

# Analisis Pengaruh Tinggi Terbang UAV LiDAR Terhadap Akurasi Model Permukaan Pada *Terrain* Terjal Kawasan Pertambangan

Zakki Sulistyawan<sup>1</sup>, Soni Darmawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Underground Survey Technical Service, PT. Freeport Indonesia, Tembagapura Papua Tengah, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

\*Koresponden email: zackysulistyawan@gmail.com, soni\_darmawan@itenas.ac.id

Diterima: 25 Juli 2026

Disetujui: 30 Juli 2026

## Abstract

This research analyzes the effect of UAV LiDAR flight altitude on surface model accuracy in steep terrain mining areas. Data were collected at flight altitudes of 100 m, 150 m, and 200 m above ground level. Point density and point spacing were used to analyze the point cloud, while surface model accuracy was evaluated using RMSE based on Independent Control Points (ICPs). At 100 m altitude, RMSE<sub>r</sub> and RMSE<sub>z</sub> were 0.064 m and 0.038 m. At 150 m, the values increased to 0.071 m and 0.065 m. At 200 m, RMSE<sub>r</sub> remained 0.071 m, while RMSE<sub>z</sub> increased to 0.124 m. As flight altitude increased, point density decreased from 1124.25 points/m<sup>2</sup> to 155.75 points/m<sup>2</sup>, while point spacing increased from 2.98 cm to 8.01 cm. The results show that flight altitude affects vertical accuracy more than horizontal accuracy. Based on BIG Regulation No. 15 of 2014, data collected at 100 m and 150 m met the requirements for a 1:1,000 Class 1 base map, while data collected at 200 m met the requirements for Class 2.

**Keywords:** UAV LiDAR, flight altitude, point density, surface model accuracy, steep terrain

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tinggi terbang UAV LiDAR terhadap akurasi model permukaan pada *terrain* terjal kawasan pertambangan. Akuisisi data dilakukan pada ketinggian 100 m, 150 m, dan 200 m di atas permukaan tanah. Kerapatan titik dianalisis menggunakan *point density* dan *point spacing*, sedangkan akurasi model permukaan dievaluasi menggunakan RMSE berdasarkan *Independent Control Point* (ICP). Tinggi terbang 100 m diperoleh RMSE<sub>r</sub> sebesar 0,064 m dan RMSE<sub>z</sub> sebesar 0,038 m. Pada tinggi terbang 150 m, nilai RMSE<sub>r</sub> dan RMSE<sub>z</sub> meningkat menjadi 0,071 m dan 0,065 m. Pada tinggi terbang 200 m, RMSE<sub>r</sub> tetap sebesar 0,071 m, sedangkan RMSE<sub>z</sub> meningkat menjadi 0,124 m. Peningkatan tinggi terbang menyebabkan *point density* menurun dari 1124,25 points/m<sup>2</sup> menjadi 155,75 points/m<sup>2</sup>, sementara *point spacing* meningkat dari 2,98 cm menjadi 8,01 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tinggi terbang lebih berpengaruh terhadap ketelitian vertikal dibandingkan ketelitian horizontal. Berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014, data tinggi terbang 100 m dan 150 m memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 1, sedangkan data pada tinggi terbang 200 m memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 2.

**Kata Kunci:** UAV LiDAR, tinggi terbang, point density, akurasi model permukaan, *terrain* terjal

## 1. Pendahuluan

Kondisi topografi yang terjal menjadi salah satu tantangan dalam kegiatan pemetaan topografi karena perubahan elevasi dan kemiringan lereng yang cukup tinggi [1]. Pada kondisi seperti ini, metode survei konvensional sering mengalami keterbatasan dalam menggambarkan bentuk permukaan secara akurat [2]. UAV LiDAR digunakan sebagai alternatif solusi karena mampu menghasilkan data *point cloud* dengan kerapatan dan akurasi yang baik pada area yang kompleks termasuk pada area yang bervegetasi untuk mendapatkan model permukaan topografi [3,4]. Selain itu, teknologi ini juga dapat digunakan untuk menghasilkan model digital tiga dimensi dan mendukung analisis topografi [5]. Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas data UAV LiDAR adalah tinggi terbang [3]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang dapat menyebabkan *point density* menurun dan *point spacing* menjadi lebih besar [2]. Penelitian tentang bagaimana tinggi terbang mempengaruhi kerapatan titik dan akurasi model permukaan pada *terrain* terjal kawasan pertambangan masih relatif terbatas.

Penelitian ini menggunakan metode *terrain following* untuk mempertahankan ketinggian relatif sensor terhadap permukaan tanah selama proses akuisisi data [1]. Metode tersebut dipilih agar distribusi titik yang dihasilkan tetap lebih konsisten meskipun terdapat perubahan elevasi yang cukup besar pada area

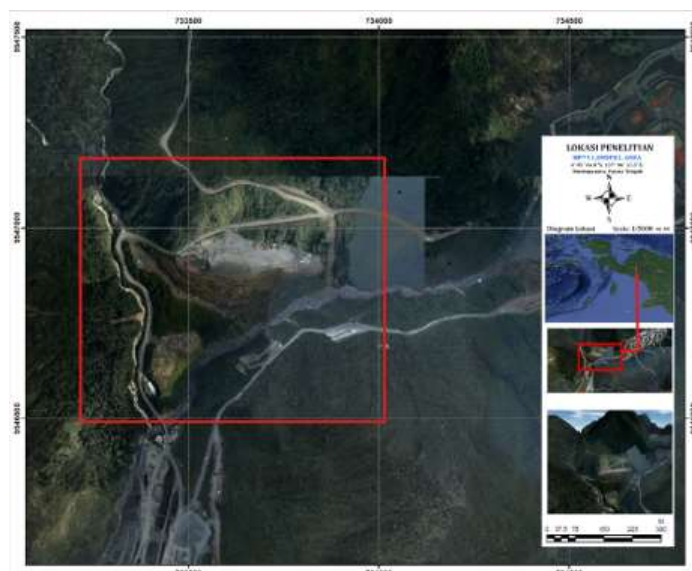
penelitian. Kualitas data dievaluasi menggunakan parameter *point density*, *point spacing*, *Independent Control Point (ICP)* [7], dan *Root Mean Square Error (RMSE)* yang mengacu pada standar ASPRS [10]. Penggunaan RMSE sebagai parameter evaluasi akurasi juga telah banyak diterapkan dalam penelitian UAV LiDAR [13]. Kualitas data tersebut dapat juga dinilai berdasarkan *Topographic Data Quality Level (QLs)* yang mempertimbangkan kerapatan titik dan ketelitian vertikal [14].

