

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

Soni Darmawan^a, Zakki Sulistyawan^{b*}

^aTeknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional, Jl. PKH. Mustapha No. 23, Bandung 40124

^bUnderground Survey Technical Service, PT. Freeport Indonesia, Tembagapura Papua Tengah, 99967, Indonesia.

* Korespondensi Penulis: zsulisty@fmi.com



Dikirim: 17 Juli 2026

Diterima: 20 Agustus 2026

Diterbitkan: 7 September 2026

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 dievaluasi menggunakan *point density* dan *point spacing*, sedangkan akurasi model permukaan dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) berdasarkan *Independent Control Point* (ICP). Pada tinggi terbang 100 m diperoleh RMSE horizontal radial (RMSEr) sebesar 0,064 m dan RMSE vertikal (RMSEz) sebesar 0,038 m. Pada tinggi terbang 150 m diperoleh RMSEr sebesar 0,071 m dan RMSEz sebesar 0,065 m, sedangkan pada tinggi terbang 200 m diperoleh RMSEr sebesar 0,071 m dan RMSEz sebesar 0,124 m. Peningkatan tinggi terbang diikuti oleh penurunan *point density* dari 281,06 points/m² menjadi 38,94 points/m² serta peningkatan *point spacing* dari 5,96 cm menjadi 16,03 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang lebih berpengaruh terhadap ketelitian vertikal dibandingkan ketelitian horizontal model permukaan. Berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014, 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. Seluruh variasi tinggi terbang yang diuji masih dapat digunakan untuk pemetaan topografi pada kawasan pertambangan dengan tingkat ketelitian yang berbeda. Tinggi terbang 200 m menghasilkan ukuran data paling kecil dengan *raw data* sebesar 2,08 GB dan *point cloud* sebesar 2,30 GB, sedangkan tinggi terbang 100 m menghasilkan *raw data* sebesar 5,70 GB dan *point cloud* sebesar 8,41 GB.

Kata kunci: akurasi model permukaan; BIG No.15 Tahun 2014; point density; terrain terjal; tinggi terbang; UAV LiDAR

Analysis of UAV LiDAR Flight Altitude Effects on Surface Model Accuracy in Steep Terrain Mining Areas

Abstract. This study investigates the effect of UAV LiDAR flight altitude on surface model accuracy in steep terrain mining areas. Data acquisition was conducted at flight altitudes of 100 m, 150 m, and 200 m above ground level. Point cloud characteristics were evaluated using point density and point spacing, while surface model accuracy was assessed using the Root Mean Square Error (RMSE) based on Independent Control Points (ICPs). At a flight altitude of 100 m, the horizontal radial RMSE (RMSEr) and vertical RMSE (RMSEz) were 0.064 m and 0.038 m, respectively. At 150 m, the RMSEr and RMSEz values were 0.071 m and 0.065 m, while at 200 m, the RMSEr remained 0.071 m and the RMSEz increased to 0.124 m. Increasing flight altitude reduced point density from 281.06 points/m² to 38.94 points/m² and increased point spacing from 5.96 cm to 16.03 cm. The results indicate that flight altitude has a greater influence on vertical accuracy than on horizontal accuracy. Based on the accuracy classification of the Indonesian Geospatial Information Agency (BIG) Regulation No. 15 of 2014, the 100 m and 150 m flight altitudes met the requirements for a 1:1,000 Class 1 base map, whereas the 200 m flight altitude met the requirements for a 1:1,000 Class 2 base map. All tested flight altitudes remain suitable for topographic mapping in mining areas with different

accuracy requirements. In addition, the 200 m flight altitude produced the smallest dataset, with 2.08 GB of raw data and 2.30 GB of point cloud data, compared to 5.70 GB and 8.41 GB, respectively, at the 100 m flight altitude.

Keywords: BIG accuracy standard; flight altitude; point density; steep terrain; surface model accuracy; UAV LiDAR

I. PENDAHULUAN

Pemetaan topografi pada wilayah bertopografi terjal memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi akibat perubahan elevasi yang tajam dan kemiringan lereng yang curam [1]. Metode survei konvensional sering mengalami keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi permukaan secara akurat pada medan dengan variasi topografi yang signifikan [1]. Teknologi UAV LiDAR menjadi salah satu solusi karena mampu menghasilkan data *point cloud* dengan kerapatan tinggi dan akurasi yang baik pada kondisi medan yang kompleks [2,3]. Namun, kualitas data yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa parameter akuisisi, salah satunya adalah tinggi terbang UAV [3]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang dapat menurunkan *point density* dan meningkatkan *point spacing*, sehingga berpengaruh terhadap kualitas model permukaan [2]. Pada kawasan pertambangan dengan terrain terjal, pengaruh tersebut menjadi penting karena perubahan elevasi yang besar dapat mempengaruhi kualitas data yang diperoleh.

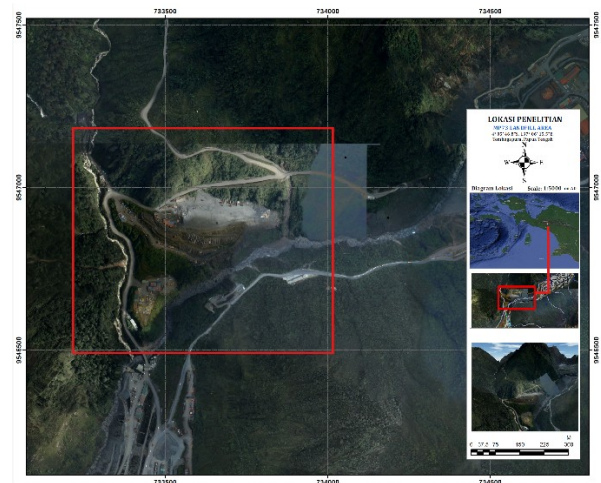
Kondisi terrain terjal ditandai oleh perubahan elevasi yang signifikan dalam jarak yang relatif pendek sehingga proses akuisisi data memerlukan metode penerbangan yang mampu menyesuaikan perubahan topografi secara efektif. Penelitian ini menggunakan metode *terrain following*, yaitu metode penerbangan yang mempertahankan ketinggian relatif sensor terhadap permukaan tanah selama proses akuisisi data. Metode tersebut dipilih karena mampu mengakomodasi perubahan elevasi yang signifikan sehingga distribusi titik hasil pengukuran dapat dipertahankan secara lebih konsisten pada seluruh area survei [1]. Evaluasi kualitas data dilakukan melalui analisis *point density* dan *point spacing*, sedangkan akurasi model permukaan dievaluasi menggunakan *Independent Control Point* (ICP) dan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) yang mengacu pada standar ASPRS [7,10].

