tabel}$	H_0 diterima, tidak terdapat perbedaan yang signifikan
40 m dan 50 m	$t_{hitung} > t_{tabel}$	H_0 ditolak, terdapat perbedaan yang signifikan
30 m dan 50 m	$t_{hitung} > t_{tabel}$	H_0 ditolak, terdapat perbedaan yang signifikan

Berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa hasil uji t yang memiliki nilai t hitung lebih kecil daripada t tabel adalah hasil perbandingan 30 meter dan 40 meter sehingga hipotesis awal diterima yang berarti bahwa volume hasil pengukuran tinggi terbang 30 meter tidak memiliki perbedaan signifikan dengan tinggi terbang 40 meter.

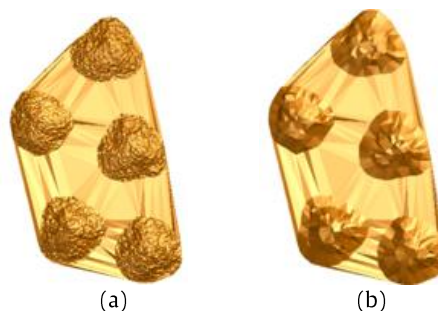
4.6.2. Perbandingan Volume UAV dengan GNSS Metode RTK

Nilai volume setiap tumpukan dari hasil pengukuran UAV dibandingkan dengan hasil pengukuran GNSS metode RTK yang memiliki total volume sebesar 328,26 m³. Perbandingan ini untuk mengetahui perbedaan dari kedua metode tersebut dengan menghitung selisih volume dalam satuan m³ dan persentase selisih data. Perbandingan hasil perhitungan volume kedua metode tertera pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan volume UAV dengan GNSS metode RTK

Tinggi Terbang (m)	Tumpukan	Volume (m ³)		Selisih (m ³)	Selisih (%)
		UAV	GNSS Metode RTK		
30	1	61,08	59,56	1,52	2,56
	2	64,95	64,41	0,54	0,84
	3	68,65	66,06	2,59	3,92
	4	73,07	70,01	3,06	4,38
	5	73,17	68,22	4,95	7,26
	Rata - rata			2,53	3,79
30	1	61,08	59,56	1,52	2,56
	2	64,95	64,41	0,54	0,84
	3	68,65	66,06	2,59	3,92
	4	73,07	70,01	3,06	4,38
	5	73,17	68,22	4,95	7,26
	Rata - rata			2,49	3,66
30	1	61,08	59,56	1,52	2,56
	2	64,95	64,41	0,54	0,84
	3	68,65	66,06	2,59	3,92
	4	73,07	70,01	3,06	4,38
	5	73,17	68,22	4,95	7,26
	Rata - rata			4,72	7,09

Berdasarkan perbandingan tersebut diketahui bahwa volume dari hasil pengukuran UAV menghasilkan volume yang lebih besar daripada hasil GNSS metode RTK. Hal ini disebabkan oleh data titik yang diperoleh dari pengukuran GNSS metode RTK tidak memiliki tingkat kedetailan sebaik metode UAV karena hanya mengambil titik tertentu saja, sedangkan *point cloud* yang dihasilkan dari proses *dense cloud* pada pengolahan foto udara memiliki tingkat kerapatan yang sangat detail. Pada Gambar 11 menampilkan *Digital Terrain Model* (DTM) dari kedua metode yang menunjukkan DTM UAV memiliki tekstur permukaan yang lebih detail dan jelas dalam memodelkan tumpukan dibandingkan dengan DTM GNSS metode RTK.



Gambar 11. Perbandingan Visual DTM menunjukkan: (a) DTM UAV (b) DTM GNSS metode RTK.

4.6.3. Uji Statistik Hasil Volume UAV dengan GNSS Metode RTK

Hasil volume dari pengukuran UAV dan GNSS metode RTK dilakukan uji t sampel berpasangan dengan derajat kepercayaan yang digunakan sebesar 95% dan derajat kebebasan sebanyak 4 sehingga nilai t tabel diperoleh 2,776 dengan hipotesis awal (H_0) yaitu tidak ada perbedaan secara signifikan antara hasil volume pengukuran UAV dengan GNSS metode RTK. Sementara itu, hipotesis alternatif pada penelitian ini yaitu ada perbedaan secara signifikan antara hasil volume pengukuran UAV dengan GNSS metode RTK. Hasil uji t terdapat pada Tabel 6.