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tinggi terbang UAV LiDAR terhadap akurasi model permukaan pada *terrain* terjal kawasan pertambangan serta melihat hubungan antara perubahan kerapatan titik dan ketelitian model permukaan yang dihasilkan. Penelitian serupa telah dilakukan oleh Fuad et al. [12], namun pada kondisi *terrain* dan skenario penerbangan yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian pada kawasan pertambangan dengan topografi terjal masih perlu dilakukan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam menentukan tinggi terbang UAV LiDAR yang sesuai untuk kegiatan pemetaan topografi di kawasan pertambangan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di kawasan Landfill Mile 73, PT Freeport Indonesia, yang berada di Distrik Tembagapura, Papua Tengah dengan koordinat geografis 4° 05' 46.8"S, 137° 06' 15.5"E. Wilayah ini memiliki karakteristik *terrain* terjal dengan variasi elevasi yang signifikan dan kemiringan lereng yang bervariasi.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Landfill MP 73, Tembagapura, Papua Tengah.

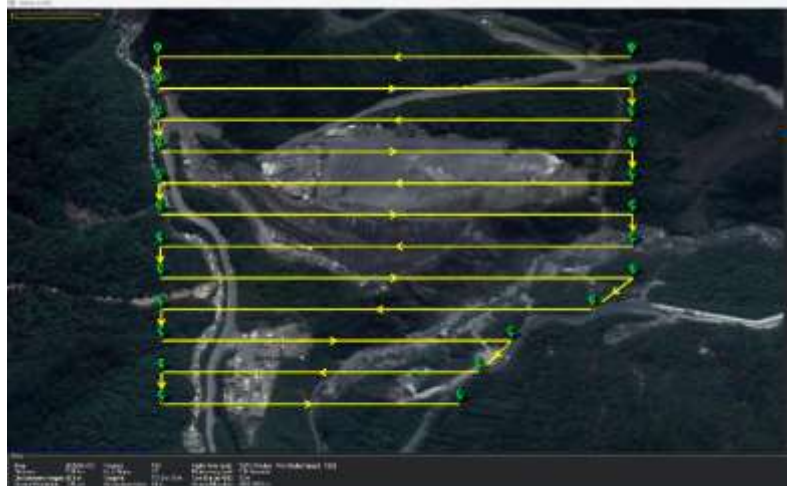
### 2.2 Perencanaan Misi Penerbangan

Perencanaan misi penerbangan dilakukan sebelum kegiatan akuisisi data UAV LiDAR. Tahapan ini bertujuan untuk menentukan jalur terbang yang aman dan efektif sesuai kondisi topografi area penelitian. Metode penerbangan yang digunakan adalah *terrain following*, yaitu metode yang mempertahankan ketinggian relatif UAV terhadap permukaan tanah berdasarkan *Digital Terrain Model (DTM)* [1]. Dengan metode ini, variasi perubahan elevasi pada area penelitian dapat diikuti secara otomatis sehingga ketinggian sensor terhadap permukaan tanah tetap relatif konstan selama proses akuisisi data [1]. Parameter yang sama digunakan pada setiap skenario penerbangan, sedangkan variabel tinggi terbang dibedakan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Akuisisi UAV LiDAR.

| Parameter         | 100m                     | 150m                     | 200m                     |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Metode            | <i>Terrain following</i> | <i>Terrain following</i> | <i>Terrain following</i> |
| UAV               | DJI Matrice 400          | DJI Matrice 400          | DJI Matrice 400          |
| Sensor            | Zenmuse L2               | Zenmuse L2               | Zenmuse L2               |
| Kecepatan UAV     | 8 m/s                    | 8 m/s                    | 8 m/s                    |
| Overlap / Sidelap | 50/50                    | 50/50                    | 50/50                    |

Jalur terbang dirancang menggunakan pola penerbangan paralel (*lawn mower pattern*) untuk memastikan seluruh area penelitian tercakup akuisisi UAV sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Jalur terbang UAV LiDAR pada area penelitian.

### 2.3 Penentuan dan Pengukuran GCP

Sebanyak delapan titik kontrol ditempatkan pada area penelitian, yang terdiri dari lima *Ground Control Point* (GCP) dan tiga *Independent Control Point* (ICP). GCP digunakan untuk proses georeferensi model permukaan, sedangkan ICP digunakan untuk evaluasi akurasi. Titik kontrol ditempatkan pada lokasi yang terbuka dan mudah dikenali agar dapat digunakan dengan baik dalam proses akuisisi dan validasi data UAV LiDAR. Sebarannya dirancang untuk mewakili area survei dan variasi topografi di kawasan Landfill Mile 73 sehingga hasil evaluasi akurasi lebih menggambarkan kondisi lapangan. Sebaran titik kontrol ditunjukkan pada **Gambar 3**.