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa variasi tinggi terbang UAV LiDAR berpengaruh terhadap *point density*, *point spacing*, dan akurasi data yang dihasilkan [2,3]. Namun, penelitian serupa pada kawasan pertambangan dengan terrain terjal masih relatif terbatas, terutama yang mengevaluasi hubungan antara karakteristik *point cloud* dan akurasi model permukaan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi tinggi terbang UAV LiDAR terhadap *point density*, *point spacing*, dan akurasi model permukaan pada terrain terjal kawasan pertambangan.

II. METODOLOGI

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 MP 73 Landfill Area, 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. Analisis batas area terbang (*boundary*) serta aspek keselamatan penerbangan dilakukan menggunakan perangkat lunak Deswik.CAD. Selanjutnya, jalur terbang dirancang menggunakan Mission Planner dengan mempertimbangkan kondisi terrain pada lokasi penelitian.

Metode penerbangan yang digunakan adalah *terrain following*, yaitu metode yang mempertahankan ketinggian relatif UAV terhadap permukaan tanah berdasarkan *Digital Terrain Model* (DTM) [1].

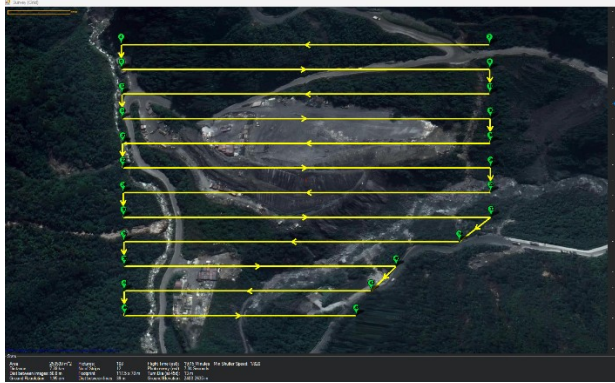
Dengan metode ini, variasi perubahan elevasi pada area penelitian dapat diikuti secara otomatis sehingga ketinggian sensor terhadap permukaan tanah tetap relatif konstan selama proses akuisisi data [1].

Untuk menganalisis pengaruh tinggi terbang terhadap kualitas data UAV LiDAR, perencanaan misi dilakukan

pada tiga variasi ketinggian terbang, yaitu 100 m, 150 m, dan 200 m di atas permukaan tanah. Jalur terbang yang sama digunakan pada setiap skenario agar perbedaan hasil yang diperoleh terutama disebabkan oleh variasi tinggi terbang.

TABEL 1. PARAMETER PERENCANAAN MISI UAV LiDAR

Parameter	100m	150m	200m
Metode	Terrain Following	Terrain Following	Terrain Following
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



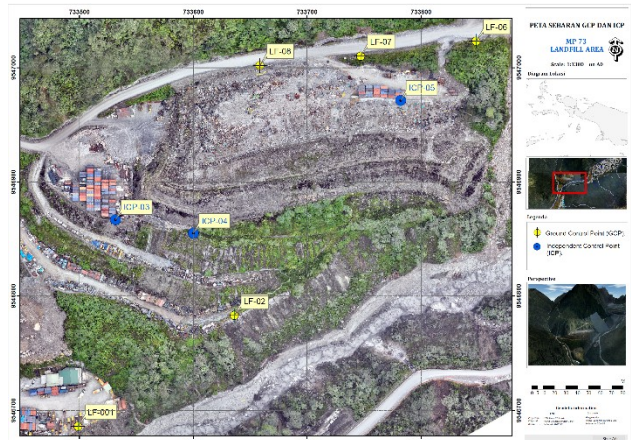
Gambar 2. Jalur terbang UAV LiDAR dengan metode terrain following pada area penelitian.

Jalur terbang dirancang menggunakan pola penerbangan paralel (*lawn mower pattern*) untuk memastikan cakupan area penelitian secara menyeluruh. Perencanaan dilakukan menggunakan Mission Planner dengan metode *terrain following* sehingga ketinggian relatif UAV terhadap permukaan tanah dapat dipertahankan selama proses akuisisi. Dalam penelitian ini digunakan tiga variasi tinggi terbang, yaitu 100 m, 150 m, dan 200 m di atas permukaan tanah. Jalur terbang, area cakupan, dan parameter misi lainnya dipertahankan sama pada setiap skenario, sedangkan parameter yang divariasikan hanya tinggi terbang.

2.3 Penentuan dan Pengukuran GCP

Sebanyak delapan titik kontrol ditempatkan pada area penelitian, yang terdiri atas lima *Ground Control Point* (GCP) dan tiga *Independent Control Point* (ICP). GCP digunakan untuk proses georeferensi model permukaan, sedangkan ICP digunakan untuk evaluasi akurasi model permukaan. Titik kontrol ditempatkan pada lokasi yang

terbuka dan mudah diidentifikasi untuk mendukung proses akuisisi serta validasi data UAV LiDAR. Sebaran titik kontrol dirancang agar mewakili seluruh area survei dan variasi topografi pada kawasan Landfill Mile 73, sehingga hasil evaluasi akurasi yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Gambar 3. Sebaran *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Control Point* (ICP) pada area penelitian.

