

Estimasi Volume Tambang Batu Kapur Menggunakan Foto Udara *Unmanned Aerial Vehicle*

Limestone Quarry Volume Estimation Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry

Arya Aswadana¹, Hanif Ilmawan^{1,2*}

¹Departemen Teknologi Kebumihan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

²Center of Excellence Smart and Green Building Information, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding Author: hanif.ilmawan@ugm.ac.id

Article Info:

Received: 20 – 01 - 2026

Accepted: 30 – 04 - 2026

Published: 25 – 07 - 2026

Kata kunci: UAV,
Structure from motion,
DTM, Estimasi Volume,
Batu Kapur

Abstrak: Pertambangan batu kapur memiliki peran strategis dalam penyediaan bahan baku industri konstruksi, semen, dan kimia. Pengelolaan tambang memerlukan estimasi volume galian sebagai dasar perencanaan produksi. Estimasi volume dilakukan dengan melakukan pengukuran dan perhitungan menggunakan berbagai metode survei dan pemetaan. Penelitian ini bertujuan untuk membuat *Digital Terrain Model* (DTM) dari foto udara, menilai ketelitian model berdasarkan Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021, dan menghitung estimasi volume galian batu kapur menggunakan DTM. Akuisisi data dilakukan menggunakan UAV *Quadcopter* untuk pemotretan udara. Penentuan tujuh titik GCP dan empat titik ICP dilakukan menggunakan GNSS metode *rapid static*. Sebanyak 1.186 foto diolah dengan algoritma *Structure from Motion* untuk menghasilkan DTM. Proses klasifikasi *point clouds*, pembuatan TIN, dan penghitungan volume dilakukan menggunakan perangkat lunak komersial. Uji ketelitian model dilakukan dengan penghitungan CE90 dan LE90. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model DTM memiliki ketelitian CE90 sebesar 0,026 m dan LE90 sebesar 0,052 m, sehingga memenuhi standar peta kelas 1 skala 1:1000. Estimasi volume galian pada elevasi 379,900 m menghasilkan volume 914.198,4 m³, sedangkan pada elevasi 342,346 m menghasilkan volume 2.546.016,1 m³.

Keywords: UAV, *Structure from Motion*, DTM, volume estimation, limestone

Abstract: Limestone mining plays a strategic role in supplying raw materials for the construction, cement, and chemical industries. Effective mine management requires accurate excavation volume estimation as a basis for production planning, which can be achieved through measurements and calculations using various surveying and mapping methods. This study aims to generate a *Digital Terrain Model* (DTM) from aerial photographs, evaluate its accuracy in accordance with Geospatial Information Agency (BIG) Regulation Number 18 of 2021, and estimate limestone excavation volumes using the resulting DTM. Data acquisition was conducted using a quadcopter UAV for aerial imaging. Seven Ground Control Points (GCPs) and four Independent Check Points (ICPs) were measured using GNSS with the *rapid static* method. A total of 1,186 photographs were processed using the *Structure from Motion* algorithm to produce the DTM. Point cloud classification, *Triangulated Irregular Network* (TIN) construction, and volume calculation were carried out using commercial software. Model accuracy was assessed through the calculation of CE90 and LE90. The results show that the DTM achieves a CE90 of 0.026 m and an LE90 of 0.052 m, meeting the accuracy requirements for Class 1 maps at a scale of 1:1000. The estimated excavation volume at an elevation of 379.900 m is 914,198.4 m³, while at an elevation of 342.346 m the estimated volume is 2,546,016.1 m³.

How to Cite:

Aswadana, A., Ilmawan, H. (2026). Estimasi Volume Tambang Batu Kapur Menggunakan Foto Udara Unmanned Aerial Vehicle. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 6(2), 59-75. <https://doi.org/10.31315/imagi.v6i1.16189>.

1. PENDAHULUAN

Batu kapur merupakan batuan karbonat yang tersusun terutama oleh kalsium karbonat. Jenis batuan ini digunakan secara luas pada berbagai sektor industri, termasuk konstruksi, metalurgi, kimia, dan lingkungan (Oates, 1999). Pada sektor konstruksi, batu kapur digunakan sebagai bahan baku pembuatan semen. Berdasarkan data yang dihimpun oleh Asosiasi Semen Indonesia (ASI, 2025), konsumsi semen di Indonesia mencapai 64,9 juta ton di tahun 2024. Produksi di tahun 2024 secara nasional mencapai 67,8 juta ton. Hal ini menjadikan industri semen terus berkembang di Indonesia dari tahun ke tahun. Seiring dengan berkembangnya industri semen, permintaan terhadap batu kapur di Indonesia juga meningkat. Tingginya kebutuhan batu kapur juga disokong oleh pemanfaatan batu kapur selain untuk produksi semen. Pemanfaatan lainnya di bidang konstruksi adalah untuk perkerasan jalan maupun bahan pembangunan interior dan eksterior gedung. Pada sektor pertanian, batu kapur dimanfaatkan untuk memperbaiki kadar keasaman tanah. Batu kapur juga digunakan dalam industri manufaktur besi, kaca, kertas, plastik, dan cat. Seluruh pemanfaatan tersebut menjadikan batu kapur komoditas penting yang memiliki nilai ekonomi tinggi.