**Gambar 3.** Sebaran titik GCP dan ICP pada area penelitian

Koordinat GCP dan ICP diukur menggunakan GNSS RTK Leica Viva GS16 dengan metode *base-rover*. Pengamatan dilakukan hingga memperoleh status RTK *Fixed* agar koordinat yang dihasilkan dapat digunakan sebagai data referensi. Selama pengukuran, satu titik *base station* digunakan sebagai titik acuan yang terhubung secara *real-time* dengan *receiver rover* pada setiap titik kontrol. Hasil pengukuran kemudian dicatat sebagai dokumentasi survei.



**Gambar 4.** Pengukuran GCP dan ICP menggunakan GNSS RTK Leica Viva GS16.

Hasil pengukuran berupa koordinat dan elevasi yang kemudian digunakan sebagai data referensi untuk evaluasi akurasi model permukaan UAV LiDAR.

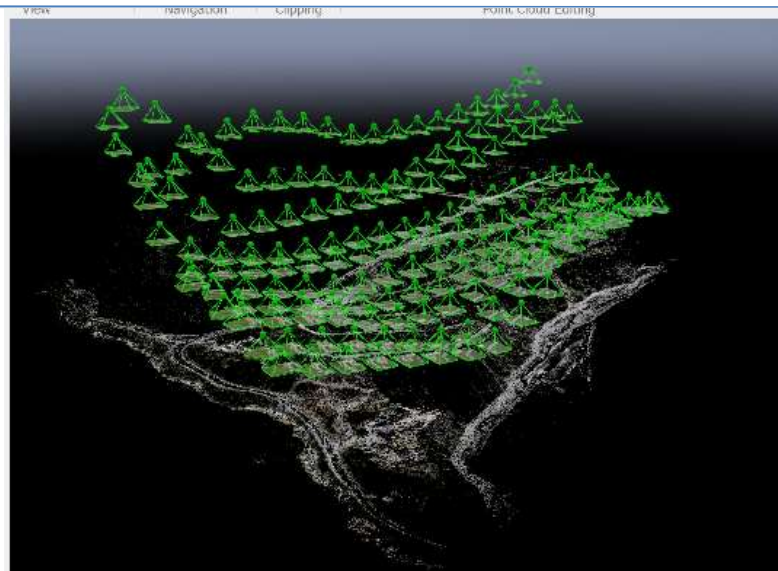
#### 2.4 Akuisisi Data UAV LiDAR

Akuisisi data dilakukan menggunakan UAV DJI Matrice 400 dengan sensor LiDAR DJI Zenmuse L2. UAV yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** UAV DJI Matrice 400 dan sensor LiDAR DJI Zenmuse L2.

Akuisisi data dilakukan mengikuti jalur terbang *terrain following* yang telah direncanakan menggunakan Mission Planner. Jalur terbang yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 6**.

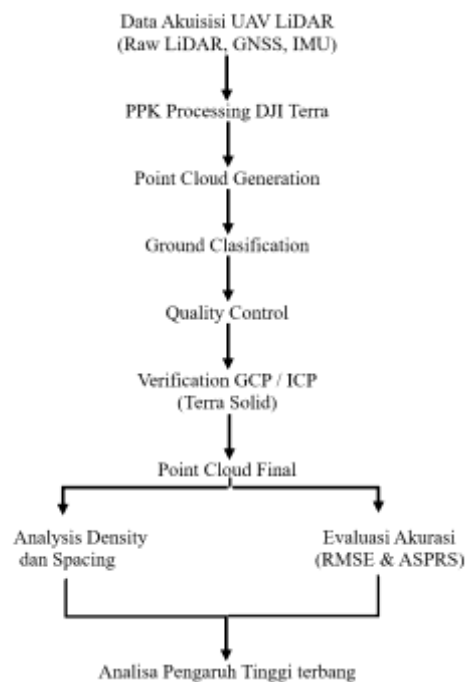


**Gambar 6.** Jalur terbang *terrain following* area penelitian.

Selama proses akuisisi data, sensor LiDAR merekam *point cloud*, sedangkan sistem GNSS dan IMU merekam data posisi serta orientasi sensor. Data tersebut kemudian digunakan dalam proses pengolahan data.

## 2.5 Pengolahan Data Point Cloud

Data hasil akuisisi yang terdiri dari data LiDAR, GNSS, IMU, dan RINEX *base station* diolah menggunakan DJI Terra. Tahapan pengolahan meliputi proses PPK (*Post Processed Kinematic*), pembentukan *point cloud*, klasifikasi titik tanah (*ground classification*), dan pemeriksaan kualitas data. Hasil pengolahan kemudian diperiksa menggunakan data GCP dan ICP untuk evaluasi akurasi. *Point cloud* dan data orthophoto yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk analisis *point density*, *point spacing*, dan akurasi model permukaan. Diagram alir pengolahan data UAV LiDAR ditunjukkan pada **Gambar 7**.



**Gambar 7.** Diagram alir pengolahan data UAV LiDAR

## 2.6 Analisis Point density dan Point spacing

Analisis *point density* dan *point spacing* dilakukan untuk mengetahui pengaruh tinggi terbang UAV LiDAR terhadap distribusi titik hasil akuisisi. *Point density* menunjukkan jumlah titik LiDAR dalam suatu area, sedangkan *point spacing* menunjukkan jarak rata-rata antar titik [6]. Kedua parameter ini digunakan untuk menggambarkan kerapatan dan tingkat detail data *point cloud* [9].

Rumus *point density*:

$$\text{point density} = \frac{N}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

- N= jumlah titik LiDAR
- A= luas area pengamatan (m<sup>2</sup>)

Rumus *point spacing*:

$$\text{point spacing} = \frac{1}{\sqrt{\text{Point Density}}} \quad (2)$$

Keterangan:

- *point density* dalam points/m<sup>2</sup>
- *point spacing* dalam meter

*Point density* menunjukkan jumlah titik LiDAR dalam suatu area, sedangkan *point spacing* menunjukkan jarak rata-rata antar titik [6]. Kedua parameter ini digunakan untuk menggambarkan kerapatan dan tingkat detail data *point cloud* [9]. Perhitungan *point density* dan *point spacing* dilakukan untuk melihat pengaruh tinggi terbang terhadap distribusi titik hasil akuisisi UAV LiDAR.