Pengukuran koordinat GCP dan ICP dilakukan menggunakan GNSS RTK Leica Viva GS16 dengan metode *base-rover*. Pengamatan dilakukan hingga memperoleh status solusi *RTK Fixed* untuk menjamin ketelitian koordinat yang digunakan sebagai data referensi. Selama kegiatan pengukuran, satu titik *base station* digunakan sebagai titik referensi dan terhubung secara *real-time* dengan *receiver rover* pada setiap titik kontrol. Dokumentasi pengukuran serta hasil observasi koordinat dicatat dalam formulir pengukuran untuk memastikan keterlacakan dan validitas data hasil survei.

Gambar 4. Pengukuran koordinat GCP dan ICP menggunakan GNSS RTK Leica Viva GS16 dengan metode *base-rover*.

Hasil pengukuran menghasilkan koordinat planimetris dan elevasi untuk seluruh titik kontrol yang selanjutnya digunakan sebagai data referensi dalam evaluasi akurasi horizontal dan vertikal model permukaan hasil pengolahan UAV LiDAR [7].

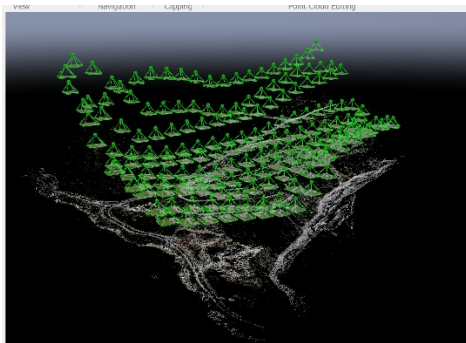
2.4 Akuisisi Data UAV LiDAR

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



Gambar 5. UAV DJI Matrice 400 yang dilengkapi sensor LiDAR DJI Zenmuse L2.

Pelaksanaan akuisisi mengacu pada jalur terbang yang telah direncanakan sebelumnya menggunakan Mission Planner dengan metode *terrain following*. Metode tersebut digunakan untuk mempertahankan ketinggian relatif UAV terhadap permukaan tanah pada area penelitian yang memiliki topografi terjal.



Gambar 6. Metode *Terrain Follow*.

Dalam penelitian ini dilakukan tiga skenario penerbangan dengan variasi tinggi terbang 100 m, 150 m, dan 200 m di atas permukaan tanah. Variasi tinggi terbang diterapkan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kerapatan titik (*point density*) dan akurasi model permukaan yang dihasilkan pada terrain terjal. Parameter penerbangan lainnya dipertahankan tetap sehingga perbedaan hasil yang diperoleh terutama disebabkan oleh perubahan tinggi terbang.

Selama proses akuisisi, sensor LiDAR merekam data *point cloud*, sedangkan sistem GNSS dan IMU pada wahana merekam data posisi serta orientasi sensor secara kontinu. Data hasil akuisisi terdiri atas data *point cloud* LiDAR, data GNSS, dan data IMU yang selanjutnya

digunakan dalam proses pengolahan dan evaluasi kualitas data.

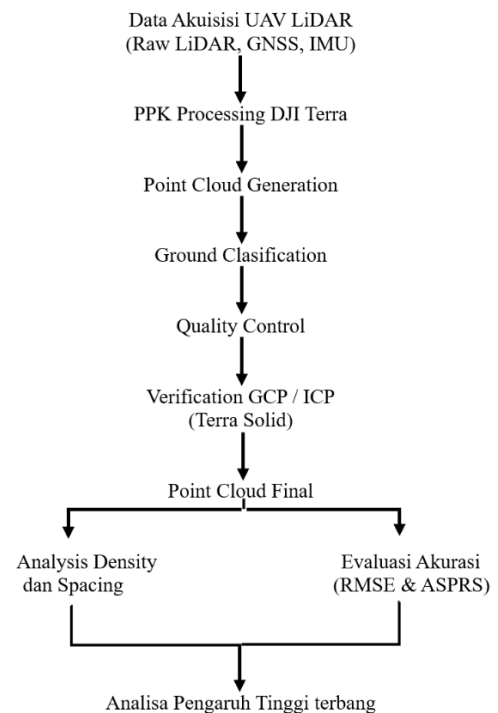
TABEL 2. VARIASI TINGGI TERBANG AKUISISI

Skenario	Tinggi Terbang
Misi 1	100 m
Misi 2	150 m
Misi 3	200 m

Selama proses penerbangan, sensor LiDAR melakukan perekaman data *point cloud* secara kontinu, sedangkan sistem GNSS dan IMU pada wahana merekam informasi posisi dan orientasi sensor. Data hasil akuisisi berupa data *point cloud*, data GNSS, dan data IMU yang selanjutnya digunakan pada tahap pengolahan data dan evaluasi kualitas hasil pemetaan.

2.5 Pengolahan Data Point Cloud

Data hasil akuisisi UAV LiDAR yang terdiri atas data LiDAR, GNSS, IMU, dan data RINEX base station diolah menggunakan perangkat lunak DJI Terra. Tahapan pengolahan meliputi pemrosesan PPK (*Post Processed Kinematic*), pembentukan *point cloud*, klasifikasi titik tanah (*ground classification*), dan pemeriksaan kualitas data. Selanjutnya dilakukan verifikasi menggunakan data GCP dan ICP sebagai titik evaluasi akurasi untuk memastikan kesesuaian posisi *point cloud* terhadap kondisi lapangan. *Point cloud* hasil pengolahan kemudian digunakan untuk analisis kerapatan titik, *point spacing*, dan evaluasi akurasi model permukaan.



Gambar 7. Diagram alir pengolahan data UAV LiDAR

Hasil akhir dari tahapan pengolahan berupa *point cloud* tiga dimensi dalam format LAS yang telah melalui proses georeferensi, klasifikasi, dan verifikasi kualitas. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis pengaruh variasi tinggi terbang terhadap kerapatan titik dan akurasi model permukaan.