Nilai ekonomi batu kapur mendorong penambangan batu kapur di berbagai wilayah Indonesia, termasuk di Kalurahan Bedoyo, Kapanewon Ponjong, Kabupaten Gunungkidul. Dalam rangka memaksimalkan produksi tambang batu kapur tersebut, perusahaan yang melakukan aktivitas pertambangan perlu mengelola tambang perlu mengetahui ciri-ciri fisik dan kimia dari deposit yang tersedia (Pysmennyi dkk., 2022). Salah satu ciri fisik yang diperlukan adalah volume deposit yang dapat dilakukan penambangan. Pengelola tambang memerlukan estimasi volume galian sebagai dasar perencanaan produksi, karena ketelitian estimasi volume memengaruhi jumlah material yang diperoleh dan berdampak pada aspek produksi (Prakash & Ray, 2021). Estimasi volume diperoleh melalui pengukuran lapangan dan perhitungan menggunakan metode survei pemetaan tertentu.

Salah satu tantangan dalam melakukan pengukuran adalah kondisi topografi curam pada area tambang. Kondisi ini menimbulkan risiko keselamatan bagi surveyor ketika menggunakan metode pengukuran konvensional, misalnya pengukuran terestris menggunakan Total Station dan Auto Level, atau survei GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Pemanfaatan teknologi fotogrametri dengan wahana *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menjadi alternatif yang relevan untuk melakukan pengukuran cadangan tambang. UAV fotogrametri mampu menghasilkan model tiga dimensi beresolusi tinggi yang mendukung analisis dan perhitungan volumetrik (Hao dkk., 2023). Namun, pada kenyataannya metode UAV fotogrametri belum diterapkan di lokasi kajian untuk pengukuran topografi sebagai basis perhitungan volume cadangan tambang.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini bertujuan menghasilkan *Digital Terrain Model* (DTM), mengevaluasi ketelitiannya berdasarkan Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021, serta menghitung volume galian batu kapur di lokasi kajian. Pelaksanaan akuisisi data terdiri dari tiga bagian, yaitu pengukuran kerangka kontrol pemetaan dan pengukuran titik sampel elevasi menggunakan survei GNSS, serta pemotretan udara menggunakan UAV. Hasil pengukuran dimodelkan menjadi DTM dan digunakan dalam perhitungan volume. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan perhitungan volume untuk diterapkan di tambang kapur lainnya secara lebih luas. Dalam penelitian ini, tidak dilakukan penyelidikan lapisan tanah sehingga basis perhitungan volume hanya mengacu pada elevasi puncak dan dasar cadangan tambang di lokasi kajian. Terdapat luaran tambahan berupa peta topografi area tambang sebagai sarana visualisasi hasil akuisisi dan pengolahan data.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat & Bahan

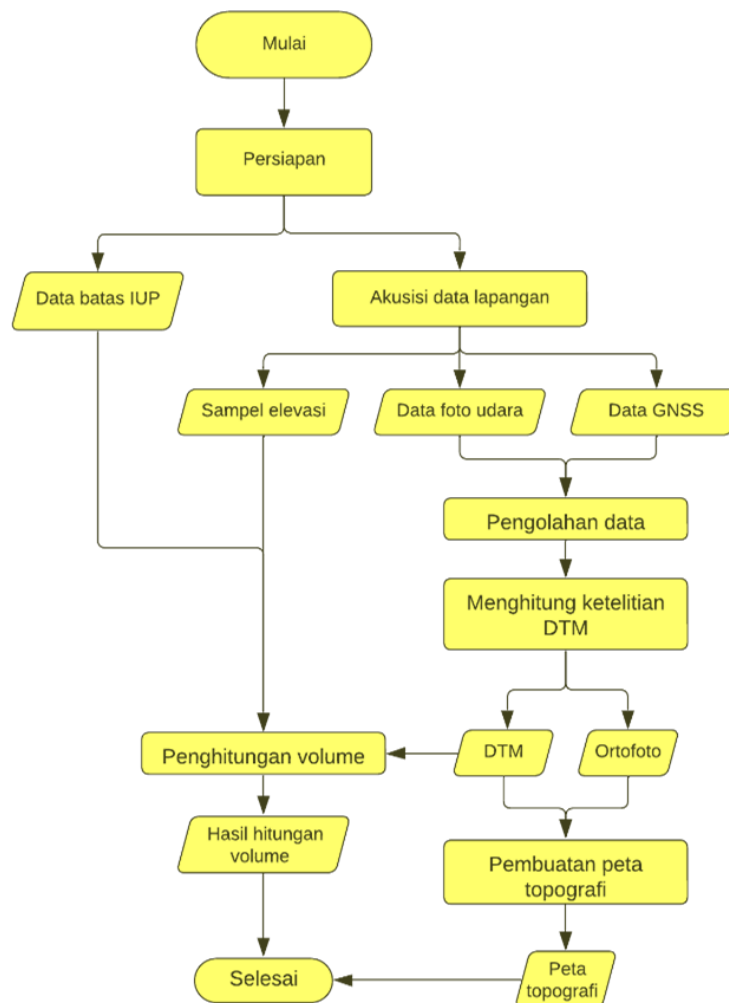
Penelitian ini menggunakan beberapa alat untuk mendukung akuisisi data lapangan, pengolahan data, dan perhitungan volume galian batu kapur. Laptop digunakan sebagai perangkat utama pengolahan data. UAV DJI Phantom 4 RTK digunakan untuk memperoleh foto udara beresolusi tinggi dan pembuatan