## 2.7 Evaluasi Akurasi Model Permukaan (RMSE)

Akurasi model permukaan dievaluasi dengan membandingkan koordinat dan elevasi hasil pengolahan UAV LiDAR terhadap data *Independent Control Point* (ICP) [10]. GCP digunakan untuk georeferensi, sedangkan ICP digunakan untuk uji akurasi. Penggunaan GCP dan ICP juga telah diterapkan pada penelitian pemodelan tiga dimensi berbasis fotogrametri [11]. Nilai akurasi dihitung menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) berdasarkan standar ASPRS [10]. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian UAV LiDAR untuk mengevaluasi kualitas DTM [15].

### 2.7.1 Perhitungan RMSE Horizontal dan Vertikal

Akurasi horizontal dihitung berdasarkan selisih koordinat *Easting* dan *Northing* antara hasil pengolahan UAV LiDAR dan titik kontrol [10].

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Dimana:

- $RMSE_x$  = Root Mean Square Error arah X
- $RMSE_y$  = Root Mean Square Error arah Y
- $\Delta X$  = Selisih koordinat *Easting*
- $\Delta Y$  = Selisih koordinat *Northing*
- $n$  = Jumlah titik uji

Akurasi vertikal dihitung berdasarkan selisih elevasi hasil pengolahan UAV LiDAR terhadap elevasi referensi titik kontrol.

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Dimana:

- $RMSE_z$  = Root Mean Square Error elevasi
- $\Delta Z$  = Selisih elevasi
- $n$  = Jumlah titik uji

### 2.7.2 Perhitungan RMSEr dan Akurasi Berdasarkan ASPRS

Nilai RMSEr diperoleh dari perhitungan RMSE<sub>x</sub> dan RMSE<sub>y</sub>, kemudian digunakan untuk evaluasi akurasi horizontal berdasarkan standar ASPRS.

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (6)$$

Berdasarkan standar ASPRS, nilai RMSE digunakan untuk menghitung akurasi horizontal dan vertikal pada tingkat kepercayaan 95% [10].

Akurasi Horizontal:

$$Accuracy_r = 1.7308 \times RMSE_r \quad (7)$$

Akurasi Vertikal:

$$Accuracy_z = 1.9600 \times RMSE_z \quad (8)$$

Dimana:

- $Accuracy_r$  = akurasi horizontal pada tingkat kepercayaan 95%
- $Accuracy_z$  = akurasi vertikal pada tingkat kepercayaan 95%
- $RMSE_r$  = RMSE horizontal radial
- $RMSE_z$  = RMSE vertikal

### 2.7.3 Klasifikasi Ketelitian Berdasarkan BIG No.15 Tahun 2014

Nilai akurasi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan ketelitian peta RBI berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 [8].

**Tabel 2.** Ketelitian Peta RBI (BIG No. 15 Tahun 2014)

| Ketelitian | Kelas 1                 | Kelas 2                 | Kelas 3                 |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Horizon    | 0.2 mm x bilangan skala | 0.3 mm x bilangan skala | 0.5 mm x bilangan skala |
| Vertikal   | 0.5 x Interval          | 1.5 x Interval          | 2.5 x Interval          |

Perhitungan RMSE<sub>x</sub>, RMSE<sub>y</sub>, RMSE<sub>z</sub>, dan RMSE<sub>r</sub> dilakukan pada setiap skenario penerbangan. Nilai RMSE kemudian digunakan untuk menghitung akurasi horizontal dan vertikal berdasarkan standar ASPRS [10]. Selanjutnya, nilai akurasi yang diperoleh digunakan untuk menentukan kelas ketelitian peta RBI berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 [8].

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Visualisasi Point cloud Berdasarkan Tinggi Terbang

Visualisasi *point cloud* dilakukan untuk melihat perbedaan sebaran titik *point cloud* pada setiap tinggi terbang. Hasil visualisasi ini digunakan sebagai gambaran awal sebelum analisis *point density*, *point spacing*, dan RMSE dilakukan.

#### 3.1.1 Visualisasi Point cloud Tinggi Terbang 100 m

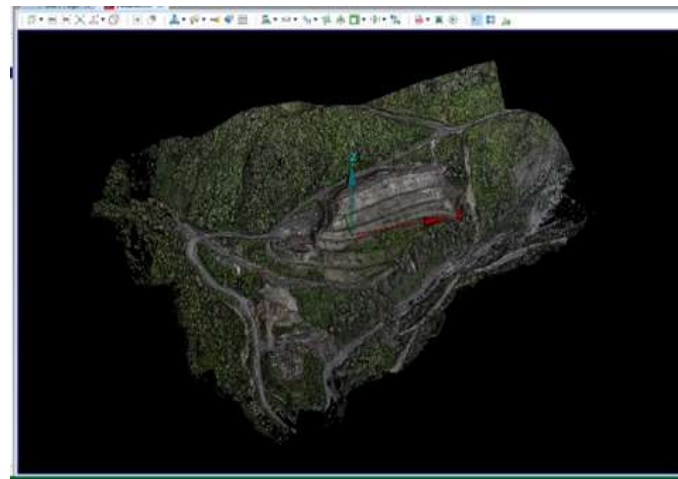
Ketinggian terbang 100 m, sebaran *point cloud* terlihat paling rapat dibandingkan skenario lainnya. Kerapatan titik yang tinggi membuat bentuk permukaan tanah dapat terlihat lebih jelas. Pada percobaan ini bahwa tinggi terbang yang lebih rendah menghasilkan detail permukaan yang lebih baik pada area bertopografi terjal.