Tabel 4. Hasil Uji Statistik Variasi Tinggi Terbang

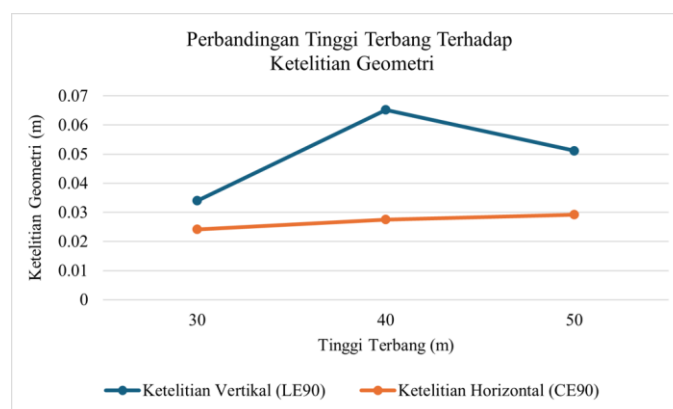
Perbandingan Tinggi Terbang	Hasil Uji t	Keterangan
30 m dan GNSS RTK	$t_{hitung} > t_{tabel}$	H_0 ditolak, terdapat perbedaan yang signifikan
40 m dan GNSS RTK	$t_{hitung} < t_{tabel}$	H_0 diterima, tidak terdapat perbedaan yang signifikan
50 m dan GNSS RTK	$t_{hitung} > t_{tabel}$	H_0 ditolak, terdapat perbedaan yang signifikan

Berdasarkan Tabel 6 diketahui bahwa hasil uji t yang memiliki hipotesis awal diterima adalah volume hasil pengukuran GNSS metode RTK dengan tinggi terbang 40 meter yang berarti bahwa antara kedua variabel tersebut tidak memiliki perbedaan hasil volume yang signifikan.

5. Pembahasan

5.1. Hasil Perhitungan Ketelitian Geometri

Dari hasil perhitungan ketelitian geometri setiap tinggi terbang dapat dibuat grafik hubungan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik perbandingan tinggi terbang terhadap ketelitian geometri.

Grafik tersebut menunjukkan adanya pengaruh tinggi terbang terhadap ketelitian geometri. Semakin tinggi terbang, ketelitian horizontal yang dihasilkan semakin menurun. Tinggi terbang 30 meter memiliki ketelitian horizontal dan vertikal yang paling baik dari tinggi terbang lainnya dengan nilai berturut-turut yaitu 0,024 meter dan 0,034 meter. Selisih ketelitian horizontal antara tinggi terbang 30 meter dengan tinggi 40 meter sebesar 0,3 cm dan selisih nilai ketelitian vertikal sebesar 3,1 cm. Untuk perbedaan nilai ketelitian horizontal antara tinggi terbang 30 meter dengan 50 meter sebesar 0,5 cm dan selisih ketelitian vertikalnya sebesar 1,7 cm, sedangkan selisih ketelitian horizontal antara tinggi terbang 40 meter dengan 50 meter sebesar 0,2 cm dan selisih ketelitian vertikal antara kedua tinggi terbang tersebut sebesar 1,4 cm.

Dari ketiga variasi tinggi terbang, tinggi 40 meter memiliki ketelitian vertikal yang paling rendah sebesar 0,065 meter. Perbedaan nilai ketelitian vertikal ini dapat disebabkan oleh karakteristik objek *overburden* yang cenderung homogen dan minim fitur sehingga hal ini berpengaruh pada proses *image matching*. *Image matching* merupakan proses mengidentifikasi fitur yang memiliki kesamaan dan saling bertampalan antar gambar. Objek homogen menyebabkan ambiguitas dalam pencocokan fitur sehingga dapat terjadi kesalahan dalam pencocokan, adanya *noise* pada *point cloud* yang berpengaruh pada kualitas model (Schönberger & Frahm, 2016). Meskipun demikian, model yang dihasilkan dari setiap variasi tinggi terbang memiliki ketelitian baik karena berada pada kelas 1 peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021 dengan skala peta 1:1.000.

5.2. Hasil Perhitungan Uji Statistik T Sampel Berpasangan

Dari uji statistik t antar variasi tinggi terbang diperoleh hasil yang tidak memiliki perbedaan signifikan adalah nilai volume antara tinggi terbang 30 meter dengan tinggi terbang 40 meter. Untuk uji t antara hasil volume pengukuran UAV dengan GNSS metode RTK diperoleh hasil volume tinggi terbang 40 meter tidak memiliki perbedaan signifikan dengan GNSS metode RTK. Berdasarkan kedua uji statistik tersebut, serta mempertimbangkan dari segi waktu akuisisi data dan jumlah foto udara yang akan mempengaruhi waktu pemrosesan data sehingga diperoleh tinggi terbang optimal untuk pengukuran uji petik overburden adalah 40 meter dengan waktu akuisisi data selama 2 menit dan jumlah foto yang dihasilkan sebanyak 43 foto.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh tinggi terbang optimal yang direkomendasikan untuk perusahaan dalam melakukan pengukuran uji petik tumpukan *overburden* adalah 40 meter dengan waktu pengambilan data selama 2 menit dan berada pada kelas 1 dengan skala 1:1.000.

7. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapkan kepada seluruh dosen Teknologi Survei dan Pemetaan Dasar atas ilmu, nasihat, dan bimbingan selama proses perkuliahan, serta terima kasih kepada PT Putra Perkasa Abadi *Jobsite* PT Bukit Asam Tbk atas dukungan dan bantuan selama pelaksanaan penelitian ini.

8. Daftar Pustaka

- Abidin, H. Z. 2024. Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Aulia, A., Magdalena, H., Litha Respati, L., Winarno, A., & Hasan, H. Perhitungan Volume Overburden Menggunakan Metode Cut and Fill di Pit P PT. Coalindo Adhi Perkasa Sub PT. International Prima Coal, Samarinda, Kalimantan Timur. *Journal of Comprehensive Science (JCS)*, 2(9), 1596–1604 (2023).
- Bradrania, R., Li, X., & Xu, L. 2017. Bank Failures and Management Inefficiency During the Global Financial Crisis, *Handbook of Investors' Behavior During Financial Crises*. Elsevier. 191–201.
- Londong, C., Nurhakim, N., Dwiatmoko, M. U., & Melati, S. Perencanaan Disposal Pada Tambang Terbuka Batubara. *Jurnal Geosapta*, 2(1), 49–54 (2016).
- Manik, F., Marpaung, N., & Sitohang, R. Perbandingan Perhitungan Volume Overburden yang Terbongkar Antara Metode Truck Count dan Metode Survey Pada PT Bara Adhipratama Ulok Kupai *Jobsite* Bengkulu Ulok Kupai *Jobsite* Bengkulu Utara. *Jurnal Ruang Luar dan Dalam*, 4(2), 210–220, (2022).
- Pandego, H., Fajrin., & Arini, D. Analisis Jumlah dan Distribusi Control Control Point yang Efektif dan Efisien Pada Pemetaan Foto Udara (Studi Kasus di Desa Kohong, Kecamatan Barito Tuhup Raya, Kabupaten Murung Raya, Provinsi Kalimantan Tengah), 2(5), 186–204, (2024).
- Pardo, C., Sabri, L., & Awwaluddin, M. Analisis Akurasi Model 3 Dimensi Bangunan dari Foto Secara Tegak dan Miring (Studi Kasus: Gedung Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro). *Jurnal Geodesi Undip*, 9(1), 354–363, (2019).
- Pranoto, J., Sabri, L., & Bashit, N. Pembuatan Model 3D Waduk Pendidikan Diponegoro Menggunakan Data UAV Pada Tahun 2019. *Jurnal Geodesi Undip*, 9(2), 53–62 (2020).
- Pratikno, A., Prastiwi, A., & Rahmawati, S. Strategi Dalam Pengujian Hipotesis Rata-Rata Dua Variabel. *OSF Preprints*, (2020).
- Rassarandi, F., Sai, S., & Purwanto, H. Analisis Ketelitian Perhitungan Tonase Stockpile Batubara Hasil Pengukuran Metode RTK Radio GNSS dengan Teknik Akuisisi Data secara Point to Point dan Auto Topo. *Jurnal Integrasi*, 7(2), 123–129 (2015).
- Republik Indonesia. 2021. Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 18 Tahun 2021 tentang Tata Cara Penyelenggaraan Informasi Geospasial. Bogor: Badan Informasi Geospasial.
- Republik Indonesia. 2020. Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 1 Tahun 2020 tentang Standar Pengumpulan Data Geospasial Dasar Untuk Pembuatan Peta Dasar Skala Besar.
- Republik Indonesia. 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. Bogor: Badan Informasi Geospasial.
- Republik Indonesia. 2014. Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Bogor: Badan Informasi Geospasial.
- Schönberger, J., & Frahm, J. Structure from Motion Revisited. *CVPR*, (2016).
- Siahaan, R. (2018). Evaluasi Ketidak Tercapaian Spesifikasi Hasil Blending Batubara di Bukit Asam Coal Terminal Tarahan. Skripsi. Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi Universitas Trisakti. Jakarta. 54 hlm.

- Wardana, K., Subiyanto, S., & Hani'ah. Analisis Tinggi Tanaman Padi Menggunakan Model 3D Hasil Pemotretan UAV dengan Pengukuran Lapangan. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 378–387 (2019).
- Wolf, P., Dewitt, B., & Wilkinson, B. 2014. *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*, fourth ed. McGraw Hill LLC, New York.