model tiga dimensi area tambang. GNSS Trimble R8s digunakan untuk pengukuran titik kontrol statis yang meliputi GCP (*Ground Control Point*), ICP (*Independent Control Point*), dan sampel elevasi. Data hasil survei GNSS diproses menggunakan Trimble Business Center (TBC) untuk pengolahan data statis, *filtering point cloud*, uji ketelitian DTM, dan perhitungan volume. Data foto udara diolah menggunakan Agisoft Metashape untuk menghasilkan ortofoto dan model tiga dimensi. Quantum GIS (QGIS) digunakan untuk pembuatan peta IUP, sedangkan Premark berukuran 50 cm x 50 cm dengan warna oranye dan putih digunakan sebagai penanda titik kontrol.

Bahan yang digunakan meliputi data sampel elevasi lantai galian, data koordinat batas IUP, data foto udara, dan data pengamatan GNSS yang dikumpulkan pada tanggal 23 Mei 2025. Seluruh bahan tersebut digunakan sebagai dasar pembuatan DTM, evaluasi ketelitian, dan perhitungan volume galian batu kapur menyeluruh

2.2 Metode

Metode penelitian terdiri atas tahap persiapan, akuisisi data, dan pengolahan data. Tahap persiapan meliputi pengumpulan data batas IUP sebagai area kajian penelitian. Tahap akuisisi data meliputi pengambilan sampel elevasi, akuisisi foto udara menggunakan UAV, serta pengukuran koordinat GCP menggunakan GNSS. Tahap pengolahan data dilakukan dengan membentuk *point cloud*, melakukan uji ketelitian Digital Terrain Model (DTM), serta menghasilkan DTM dan ortofoto yang digunakan untuk perhitungan volume dan pembuatan peta topografi. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir

Time Kinematic (RTK) yang menyediakan penentuan posisi relatif secara *real-time* dengan memanfaatkan stasiun *base* sebagai sumber koreksi untuk *rover* di lapangan (Eren, dkk. 2025). Koreksi tersebut memungkinkan *rover* menghitung posisinya dengan akurasi tinggi tanpa memerlukan durasi pengamatan panjang seperti pada *static* maupun *rapid static*. Perkembangan teknologi selanjutnya menghasilkan RTK-NTRIP, yakni mekanisme distribusi koreksi melalui jaringan internet menggunakan protokol *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP). Protokol ini menyalurkan data koreksi berformat RTCM untuk mengatasi keterbatasan jangkauan radio konvensional dan menyediakan informasi posisi secara instan melalui koneksi internet (Rasyid, dkk. 2016).

Pada penelitian ini, pengamatan GNSS dilaksanakan dengan satu perangkat sebagai *base* dan tiga perangkat sebagai *rover*. Total titik yang diobservasi berjumlah dua belas, dengan komposisi tujuh GCP dan empat ICP, serta satu titik *base* yang beroperasi secara kontinyu hingga seluruh pengukuran selesai. Pengamatan GCP dan ICP mengikuti ketentuan titik kontrol orde 4 dengan durasi akuisisi selama tiga puluh menit per titik sesuai SNI 19-6724-2002. Titik *base* diamati sebagai titik kontrol orde 2 dengan durasi minimal tiga jam mengacu pada SNI 9127:2024. Seluruh informasi waktu dan kondisi pengamatan dicatat pada formulir. Pengukuran sampel elevasi dilakukan menggunakan GNSS dengan metode RTK-NTRIP pada area galian tambang untuk memperoleh data elevasi bawah sebagai dasar perhitungan volume.