**Gambar 8.** *Point cloud* tinggi terbang 100 m.

### 3.1.2 Visualisasi *Point cloud* Tinggi Terbang 150 m

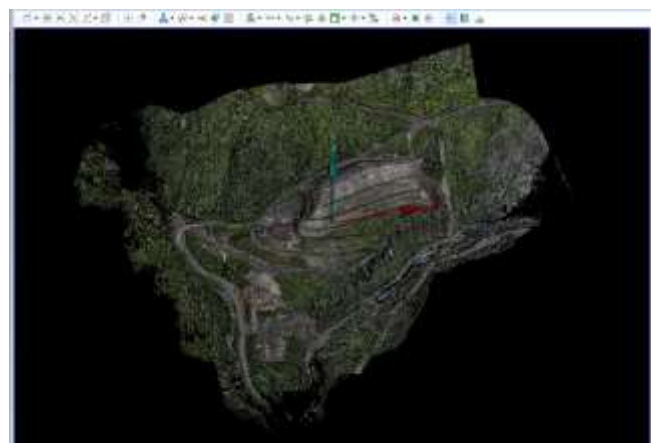
Pada tinggi terbang 150 m, sebaran *point cloud* terlihat tidak serapat tinggi terbang 100 m. Meskipun demikian, bentuk permukaan tanah masih dapat terlihat dengan baik. Berkurangnya jumlah titik mulai terlihat pada beberapa bagian tepi area akuisisi.



**Gambar 9.** *Point cloud* tinggi terbang 150 m.

### 3.1.3 Visualisasi *Point cloud* Tinggi Terbang 200 m

Untuk ketinggian terbang 200 m, jumlah titik yang terlihat pada *point cloud* paling sedikit dibandingkan tinggi terbang 100 m dan 150 m. Kondisi ini membuat detail permukaan tanah tidak terlihat sejelas pada dua skenario sebelumnya.

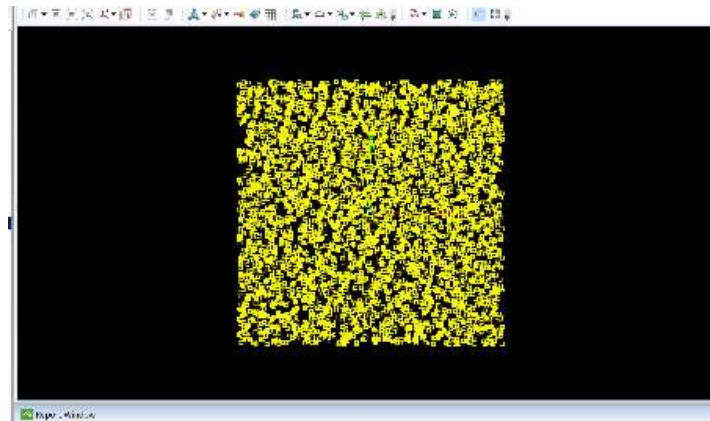


**Gambar 10.** *Point cloud* tinggi terbang 200 m.

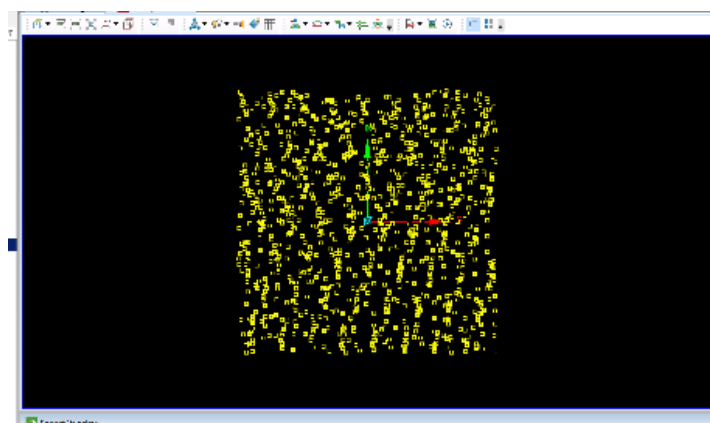
Dari hasil visualisasi terlihat bahwa detail *point cloud* cenderung berkurang seiring bertambahnya tinggi terbang. Perbedaan tersebut kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan *point density* dan *point spacing* pada setiap variasi tinggi terbang.

### 3.2 Analisis *Point density* dan *Point spacing*

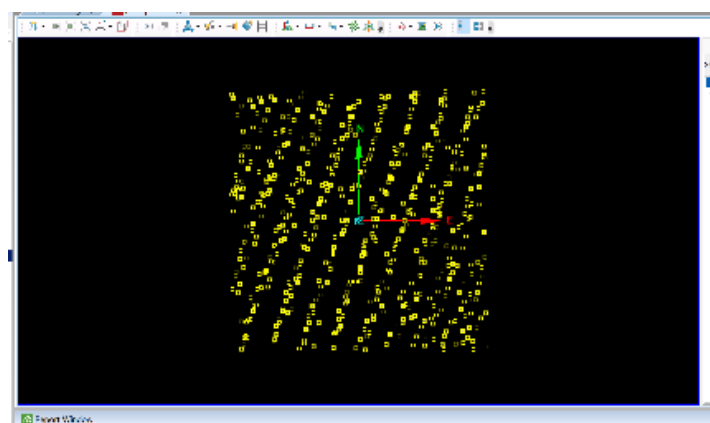
Perbandingan dilakukan pada area sampel seluas 4 m<sup>2</sup> untuk melihat perbedaan jumlah dan kerapatan titik pada setiap tinggi terbang.