2.6 Analisis Point Density dan Point Spacing

Analisis kerapatan titik (*point density*) dan jarak antar titik (*point spacing*) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi tinggi terbang UAV LiDAR terhadap distribusi titik hasil akuisisi. Kerapatan titik merupakan jumlah titik LiDAR yang terdapat dalam satu satuan luas [6], sedangkan *point spacing* merupakan jarak rata-rata antar titik pada permukaan [6]. Kedua parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan tingkat detail spasial yang dapat direpresentasikan oleh 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^2)

Rumus *point spacing*:

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

Keterangan:

- *point density* dalam points/m^2
- *point spacing* dalam meter

Nilai *point density* digunakan untuk menggambarkan tingkat kerapatan distribusi titik hasil akuisisi LiDAR. Semakin tinggi nilai *point density*, semakin banyak titik yang tersedia untuk merepresentasikan permukaan objek. Sebaliknya, *point spacing* menunjukkan jarak rata-rata antar titik LiDAR pada permukaan. Nilai *point spacing* yang lebih kecil menunjukkan distribusi titik yang lebih rapat sehingga detail permukaan dapat direpresentasikan dengan lebih baik.

Perhitungan *point density* dan *point spacing* dilakukan secara terpisah pada masing-masing variasi tinggi terbang, yaitu 100 m, 150 m, dan 200 m. Metode analisis yang sama diterapkan pada seluruh skenario penerbangan dengan parameter selain tinggi terbang dipertahankan tetap. Analisis dilakukan secara komparatif dengan membandingkan nilai *point density* dan *point spacing* pada setiap skenario penerbangan untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik *point cloud* akibat variasi tinggi terbang. Hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi hubungannya terhadap akurasi model permukaan pada masing-masing skenario penerbangan.

2.7 Evaluasi Akurasi Model Permukaan (RMSE)

Evaluasi akurasi model permukaan dilakukan dengan membandingkan koordinat dan elevasi hasil pengolahan UAV LiDAR terhadap data referensi *Independent Control Point* (ICP) [8,10]. *Ground Control Point* (GCP) digunakan pada proses georeferensi model permukaan, sedangkan ICP digunakan sebagai titik uji *independent* dalam evaluasi akurasi. Nilai akurasi dihitung menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) yang mengacu pada standar ASPRS *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* [10].

2.7.1 Perhitungan RMSE Horizontal dan Vertikal

Akurasi horizontal dihitung berdasarkan selisih koordinat hasil pengolahan UAV LiDAR terhadap koordinat referensi titik kontrol pada komponen X dan Y. Nilai RMSE horizontal dihitung menggunakan komponen RMSE_x dan RMSE_y yang diperoleh dari selisih koordinat *Easting* dan *Northing* [10].

RMSE_x

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

RMSE_y

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

dimana:

- RMSE_x = *Root Mean Square Error* arah X
- RMSE_y = *Root Mean Square Error* arah Y
- ΔX = selisih koordinat *Easting*
- ΔY = selisih koordinat *Northing*
- n = jumlah titik uji

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

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

dimana:

- RMSE_z = *Root Mean Square Error* elevasi
- ΔZ = selisih elevasi
- n = jumlah titik uji

2.7.2 Perhitungan RMSE_r dan Akurasi Berdasarkan ASPRS

Untuk memperoleh ketelitian horizontal secara keseluruhan, RMSE_x dan RMSE_y dikombinasikan menjadi RMSE radial (RMSE_r).

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

Nilai RMSE_r digunakan sebagai dasar evaluasi akurasi horizontal berdasarkan standar ASPRS.

Mengacu pada ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, nilai RMSE dikonversi menjadi akurasi pada tingkat kepercayaan 95%. Akurasi horizontal dihitung menggunakan RMSE_r, sedangkan akurasi vertikal dihitung menggunakan RMSE_z [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

Hasil akurasi horizontal dan vertikal yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan klasifikasi ketelitian peta dasar berdasarkan Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014. Standar ini digunakan sebagai acuan nasional untuk menentukan kesesuaian hasil pemetaan UAV LiDAR terhadap kelas ketelitian peta RBI yang berlaku di Indonesia [8].

TABEL 3. KETELITIAN GEOMETRI PETA RBI BERDASARKAN PERATURAN KEPALA BIG NOMOR 15 TAHUN 2014

Ketelitian	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
Horizontal	0,2 mm × bilangan skala	0,3 mm × bilangan skala	0,5 mm × bilangan skala
Vertikal	0,5 × interval	1,5 × kelas 1	2,5 × kelas 1

Perhitungan RMSE_x, RMSE_y, RMSE_z, dan RMSE_r dilakukan pada masing-masing variasi tinggi terbang, yaitu 100 m, 150 m, dan 200 m. Nilai RMSE selanjutnya dikonversi menjadi akurasi horizontal dan vertikal pada tingkat kepercayaan 95% mengacu pada ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Nilai akurasi tersebut kemudian dibandingkan dengan ketentuan ketelitian geometri peta dasar berdasarkan Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 untuk mengetahui kelas ketelitian hasil pemetaan UAV LiDAR yang diperoleh.

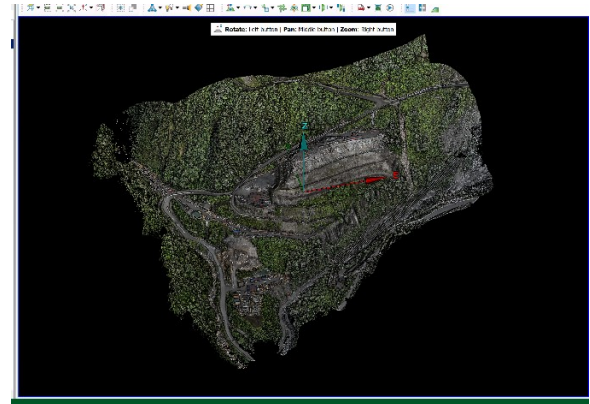
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Visualisasi Point Cloud Berdasarkan Tinggi Terbang

Visualisasi *point cloud* dilakukan untuk melihat perbedaan karakteristik distribusi titik hasil akuisisi UAV LiDAR pada setiap variasi tinggi terbang. Pada penelitian ini, visualisasi dilakukan pada tiga skenario tinggi terbang, yaitu 100 m, 150 m, dan 200 m. Perbandingan visual tersebut digunakan sebagai tahap awal untuk mengamati perubahan kerapatan titik dan tingkat detail representasi permukaan sebelum dilakukan analisis kuantitatif menggunakan *point density*, *point spacing*, dan RMSE.