Pelaksanaan akuisisi data foto udara pada fotogrametri dilakukan setelah pemasangan titik GCP dan ICP selesai. Proses ini dilaksanakan dengan menggunakan sensor yang dibawa oleh wahana terbang melalui jalur terbang tertentu. Jalur terbang merupakan lintasan penerbangan yang ditempuh wahana udara saat pemotretan dan umumnya direncanakan secara paralel untuk memastikan cakupan wilayah yang sistematis (Wolf, dkk. 2014). Setiap jalur terdiri atas rangkaian foto berurutan yang diambil pada titik pemotretan dengan tumpang tindih memanjang atau *end lap* sebesar 55-65%, tetapi *end lap* 75-85% mampu meningkatkan kestabilan pemodelan tanpa menambah beban data secara berlebihan (Wolf, dkk. 2014; Wu, dkk. 2025). Pertampalan antarlintasan atau *side lap* berkisar 30% dan berfungsi menghubungkan foto dari jalur yang bersebelahan, tetapi *sidelap* 70-80% mampu menghasilkan cakupan yang konsisten serta mendukung rekonstruksi tiga dimensi yang akurat (Wolf, dkk. 2014; Wu, dkk. 2025). Perencanaan jalur terbang didasarkan pada *Area of Interest* (AOI) yang menentukan batas wilayah pemotretan sekaligus menetapkan arah lintasan, jumlah foto, dan cakupan agar seluruh area terekam dengan baik (Skorobogatov, dkk. 2021).

Pada penelitian ini, akuisisi foto udara dilakukan menggunakan wahana UAV tipe quadcopter pada tinggi terbang 90 meter dengan *sidelap* 80 persen, *endlap* 80 persen, serta sudut kamera 90° dan 60°. Parameter tersebut mengikuti prinsip fotogrametri bahwa tumpang tindih citra diperlukan pada proses pencocokan fitur, pembentukan *sparse point cloud*, dan rekonstruksi *dense point cloud* dalam metode *Structure from Motion–Multi View Stereo* (SfM-MVS). Sudut kamera 60° dipilih dengan maksud mendapatkan detail elevasi pada sisi tebing yang curam (Skorobogatov, dkk. 2021). Proses akuisisi foto udara menghasilkan 1.186 foto yang digunakan dalam tahap pengolahan berikutnya.

3. Pengolahan data

Pengolahan data dimulai dengan memproses hasil pengamatan GNSS untuk mendapatkan koordinat titik GCP dan ICP. Proses ini dilakukan pada perangkat lunak TBC menggunakan pendekatan jaring yang terhubung dengan CORS CPAC dan CORS CBTL. Data dari titik *base* yang telah diolah sebelumnya berfungsi sebagai titik acuan dalam perhitungan *baseline* sehingga posisi tiap GCP dan ICP dapat ditentukan secara presisi.

Koordinat yang dihasilkan dari pengolahan GNSS kemudian digunakan dalam tahap penyusunan foto udara. Proses penyusunan dilakukan pada Agisoft Metashape melalui tahapan align photos berbasis SfM-MVS, yang menghasilkan estimasi orientasi kamera dan *sparse clouds*. SfM merupakan metode fotogrametri yang memanfaatkan tumpang tindih citra untuk mengekstraksi fitur spasial, memperkirakan orientasi kamera, dan membangun *sparse point clouds* sebagai representasi awal struktur objek (Huang & Qin, 2025). Proses ini umumnya dilanjutkan

dengan MVS yang mengonversi *sparse point clouds* menjadi *dense point clouds* melalui prinsip *photo-consistency*, yaitu keserupaan tampilan objek pada citra dengan sudut pandang berbeda (Harwin & Lucieer, 2012). MVS sangat bergantung pada geometri epipolar dan akurasi parameter kamera serta memerlukan optimalisasi *bundle adjustment* untuk meminimalkan *reprojection error*, sehingga mampu menghasilkan rekonstruksi permukaan (DEM) dengan ketelitian mencapai 25-40 mm.

DEM merupakan representasi digital permukaan bumi yang memuat informasi elevasi pada titik-titik tertentu dan masih bersifat data dasar tanpa koreksi interpolasi nilai ketinggian (Croneborg, dkk. 2020). DEM terbagi menjadi *Digital Surface Model* (DSM) dan *Digital Terrain Model* (DTM), dengan perbedaan utama pada keberadaan objek di atas permukaan tanah. DSM merepresentasikan ketinggian permukaan tanah beserta seluruh objek di atasnya seperti vegetasi, bangunan, dan kenampakan alam lainnya (Jang, dkk. 2020), sedangkan DTM hanya merepresentasikan permukaan tanah tanpa pengaruh vegetasi maupun objek buatan dan dapat dilengkapi fitur topografi seperti punggung atau alur sungai untuk menghasilkan model relief yang lebih realistis (Franstein, dkk. 2019). Pada penelitian ini, DTM digunakan untuk melakukan perhitungan volume. Perhitungan dilakukan menggunakan perangkat lunak komersial yang mendukung metode *surface to surface* untuk menentukan besaran galian pada area tambang.