**Gambar 11.** Sebaran titik area sampel tinggi terbang 100 m



**Gambar 12.** Sebaran titik area sampel tinggi terbang 150 m



**Gambar 13.** Sebaran titik area sampel tinggi terbang 200 m

Berdasarkan **Gambar 11 - Gambar 13**, terlihat bahwa jumlah titik semakin berkurang dengan bertambahnya tinggi terbang. Area sampel tinggi terbang 100 m terlihat paling rapat, sedangkan pada tinggi terbang 200 m terlihat paling jarang. Perbedaan tersebut kemudian dihitung menggunakan *point density* dan *point spacing* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai *point spacing* dihitung dalam satuan meter berdasarkan Persamaan (2), kemudian dikonversi ke sentimeter agar lebih mudah dipahami.

**Tabel 3.** Nilai *Point Density* dan *Point Spacing*.

| No | Tinggi Terbang (m) | Luas Sampel (m <sup>2</sup> ) | Jumlah Titik | <i>Point density</i> (point/m <sup>2</sup> ) | <i>Point spacing</i> (cm) |
|----|--------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------------------|---------------------------|
| 1  | 100                | 4                             | 4497         | 1124.25                                      | 2.98                      |
| 2  | 150                | 4                             | 1082         | 270.5                                        | 6.08                      |
| 3  | 200                | 4                             | 623          | 155.75                                       | 8.01                      |

Sumber: Hasil pengolahan data (2026)

Hasil perhitungan dapat dilihat pada **Tabel 3**, *point density* tertinggi diperoleh pada tinggi terbang 100 m sebesar 1124,25 points/m<sup>2</sup> dengan *point spacing* 2,98 cm. Pada tinggi terbang 150 m, *point density* turun menjadi 270,50 points/m<sup>2</sup> dengan *point spacing* 6,08 cm. Pada tinggi terbang 200 m, *point density* kembali turun menjadi 155,75 points/m<sup>2</sup> dan *point spacing* meningkat menjadi 8,01 cm.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi UAV terbang, semakin sedikit jumlah titik yang diperoleh dalam area yang sama. Kondisi ini menyebabkan jarak antar titik menjadi lebih besar dan detail permukaan yang terekam menjadi berkurang.

Peningkatan tinggi terbang dari 100 m menjadi 200 m menyebabkan *point density* turun sekitar 86,15%, sedangkan *point spacing* meningkat sekitar 168,79%. Hasil ini menunjukkan bahwa tinggi terbang mempengaruhi kerapatan titik data LiDAR. Semakin tinggi UAV terbang, jumlah titik yang diperoleh semakin berkurang. Hasil yang sama juga ditemukan oleh Sofonia et al. [2] dan Bakuła et al. [3]. Selain mempengaruhi kerapatan titik, tinggi terbang juga dapat mempengaruhi akurasi model permukaan. Oleh karena itu, evaluasi akurasi dilakukan menggunakan parameter RMSE.

### 3.3 Evaluasi Akurasi Model Permukaan Berdasarkan RMSE

Akurasi model permukaan dievaluasi menggunakan data *Independent Control Point* (ICP). GCP digunakan untuk proses georeferensi, sedangkan ICP digunakan untuk uji akurasi. Nilai akurasi dihitung menggunakan RMSE horizontal radial (RMSE<sub>r</sub>) dan RMSE vertikal (RMSE<sub>z</sub>), kemudian digunakan untuk menghitung akurasi horizontal dan vertikal berdasarkan standar ASPRS [10].

**Tabel 4.** Hasil Evaluasi Akurasi Model Permukaan

| Tinggi Terbang (m) | RMSE <sub>x</sub> (m) | RMSE <sub>y</sub> (m) | RMSE <sub>r</sub> (m) | RMSE <sub>z</sub> (m) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 100                | 0.062                 | 0.016                 | 0.064                 | 0.038                 |
| 150                | 0.054                 | 0.046                 | 0.071                 | 0.065                 |
| 200                | 0.06                  | 0.038                 | 0.071                 | 0.124                 |

Sumber: Hasil pengolahan data (2026)

#### 3.3.1 Analisis RMSE pada Tinggi Terbang 100m

Pada Tabel 4 ketinggian terbang 100 m diperoleh RMSE<sub>r</sub> sebesar 0,064 m dan RMSE<sub>z</sub> sebesar 0,038 m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa akurasi horizontal dan vertikal tinggi terbang 100 m cukup baik. Hal ini juga didukung oleh kerapatan titik yang lebih tinggi dibandingkan dua skenario lainnya.

#### 3.3.2 Analisis RMSE pada Tinggi Terbang 150m

Pada tinggi terbang 150 m diperoleh RMSE<sub>r</sub> sebesar 0,071 m dan RMSE<sub>z</sub> sebesar 0,065 m. Dibandingkan dengan tinggi terbang 100 m, nilai RMSE vertikal mengalami peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi vertikal mulai menurun seiring berkurangnya kerapatan titik.

#### 3.3.3 Analisis RMSE pada Tinggi Terbang 200m

Pada tinggi terbang 200 m diperoleh RMSE<sub>r</sub> sebesar 0,071 m dan RMSE<sub>z</sub> sebesar 0,124 m. Nilai RMSE<sub>z</sub> pada skenario ini merupakan yang terbesar dibandingkan dua skenario lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi vertikal menurun pada tinggi terbang yang lebih tinggi.

Nilai RMSE<sub>r</sub> pada ketiga variasi tinggi terbang tidak menunjukkan perbedaan yang besar, yaitu berkisar antara 0,064 m hingga 0,071 m. Nilai dari RMSE<sub>z</sub> terus meningkat dari 0,038 m pada tinggi terbang 100 m, menjadi 0,065 m tinggi terbang 150 m dan 0,124 m tinggi terbang 200 m. Hasil ini menunjukkan bahwa tinggi terbang lebih berpengaruh terhadap akurasi vertikal dibandingkan akurasi horizontal. Kondisi ini terjadi bersamaan dengan menurunnya *point density* dan meningkatnya *point spacing* [2].