3.1.1 Visualisasi Point Cloud pada Tinggi Terbang 100 m

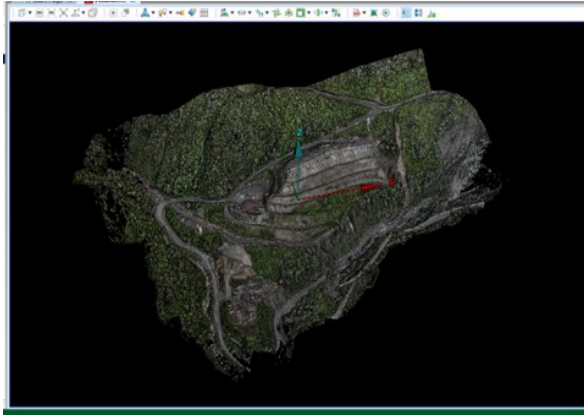
Pada tinggi terbang 100 m, distribusi *point cloud* terlihat lebih rapat dibandingkan skenario tinggi terbang lainnya. Kerapatan titik yang tinggi memungkinkan detail permukaan, seperti perubahan bentuk terrain dan batas morfologi permukaan, dapat direpresentasikan dengan lebih jelas. Kondisi ini menunjukkan bahwa tinggi terbang yang lebih rendah mampu menghasilkan tingkat detail spasial yang lebih baik pada area bertopografi terjal.



Gambar 8. Visualisasi *point cloud* hasil akuisisi UAV LiDAR pada tinggi terbang 100 m.

3.1.2 Visualisasi Point Cloud pada Tinggi Terbang 150 m

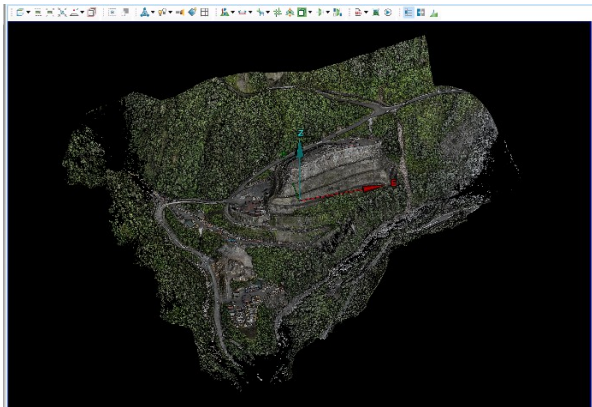
Pada tinggi terbang 150 m, distribusi *point cloud* mulai menunjukkan penurunan kerapatan dibandingkan tinggi terbang 100 m. Meskipun demikian, bentuk umum permukaan masih dapat dikenali dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang menyebabkan jarak antar titik mulai membesar, namun data yang dihasilkan masih mampu merepresentasikan kondisi topografi secara umum.



Gambar 9. Visualisasi *point cloud* hasil akuisisi UAV LiDAR pada tinggi terbang 150 m.

3.1.3 Visualisasi Point Cloud pada Tinggi Terbang 200 m

Pada tinggi terbang 200 m, distribusi *point cloud* terlihat lebih renggang dibandingkan skenario 100 m dan 150 m. Berkurangnya kerapatan titik menyebabkan detail permukaan yang terekam menjadi lebih terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang dapat menurunkan kemampuan *point cloud* dalam merepresentasikan detail permukaan, terutama pada wilayah dengan topografi kompleks.



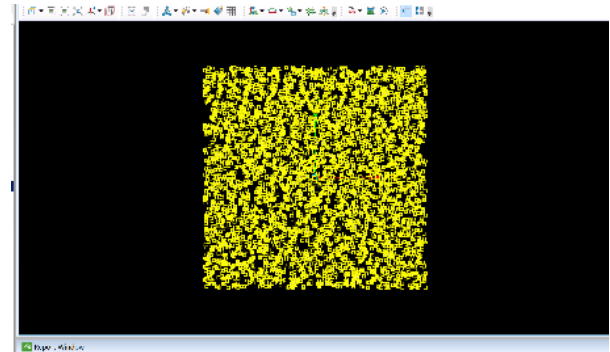
Gambar 10. Visualisasi *point cloud* hasil akuisisi UAV LiDAR pada tinggi terbang 200 m.

Berdasarkan ketiga visualisasi tersebut, terlihat bahwa peningkatan tinggi terbang UAV LiDAR menyebabkan distribusi titik menjadi semakin renggang. Kondisi ini mengindikasikan adanya penurunan kerapatan titik seiring bertambahnya tinggi terbang. Untuk memverifikasi interpretasi visual tersebut, dilakukan analisis kuantitatif menggunakan parameter *point density* dan *point spacing* pada setiap variasi tinggi terbang.

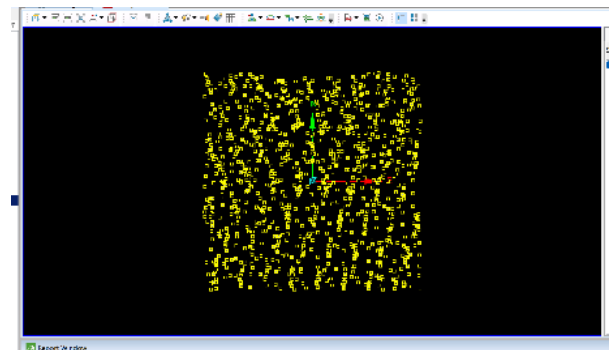
3.2 Analisis Point Density dan Point Spacing

Perbandingan distribusi titik pada area sampel dilakukan untuk melihat perubahan kerapatan titik secara

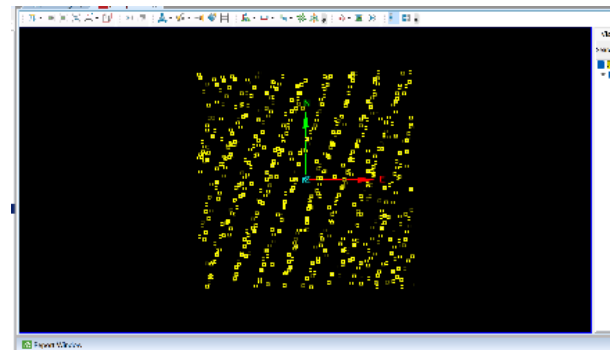
visual pada setiap variasi tinggi terbang. Area sampel yang digunakan memiliki luas yang sama, yaitu 16 m^2 ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$), sehingga perbedaan jumlah titik yang terekam dapat dibandingkan secara langsung antar skenario penerbangan.