Pada tahap georeferencing, koordinat GCP dan ICP diinputkan ke perangkat lunak untuk melakukan penandaan titik premark secara manual. Penyesuaian posisi kamera dan *sparse clouds* dilakukan untuk mentransformasikan koordinat foto ke sistem UTM zona 49S berbasis datum WGS84 dengan referensi vertikal INAGEOID.

Setelah proses georeferencing selesai, data foto udara direkonstruksi menjadi *Dense clouds* dengan memanfaatkan informasi orientasi kamera. Tahap ini menghasilkan titik rapat yang merepresentasikan geometri permukaan secara detail. *Dense clouds* yang telah terbentuk selanjutnya diklasifikasi untuk memisahkan titik ground dan non-ground. Titik yang termasuk kelas ground digunakan untuk membangun surface dalam bentuk TIN pada perangkat lunak TBC.

4. Menghitung ketelitian DTM

Pada tahap ini dilakukan pengujian ketelitian terhadap DTM yang telah dihasilkan, meliputi ketelitian horizontal dan vertikal sesuai Peraturan Kepala BIG Nomor 18 Tahun 2021. Sebelum pengujian ketelitian horizontal, ortofoto ditampilkan sebagai tekstur pada DTM menggunakan tool *add and remove surface members* untuk mempermudah identifikasi posisi premark. Pengujian ketelitian horizontal (CE90) dilakukan dengan membuat titik uji pada lokasi premark menggunakan TBC, kemudian menghitung selisih koordinat titik uji dengan koordinat ICP. Pengujian ketelitian vertikal (LE90) dilakukan melalui perhitungan selisih elevasi antara titik ICP dan permukaan DTM dengan fitur *points to surface* pada TBC, yang menghasilkan tabel koordinat dan nilai selisih elevasi secara otomatis.

Uji ketelitian dilakukan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur tingkat kesalahan dalam hasil prediksi. Semakin kecil nilai RMSE (mendekati 0), semakin akurat prediksi tersebut. RMSE dihitung sebagai akar dari rata-rata jumlah kuadrat kesalahan (Nugroho & Hazmin, 2022). Nilai RMSE dapat dihitung dengan persamaan (1) (Ghilani, 2018).

$$RMSE = \sqrt{\sum_1^n [f(x_i) - x_i]^2 / n} \quad (1)$$

Dalam hal ini:

RMSE : *Root Mean Square Error*
 $f(x_i)$: ukuran pada model
 x_i : ukuran survei lapangan
 n : jumlah data sampel

RMSE dapat digunakan untuk menghitung ketelitian posisi horizontal maupun vertikal. Perhitungannya mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial No.18 Tahun 2021 tentang

standar ketelitian peta dasar rupa bumi Indonesia. Penghitungan RMSE horizontal dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil pengukuran terhadap koordinat yang dianggap benar pada titik-titik kontrol yang telah ditentukan. Sementara itu, RMSE vertikal dihitung berdasarkan perbedaan nilai ketinggian antara data yang diuji dengan nilai ketinggian acuan yang telah tervalidasi. Penghitungan nilai RMSE horizontal dan vertikal ditunjukkan pada persamaan (2) dan (3).

$$RMSE_r = \sqrt{\sum[(X_{data} - X_{cek})^2 + (Y_{data} - Y_{cek})^2]/n} \quad (2)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\sum(Z_{data} - z_{cek})^2/n} \quad (3)$$

Dalam hal ini :

- $RMSE_r$: *Root Mean Square* pada posisi horizontal (x dan y)
- $RMSE_z$: *Root Mean Square* pada posisi vertikal (z)
- X_{data} : Data nilai koordinat X pada titik ICP hasil pengukuran GNSS
- X_{cek} : Data nilai koordinat X pada titik ICP DTM
- Y_{data} : Data nilai koordinat Y pada titik ICP hasil pengukuran GNSS
- Y_{cek} : Data nilai koordinat Y pada titik ICP DTM
- Z_{data} : Data nilai koordinat z pada titik ICP hasil pengukuran GNSS
- Z_{cek} : Data nilai koordinat Y pada titik ICP DTM
- n : Jumlah sampel pengujian atau jumlah titik ICP