### 3.4 Evaluasi Akurasi Berdasarkan Standar ASPRS

Nilai RMSE kemudian digunakan untuk menghitung akurasi horizontal dan vertikal pada tingkat kepercayaan 95% berdasarkan standar ASPRS [10]. Akurasi horizontal dihitung menggunakan RMSE<sub>r</sub>, sedangkan akurasi vertikal dihitung menggunakan RMSE<sub>z</sub>.

**Tabel 5.** Akurasi Berdasarkan Standar ASPRS

| Tinggi Terbang (m) | Akurasi Horizontal 95% (m) | Akurasi Vertikal 95% (m) |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| 100                | 0.11                       | 0.075                    |
| 150                | 0.124                      | 0.128                    |
| 200                | 0.124                      | 0.243                    |

Sumber: Hasil pengolahan data 2026, diolah berdasarkan ASPRS (2014).

Pada **Tabel 5** bahwa nilai akurasi horizontal pada ketiga variasi tinggi terbang tidak menunjukkan perbedaan yang besar, yaitu berkisar antara 0,110 m hingga 0,124 m. Hal ini menunjukkan bahwa tinggi terbang tidak banyak mempengaruhi akurasi horizontal. Sedangkan untuk nilai akurasi vertikal terus meningkat dari 0,075 m pada tinggi terbang 100 m menjadi 0,128 m pada tinggi terbang 150 m dan 0,243 m pada tinggi terbang 200 m. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang lebih berpengaruh terhadap akurasi vertikal. Peningkatan nilai RMSEz terjadi bersamaan dengan penurunan *point density* dan peningkatan *point spacing* [2,3].

### 3.5 Interpretasi Ketelitian Berdasarkan BIG No.15 Tahun 2014

Nilai akurasi yang diperoleh kemudian dihitung menjadi CE90 dan LE90 berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 [8]. Nilai CE90 digunakan untuk ketelitian horizontal, sedangkan LE90 digunakan untuk ketelitian vertikal. Ketentuan ketelitian peta RBI yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 6**.

**Tabel 6.** Standar Ketelitian Peta RBI

| No. | Skala       | Interval kontur (m) | Ketelitian Peta RBI       |                         |                           |                         |                           |                         |
|-----|-------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
|     |             |                     | Kelas 1                   |                         | Kelas 2                   |                         | Kelas 3                   |                         |
|     |             |                     | Horizontal (CE90 dalam m) | Vertikal (LE90 dalam m) | Horizontal (CE90 dalam m) | Vertikal (LE90 dalam m) | Horizontal (CE90 dalam m) | Vertikal (LE90 dalam m) |
| 1.  | 1:1.000.000 | 400                 | 200                       | 200                     | 300                       | 300,00                  | 500                       | 500,00                  |
| 2.  | 1:500.000   | 200                 | 100                       | 100                     | 150                       | 150,00                  | 250                       | 250,00                  |
| 3.  | 1:250.000   | 100                 | 50                        | 50                      | 75                        | 75,00                   | 125                       | 125,00                  |
| 4.  | 1:100.000   | 40                  | 20                        | 20                      | 30                        | 30,00                   | 50                        | 50,00                   |
| 5.  | 1:50.000    | 20                  | 10                        | 10                      | 15                        | 15,00                   | 25                        | 25,00                   |
| 6.  | 1:25.000    | 10                  | 5                         | 5                       | 7,5                       | 7,50                    | 12,5                      | 12,50                   |
| 7.  | 1:10.000    | 4                   | 2                         | 2                       | 3                         | 3,00                    | 5                         | 5,00                    |
| 8.  | 1:5.000     | 2                   | 1                         | 1                       | 1,5                       | 1,50                    | 2,5                       | 2,50                    |
| 9.  | 1:2.500     | 1                   | 0,5                       | 0,5                     | 0,75                      | 0,75                    | 1,25                      | 1,25                    |
| 10. | 1:1.000     | 0,4                 | 0,2                       | 0,2                     | 0,3                       | 0,30                    | 0,5                       | 0,50                    |

Sumber: Peraturan BIG Nomor 15 Tahun 2014

Nilai CE90 dan LE90 dihitung menggunakan RMSEr dan RMSEz. Hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Nilai CE90 Dan LE90

| Tinggi Terbang (m) | CE90 (m) | LE90 (m) |
|--------------------|----------|----------|
| 100                | 0.097    | 0.063    |
| 150                | 0.108    | 0.108    |
| 200                | 0.108    | 0.205    |

Sumber: Hasil pengolahan data 2026, diolah berdasarkan BIG No.15 Tahun 2014.

Nilai CE90 pada ketiga tinggi terbang tidak berbeda jauh, yaitu antara 0,097 m hingga 0,108 m (**Tabel 7**). Sementara itu, nilai LE90 meningkat dari 0,063 m pada tinggi terbang 100 m menjadi 0,205 m pada tinggi terbang 200 m. Dari hasil tersebut terlihat bahwa perubahan tinggi terbang lebih mempengaruhi ketelitian vertikal dibandingkan ketelitian horizontal.

**Tabel 8.** Kelas Ketelitian Berdasarkan BIG No. 15 Tahun 2014.

| Tinggi Terbang (m) | Kelas Ketelitian      |
|--------------------|-----------------------|
| 100                | Skala 1:1.000 Kelas 1 |
| 150                | Skala 1:1.000 Kelas 1 |
| 200                | Skala 1:1.000 Kelas 2 |

Sumber: Hasil pengolahan data 2026, diolah berdasarkan BIG No.15 Tahun 2014.

Hasil klasifikasi **Tabel 8** menunjukkan bahwa tinggi terbang 100 m dan 150 m memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 1. Sementara itu, tinggi terbang 200 m hanya memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 2 karena nilai LE90 sudah melebihi batas kelas 1.