Gambar 11. Visualisasi area sampel perhitungan *point density* pada tinggi terbang 100 m



Gambar 12. Visualisasi area sampel perhitungan *point density* pada tinggi terbang 150 m



Gambar 13. Visualisasi area sampel perhitungan *point density* pada tinggi terbang 200 m

Hasil visualisasi pada Gambar 9, Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan bahwa distribusi titik pada tinggi terbang 100 m terlihat paling rapat dibandingkan tinggi terbang 150 m dan 200 m. Pada tinggi terbang 150 m, sebaran titik mulai berkurang, sedangkan pada tinggi terbang 200 m distribusi titik tampak lebih renggang. Perbedaan visual tersebut kemudian dihitung secara kuantitatif melalui nilai *point density* dan *point spacing*

sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai *point spacing* dihitung dalam satuan meter berdasarkan persamaan (x) dan selanjutnya dikonversi ke sentimeter untuk memudahkan interpretasi hasil.

TABEL 4. KARAKTERISTIK POINT CLOUD BERDASARKAN AREA SAMPEL 16 m²

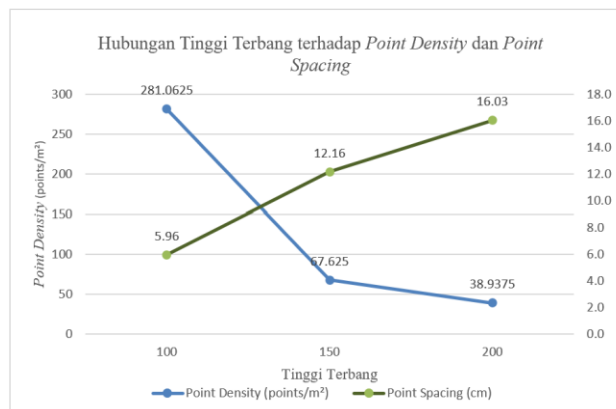
Hasil Perhitungan Point Density dan Point Spacing					
No	Tinggi Terbang (m)	Luas Sampel (m ²)	Jumlah Titik	Point Density (points/m ²)	Point Spacing (cm)
1	100	16	4497	281.0625	5.96
2	150	16	1082	67.625	12.16
3	200	16	623	38.9375	16.03

Sumber: Hasil pengolahan data, 2026

Berdasarkan Tabel 4, nilai *point density* tertinggi diperoleh pada tinggi terbang 100 m, yaitu sebesar 281,06 points/m² dengan *point spacing* sebesar 5,96 cm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa distribusi titik pada skenario 100 m paling rapat dibandingkan skenario lainnya.

Pada tinggi terbang 150 m, jumlah titik menurun menjadi 1082 titik dengan *point density* sebesar 67,63 points/m² dan *point spacing* sebesar 12,16 cm. Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang menyebabkan jumlah titik per satuan luas mengalami penurunan cukup besar. Pada tinggi terbang 200 m, jumlah titik kembali menurun menjadi 623 titik dengan *point density* sebesar 38,94 points/m² dan *point spacing* sebesar 16,03 cm. Kondisi ini menunjukkan distribusi titik yang semakin renggang sehingga detail permukaan yang dapat direpresentasikan menjadi lebih terbatas.

Secara keseluruhan, peningkatan tinggi terbang dari 100 m ke 200 m menyebabkan penurunan *point density* dari 281,06 points/m² menjadi 38,94 points/m², atau menurun sekitar 86,15%. Sebaliknya, *point spacing* meningkat dari 5,96 cm menjadi 16,03 cm, atau meningkat sekitar 168,96%. Hal ini menunjukkan bahwa tinggi terbang UAV LiDAR berpengaruh langsung terhadap resolusi spasial data *point cloud*, di mana semakin tinggi UAV terbang, semakin rendah kerapatan titik yang dihasilkan dan semakin besar jarak antar titik pada permukaan. Kondisi ini sejalan dengan prinsip bahwa *point density* dan *point spacing* merupakan parameter utama dalam menggambarkan kerapatan dan distribusi spasial data LiDAR [9]. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sofonia et al. [2] dan Bakula et al. [3] yang menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang UAV LiDAR menyebabkan penurunan kerapatan titik dan perubahan karakteristik *point cloud* yang dihasilkan. Untuk memperjelas hubungan antara tinggi terbang UAV LiDAR, karakteristik *point cloud*, dan akurasi model permukaan, Gambar 14 menyajikan perubahan nilai *point density*, *point spacing*, pada setiap variasi tinggi terbang.



Gambar 14. Grafik hubungan tinggi terbang UAV LiDAR terhadap *point density* dan *point spacing*.

Berdasarkan Gambar 14, meningkatnya tinggi terbang menyebabkan *point density* menurun, sedangkan *point spacing* meningkat. Semakin tinggi UAV terbang, distribusi titik yang dihasilkan menjadi semakin renggang.

Selain mempengaruhi kerapatan titik dan jarak antar titik, perubahan tinggi terbang juga berpotensi mempengaruhi ketelitian model permukaan yang dihasilkan. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi akurasi menggunakan parameter RMSE untuk mengetahui pengaruh variasi tinggi terbang terhadap akurasi horizontal dan vertikal model permukaan UAV LiDAR.