Uji ketelitian diperlukan untuk mengetahui kualitas DTM yang dihasilkan. Uji akurasi dilakukan dengan mengecek ketelitian DTM hasil pengukuran secara horizontal maupun vertikal menggunakan *Circular Error 90* (CE90) dan *Linear Error 90* (LE90) menurut *United States National Map Accuracy Standards*. Penghitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan tingkat kepercayaan 90%. Penghitungan uji akurasi menggunakan persamaan (4) dan (5).

$$CE90 = 1,5175 \times RMSE_r \quad (4)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSE_z \quad (5)$$

Dalam hal ini:

- CE90 : Ukuran ketelitian geometri horizontal
- LE90 : Ukuran ketelitian geometri vertikal

Uji ketelitian horizontal dan vertikal wajib disesuaikan dengan skala serta kelas ketelitian yang tercantum dalam Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021 mengenai spesifikasi teknis data DTM. Pemenuhan standar ketelitian tersebut berperan penting dalam memastikan bahwa informasi spasial yang dihasilkan memiliki kualitas serta reliabilitas yang dapat dipertanggungjawabkan. Kondisi ini memungkinkan data digunakan secara tepat dalam berbagai aktivitas teknis, meliputi pemetaan, analisis geospasial, serta proses perencanaan dan pengelolaan wilayah. Seluruh pemanfaatan tersebut perlu mengikuti batas ketelitian yang tercantum pada Tabel 1. Penerapan ketentuan ini juga berfungsi untuk menjaga keseragaman mutu produk geospasial agar tetap konsisten lintas wilayah dan lintas metode akuisisi data. Selain itu, standar tersebut mendukung proses verifikasi hasil pemetaan sehingga integritas data tetap terjaga sepanjang tahapan pengolahan.

Tabel 1. Resolusi Spasial dan Ketelitian DTM

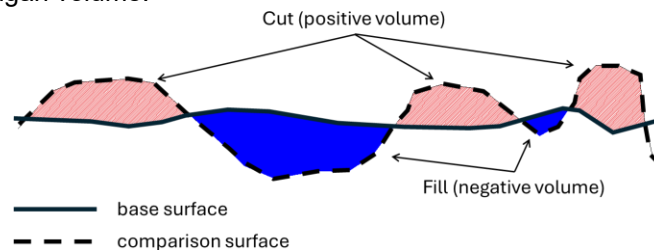
No	Aspek	Skala 1:5.000			Skala 1:1.000		
		Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
1	Resolusi Spasial (m)	1	2	3	0,2	0,4	0,75
2	Ketelitian Horizontal (CE90) (m)	1	2	3	0,2	0,4	0,6
3	Ketelitian Vertikal (LE90) (m)	1	1,5	2	0,2	0,3	0,4

(sumber: Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021)

5. Penghitungan volume

Penelitian ini menggunakan DTM berupa *Triangulated Irregular Network* (TIN). TIN merupakan metode representasi permukaan digital yang membangun jaringan segitiga tidak beraturan dari titik-titik koordinat tiga dimensi, sehingga lebih fleksibel dibandingkan metode grid dalam menggambarkan permukaan dengan variasi elevasi tajam atau bentuk kompleks (Pepe dkk., 2021). Jaringan segitiga tersebut tidak saling tumpang tindih dan merepresentasikan morfologi permukaan secara detail berdasarkan titik hasil akuisisi lapangan, sehingga mampu membentuk area landai maupun curam sesuai kondisi topografinya. TIN digunakan untuk perhitungan volume batu kapur.

Volume merupakan besaran ruang tiga dimensi yang diperoleh dengan membandingkan elevasi permukaan awal dan permukaan rencana untuk menentukan jumlah pekerjaan galian dan timbunan (*cut and fill*). Volume galian menunjukkan material yang harus diambil, sedangkan volume timbunan menunjukkan material yang harus ditambahkan (Priyadinata & Siregar, 2022). Metode TIN merepresentasikan permukaan tiga dimensi melalui jaringan segitiga yang dibentuk dari titik berkoordinat, sehingga memungkinkan perhitungan selisih ketinggian antara *surface* yang elevasinya lebih tinggi (*top surface*) dan *surface* yang elevasinya lebih rendah (*bottom surface*) secara kontinu dan akurat (Pepe dkk., 2021). Dalam hal ini, *surface* adalah penyebutan DEM atau DTM dalam perhitungan volume.