#### 4. Kesimpulan

Peningkatan tinggi terbang UAV LiDAR dari 100 m menjadi 200 m menyebabkan *point density* menurun dari 1124,25 points/m<sup>2</sup> menjadi 155,75 points/m<sup>2</sup>, sedangkan *point spacing* meningkat dari 2,98 cm menjadi 8,01 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi UAV terbang, semakin berkurang kerapatan titik yang diperoleh.

Tinggi terbang tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap akurasi horizontal, yang ditunjukkan oleh nilai RMSEr yang relatif stabil antara 0,064 m hingga 0,071 m. Nilai dari RMSEz meningkat dari 0,038 m menjadi 0,124 m sehingga menunjukkan bahwa tinggi terbang lebih berpengaruh terhadap akurasi vertikal.

Berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014, hasil pemetaan tinggi terbang 100 m dan 150 m memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 1, sedangkan tinggi terbang 200 m memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 2. Dengan demikian, tinggi terbang yang lebih rendah menghasilkan akurasi yang lebih baik, sedangkan tinggi terbang yang lebih tinggi dapat menjadi pilihan ketika efisiensi akuisisi dan pengolahan data lebih diprioritaskan.

Penelitian ini hanya menggunakan satu jenis sensor UAV LiDAR, satu lokasi penelitian, dan tiga variasi tinggi terbang. Oleh karena itu, penelitian lanjutan pada kondisi *terrain* dan konfigurasi penerbangan yang berbeda masih perlu dilakukan.

#### 5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Freeport Indonesia, khususnya Underground Survey Technical Service, atas dukungan data dan fasilitas penelitian, serta kepada Soni Darmawan, atas bimbingan dan arahan selama penelitian.

#### 6. Singkatan

|       |                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------|
| UAV   | Unmanned Aerial Vehicle                                |
| LiDAR | Light Detection and Ranging                            |
| DTM   | Digital Terrain Model                                  |
| GCP   | Ground Control Point                                   |
| ICP   | Independent Control Point                              |
| GNSS  | Global Navigation Satellite System                     |
| RTK   | Real-Time Kinematic                                    |
| RMSE  | Root Mean Square Error                                 |
| RMSEr | Horizontal Radial Root Mean Square Error               |
| RMSEz | Vertical Root Mean Square Error                        |
| CE90  | Circular Error 90%                                     |
| LE90  | Linear Error 90%                                       |
| ASPRS | American Society for Photogrammetry and Remote Sensing |
| BIG   | Badan Informasi Geospasial                             |

#### 7. Referensi

- [1] C. H. Singh, V. Mishra, and K. Jain, "High-resolution mapping of forested hills using real-time UAV terrain following," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. X-1/W1, pp. 665-671, 2023.
- [2] J. J. Sofonia, S. Phinn, C. Roelfsema, F. Kendoul, and Y. Rist, "Modelling the effects of fundamental UAV flight parameters on LiDAR point clouds to facilitate objectives-based planning," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 149, pp. 105-118, 2019.
- [3] K. Bakula, M. Pilarska, W. Ostrowski, A. Nowicki, and Z. Kurczyński, "UAV LiDAR data processing: Influence of flight height on geometric accuracy, radiometric information and parameter setting in DTM production," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLIII-B1, pp. 21-26, 2020.

- [4] M. Kucharczyk, C. H. Hugenholtz, and X. Zou, "UAV-LiDAR accuracy in vegetated terrain," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 212-234, 2018.
- [5] P. Bartmiński, M. Siłuch, and W. Kociuba, "The Effectiveness of a UAV-Based LiDAR Survey to Develop Digital Terrain Models and Topographic Texture Analyses," *Sensors*, vol. 23, no. 14, p. 6415, 2023, doi: 10.3390/s23146415.
- [6] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), *ASPRS Guidelines on Quantifying Horizontal Sampling Density of Aerial Lidar Point cloud Data*, Edition 1, Version 1.0, Bethesda, MD, USA, 2025.
- [7] H. A. Lassiter, B. Wilkinson, A. Gonzalez Perez, and C. Kelly, "Absolute 3D Accuracy Assessment of UAS LiDAR Surveying," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLIV-M-3, pp. 105-111, 2021.
- [8] Badan Informasi Geospasial, *Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar*. Cibinong, Indonesia: BIG, 2014.
- [9] V. Petras, A. Petrasova, J. B. McCarter, H. Mitasova, and R. K. Meentemeyer, "Point density Variations in Airborne LiDAR Point Clouds," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1593, 2023.
- [10] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, "ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 81, no. 3, pp. A1-A26, 2014.
- [11] S. Darmawan et al., "Penerapan Metode Fotogrametri Jarak Dekat Kombinasi Data Unmanned Aerial Vehicle untuk Pembuatan Model 3D," *Prosiding Seminar Nasional ITENAS ke-46*, Bandung, Indonesia, 2018.
- [12] N. A. Fuad, Z. Ismail, Z. Majid, N. Darwin, M. F. M. Ariff, K. M. Idris, and A. R. Yusoff, "Accuracy evaluation of digital terrain model based on different flying altitudes and conditional of terrain using UAV LiDAR technology," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 169, p. 012100, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/169/1/012100.
- [13] H. Abdel Maksoud, T. Abdel Aziz, A. S. Elsharkawy, and O. Moursy, "Advanced Techniques for Precision Assessment in UAV LiDAR Systems," *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, vol. 8, no. 2, pp. 90–107, 2025.
- [14] U.S. Geological Survey, "Topographic Data Quality Levels (QLs)," U.S. Geological Survey, 2025. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov>. [Accessed: Jul. 2026].
- [15] A. Salach, K. Bakula, M. Pilarska, W. Ostrowski, K. Górski, and Z. Kurczyński, "Accuracy Assessment of Point Clouds from LiDAR and Dense Image Matching Acquired Using the UAV Platform for DTM Creation," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, no. 9, p. 342, 2018, doi: 10.3390/ijgi7090342.