3.3 Evaluasi Akurasi Model Permukaan

3.3.1 Akurasi Berdasarkan RMSE

Evaluasi akurasi model permukaan dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian hasil akuisisi UAV LiDAR pada setiap variasi tinggi terbang. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan koordinat dan elevasi hasil pengolahan *point cloud* terhadap titik referensi *Independent Control Point* (ICP). *Ground Control Point* (GCP) digunakan pada proses georeferensi model permukaan, sedangkan ICP digunakan sebagai titik uji *independent* dalam evaluasi akurasi. Parameter yang digunakan meliputi RMSE *horizontal radial* (RMSE_r) dan RMSE vertikal (RMSE_z), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung akurasi horizontal dan vertikal berdasarkan standar ASPRS *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* [10].

TABEL 5. HASIL EVALUASI AKURASI MODEL PERMUKAAN

Tinggi Terbang (m)	RMSE _x (m)	RMSE _y (m)	RMSE _r (m)	RMSE _z (m)
100	0.062	0.016	0.064	0.038
150	0.054	0.046	0.071	0.065
200	0.060	0.038	0.071	0.124

Sumber: Hasil pengolahan data, 2026.

a. Analisis RMSE pada Tinggi Terbang 100m

Berdasarkan Tabel 5, pada tinggi terbang 100 m diperoleh RMSE_x sebesar 0,062 m dan RMSE_y sebesar 0,016 m sehingga menghasilkan nilai RMSE horizontal radial (RMSE_r) sebesar 0,064 m. Sementara itu, nilai RMSE vertikal (RMSE_z) diperoleh sebesar 0,038 m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model permukaan hasil akuisisi UAV LiDAR pada tinggi terbang 100 m memiliki ketelitian horizontal dan vertikal yang baik. Tingginya kerapatan titik pada skenario ini memungkinkan representasi permukaan yang lebih detail sehingga perbedaan posisi terhadap titik referensi relatif kecil.

b. Analisis RMSE pada Tinggi Terbang 150m

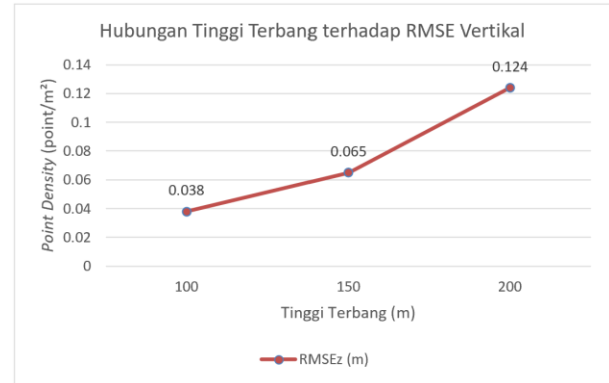
Pada tinggi terbang 150 m diperoleh RMSE_x sebesar 0,054 m dan RMSE_y sebesar 0,046 m, yang menghasilkan nilai RMSE_r sebesar 0,071 m. Nilai RMSE_z yang diperoleh sebesar 0,065 m. Dibandingkan dengan tinggi terbang 100 m, nilai RMSE vertikal menunjukkan peningkatan, yang mengindikasikan adanya penurunan ketelitian model permukaan seiring berkurangnya kerapatan titik hasil akuisisi.

c. Analisis RMSE pada Tinggi Terbang 200m

Pada tinggi terbang 200 m diperoleh RMSE_x sebesar 0,060 m dan RMSE_y sebesar 0,038 m dengan nilai RMSE_r sebesar 0,071 m. Nilai RMSE vertikal meningkat menjadi 0,124 m, yang merupakan nilai terbesar dibandingkan dua skenario lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang memberikan pengaruh terhadap ketelitian vertikal model permukaan, terutama akibat berkurangnya jumlah titik yang merepresentasikan permukaan tanah.

Secara keseluruhan, nilai RMSE horizontal radial (RMSE_r) pada ketiga variasi tinggi terbang menunjukkan perbedaan yang relatif kecil, yaitu berkisar antara 0,064 m hingga 0,071 m. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tinggi terbang tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ketelitian horizontal model permukaan yang dihasilkan.

Sebaliknya, nilai RMSE vertikal (RMSE_z) menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya tinggi terbang, yaitu dari 0,038 m pada tinggi terbang 100 m menjadi 0,065 m pada tinggi terbang 150 m dan mencapai 0,124 m pada tinggi terbang 200 m. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang berpengaruh terhadap ketelitian vertikal model permukaan. Hasil tersebut sejalan dengan penurunan *point density* dan peningkatan *point spacing* yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, di mana berkurangnya kerapatan titik menyebabkan kemampuan model dalam merepresentasikan detail permukaan menjadi lebih rendah [2,9].



Gambar 15. Grafik hubungan tinggi terbang terhadap RMSE_z

Pada terrain terjal, perubahan elevasi terjadi dengan cepat dalam jarak yang relatif pendek. Semakin tinggi UAV terbang, kerapatan titik yang dihasilkan semakin rendah sehingga detail permukaan tanah tidak dapat direkam sebaik pada tinggi terbang yang lebih rendah. Akibatnya, perbedaan elevasi antara model permukaan dan titik referensi menjadi lebih besar, yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai RMSE vertikal. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh tinggi terbang terhadap akurasi vertikal menjadi lebih nyata pada area dengan kondisi topografi yang kompleks.

3.3.2 Akurasi Berdasarkan Standar ASPRS

Nilai RMSE yang diperoleh selanjutnya dikonversi menjadi akurasi horizontal dan vertikal pada tingkat kepercayaan 95% berdasarkan ASPRS *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. Akurasi horizontal dihitung menggunakan nilai RMSE_r, sedangkan akurasi vertikal dihitung menggunakan nilai RMSE_z. Konversi ini dilakukan untuk memberikan interpretasi ketelitian hasil pemetaan dalam bentuk batas kesalahan yang dapat dipercaya pada tingkat kepercayaan 95% [10].