Gambar 3. Volume *cut* dan *fill*

Pada perhitungan volume, salah satu *surface* didefinisikan sebagai *base surface*, sedangkan yang lainnya sebagai *comparison surface* (Gambar 3). *Base surface* adalah model permukaan yang menunjukkan elevasi tanah asli. *Comparison surface* adalah model permukaan yang menunjukkan hasil elevasi setelah dilakukan pekerjaan. *Comparison surface* dapat juga didefinisikan sebagai elevasi desain atau elevasi rencana. Jika *base surface* berada di bawah *comparison surface*, maka volume yang dihitung adalah timbunan (*fill*). Volume galian (*cut*) didapatkan jika *base surface* berada di atas *comparison surface*. Berdasarkan Gambar 4, luas suatu segitiga ke-*u* (misalnya segitiga ABC) dihitung dengan cara perkalian koordinat, sebagaimana dijabarkan pada persamaan (6).

$$A_u = \frac{1}{2}[x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)]_u$$

Selanjutnya volume prisma segitiga yang terbentuk dari *top surface* dan *bottom surface* pada segitiga ke-*u* (misalnya segitiga ABC pada Gambar 4) dihitung berdasarkan luas segitiga ke-*u* dikalikan rata-rata tinggi, sebagaimana dijabarkan pada persamaan (7)

$$V_u = A_u \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \right)_u$$

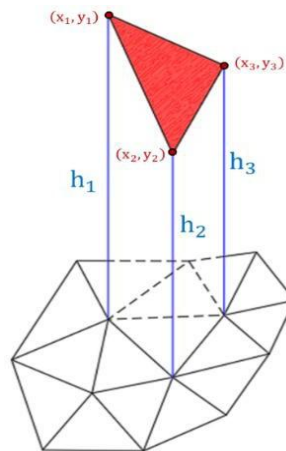
Sehingga total volume TIN didapatkan dengan menjumlahkan volume prisma ke-1 hingga ke-*u* (persamaan (8)).

$$V_{\text{TIN}} = \sum_{u=1}^u V_u$$

Dalam hal ini:

- A_u : Luas segitiga ke-*u*
 x_1, x_2, x_3 : Koordinat x dari segitiga ke-*u*
 y_1, y_2, y_3 : Koordinat y dari segitiga ke-*u*

h_1, h_2, h_3 : Tinggi prisma diukur dari segitiga ke-u
 V_u : volume prisma ke-u
 V_{TIN} : volume TIN total



Gambar 4. Penerapan TIN pada *Surface* dan konsep perhitungan volumenya. (Pepe, dkk. 2021)

Proses pembuatan data *boundary* dimulai dengan mengimpor titik batas IUP ke dalam QGIS, kemudian membentuk poligon sebagai batas area dengan menghubungkan titik-titik tersebut. Poligon ini digunakan sebagai *boundary* pada penghitungan volume dan pembuatan ortofoto. Perhitungan elevasi rata-rata dilakukan berdasarkan data sampel elevasi hasil pengukuran lapangan tanggal 23 Mei 2025. Nilai elevasi rata-rata yang didapatkan adalah 379,90026 meter dan dibulatkan menjadi 379,900 meter. Nilai elevasi tersebut menjadi elevasi acuan pada penghitungan volume di TBC menggunakan tool *surface to elevation*, yang berfungsi untuk menentukan *bottom surface* tanpa memerlukan pembuatan layer terpisah. Penghitungan volume dilakukan dengan menggunakan *boundary* IUP sebagai batas analisis, dengan fokus pada volume *cut* yang mencerminkan besaran material galian sesuai kondisi pekerjaan di lapangan.

6. Pembuatan peta topografi

Pembuatan peta topografi dilakukan setelah ortofoto, batas IUP, dan kontur dari TBC tersedia sebagai data masukan. Proses penyusunan dilakukan di QGIS dengan menggabungkan ketiga data tersebut sebagai dasar pembentukan peta topografi sesuai skala yang ditetapkan berdasarkan hasil uji ketelitian mengacu pada Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021. Tahap berikutnya adalah penyusunan layout melalui *Layout Manager* dengan pengaturan ukuran kertas, orientasi, serta skala peta, kemudian dilanjutkan dengan penambahan elemen peta berupa judul, legenda, skala grafis, arah utara, dan sumber data sehingga peta topografi dapat disajikan dalam format cetak maupun digital.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Ortofoto

Ortofoto yang dihasilkan dari pengolahan citra udara menggunakan Agisoft memiliki resolusi 3,15 sentimeter per piksel, yang menunjukkan bahwa setiap piksel mewakili area seluas 3,15 sentimeter di lapangan. Ortofoto tersusun dari DEM yang dibangun berdasarkan foto-foto bertampalan dengan cakupan area 55,4 hektare. Kondisi cuaca yang tidak menentu berpengaruh terhadap kualitas sebagian citra. Meskipun nilai GSD mencapai 3,15 sentimeter per piksel, terdapat bagian ortofoto yang tidak terproses secara optimal akibat kurangnya overlap, terutama pada area tepi sebagaimana terlihat pada Gambar 5.(a) sedangkan area dengan tingkat overlap memadai menghasilkan detail yang lebih baik seperti ditunjukkan

pada Gambar 5.(b). Namun, area yang kurang optimal merupakan tepi foto di luar area IUP, sehingga tidak memengaruhi hasil ortofoto pada area IUP tambang.