TABEL 6. AKURASI BERDASARKAN STANDAR ASPRS

Tinggi Terbang (m)	Accuracy Horizontal 95% (m)	Accuracy Vertikal 95% (m)
100	0.110	0.075
150	0.124	0.128
200	0.124	0.243

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

Berdasarkan Tabel 6, nilai akurasi horizontal pada ketiga variasi tinggi terbang relatif stabil, yaitu berkisar antara 0,110 m hingga 0,124 m. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tinggi terbang tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ketelitian horizontal hasil pemetaan UAV LiDAR.

Sebaliknya, akurasi vertikal menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya tinggi terbang. Nilai akurasi vertikal meningkat dari 0,075 m pada tinggi terbang 100 m menjadi 0,128 m pada tinggi terbang 150 m dan mencapai 0,243 m pada tinggi terbang 200 m. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang berpengaruh terhadap ketelitian elevasi model permukaan yang dihasilkan. Hasil tersebut konsisten dengan penurunan *point density* dan peningkatan *point spacing* yang telah dibahas pada subbab sebelumnya [2], [3,10].

3.3.3 Interpretasi Ketelitian Berdasarkan BIG No.15 Tahun 2014

Nilai akurasi horizontal dan vertikal yang diperoleh berdasarkan hasil evaluasi RMSE selanjutnya dikonversi menjadi nilai CE90 dan LE90 sesuai Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014. Nilai CE90 digunakan untuk mengevaluasi ketelitian horizontal, sedangkan LE90 digunakan untuk mengevaluasi ketelitian vertikal. Acuan ketelitian geometri peta RBI yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 7 [8].

TABEL 7. KETELITIAN GEOMETRI 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

Berdasarkan ketentuan tersebut, nilai CE90 dan LE90 dihitung menggunakan nilai RMSEr dan RMSEz hasil evaluasi akurasi model permukaan. Hasil perhitungan nilai CE90 dan LE90 ditunjukkan pada Tabel 8.

TABEL 8. 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

Berdasarkan Tabel 8, nilai CE90 menunjukkan bahwa ketelitian horizontal relatif stabil pada seluruh variasi tinggi terbang, yaitu berkisar antara 0,097 m hingga 0,108 m. Sebaliknya, nilai LE90 meningkat dari 0,063 m pada tinggi terbang 100 m menjadi 0,205 m pada tinggi terbang 200 m, yang menunjukkan adanya penurunan ketelitian vertikal seiring bertambahnya tinggi terbang.

TABEL 9. INTERPRETASI 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

Berdasarkan Tabel 9, hasil pemetaan UAV LiDAR pada tinggi terbang 100 m dan 150 m memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 1. Pada tinggi terbang 200 m, ketelitian horizontal masih memenuhi kelas 1, namun nilai LE90 sebesar 0,205 m sedikit melebihi batas ketelitian vertikal kelas 1 sehingga hanya memenuhi ketelitian peta RBI skala 1:1.000 kelas 2.

TABEL 10. PERBANDINGAN UKURAN DATA HASIL AKUISISI

Tinggi Terbang	Raw Data (GB)	Point Cloud (GB)
100	5,70	8,41
150	2,88	3,90
200	2,08	2,30

Selain mempengaruhi karakteristik *point cloud* dan akurasi model permukaan, variasi tinggi terbang juga mempengaruhi ukuran data hasil akuisisi. Pada tinggi terbang 100 m diperoleh *raw data* sebesar 5,70 GB dan *point cloud* sebesar 8,41 GB. Sementara itu, pada tinggi terbang 200 m diperoleh *raw data* sebesar 2,08 GB dan *point cloud* sebesar 2,30 GB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi UAV terbang, ukuran *raw data* dan *point cloud* yang dihasilkan semakin kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa variasi tinggi terbang tidak hanya mempengaruhi karakteristik *point cloud* dan akurasi model permukaan, tetapi juga mempengaruhi ukuran data hasil akuisisi.

IV. KESIMPULAN

Peningkatan tinggi terbang UAV LiDAR dari 100 m hingga 200 m menyebabkan *point density* menurun dari 281,06 points/m² menjadi 38,94 points/m², sedangkan *point spacing* meningkat dari 5,96 cm menjadi 16,03 cm. Penurunan kerapatan titik tersebut berpengaruh terhadap ketelitian model permukaan, terutama pada komponen vertikal. Nilai RMSE horizontal radial (RMSEr) relatif stabil pada seluruh variasi tinggi terbang, yaitu berkisar antara 0,064 m hingga 0,071 m, sedangkan nilai RMSE vertikal (RMSEz) meningkat dari 0,038 m pada tinggi terbang 100 m menjadi 0,124 m pada tinggi terbang 200 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tinggi terbang memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap ketelitian vertikal dibandingkan ketelitian horizontal.

Berdasarkan interpretasi ketelitian yang mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014, hasil pemetaan UAV LiDAR pada 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. Seluruh variasi tinggi terbang yang diuji masih dapat digunakan untuk kegiatan pemetaan topografi pada kawasan pertambangan. Tinggi terbang 100 m menghasilkan kualitas data terbaik berdasarkan *point density*, *point spacing*, dan akurasi model permukaan. Sementara itu, tinggi terbang 200 m menghasilkan ukuran data paling kecil, yaitu *raw data* sebesar 2,08 GB dan *point cloud* sebesar 2,30 GB, dibandingkan tinggi terbang 100 m yang menghasilkan *raw data* sebesar 5,70 GB dan *point cloud* sebesar 8,41 GB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan tinggi terbang UAV LiDAR dapat disesuaikan dengan kebutuhan ketelitian pemetaan maupun ukuran data yang diinginkan.

Penelitian ini terbatas pada penggunaan satu jenis sensor UAV LiDAR, satu lokasi penelitian, dan tiga variasi tinggi terbang. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan pada kondisi terrain, jenis sensor, dan konfigurasi penerbangan yang berbeda untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh tinggi terbang UAV LiDAR terhadap kualitas data dan akurasi model permukaan.

UCAPAN TERIMAKASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

- [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] 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.
- [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.



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)