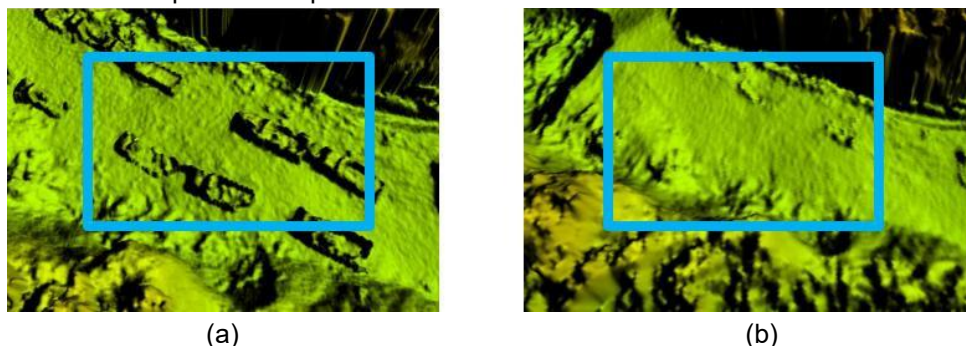


Gambar 5. Hasil ortofoto overlap rendah (a) dan overlap tinggi (b)

Penggunaan ortofoto resolusi tinggi dalam pemodelan area tambang telah digunakan pada penelitian sebelumnya sebagai dasar interpretasi spasial sebelum pembentukan model elevasi. Dalam praktik survei tambang, ortofoto digunakan sebagai referensi visual untuk memastikan kesesuaian bentuk permukaan dengan kondisi lapangan. Penggunaan overlap dan sidelap sebesar 80% mendukung konsistensi pemodelan permukaan sehingga berpengaruh terhadap ketelitian model elevasi yang digunakan pada tahap estimasi volume.

3.2 Hasil DTM

DTM yang terbentuk dari pengolahan di TBC melalui klasifikasi otomatis, klasifikasi manual, dan *filtering* berfungsi untuk memisahkan permukaan tanah dari objek yang berada di atasnya. Tahapan ini menghilangkan elemen *non-ground* seperti vegetasi dan kendaraan, termasuk truk pengangkut material batu kapur. Hasilnya berupa model permukaan tanah yang merepresentasikan kondisi aktual lokasi proyek akhir tanpa gangguan objek sementara. Perbedaan antara model DSM yang masih memuat truk dan DTM yang telah dibersihkan dapat diamati pada Gambar 6.



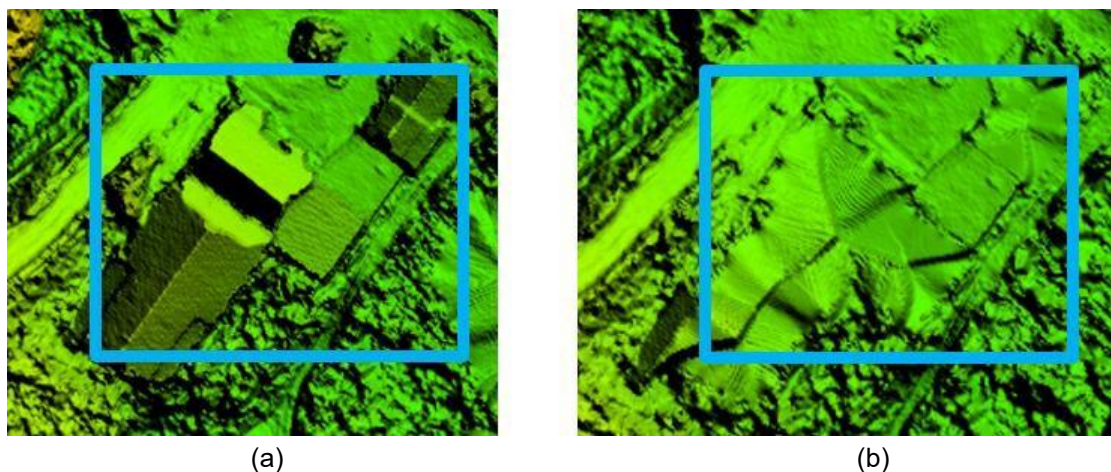
Gambar 6. Objek truk pada model DSM (a) dan pada model DTM (b)

Pada bagian lain dari area pemodelan, DSM hasil pengolahan awal masih memperlihatkan keberadaan bangunan yang berdiri di atas permukaan tanah. TBC kemudian menerapkan proses *filtering* untuk menghapus objek-objek tersebut dari *point cloud* sehingga diperoleh DTM yang hanya menampilkan bentuk permukaan tanah. Perbandingan antara DSM yang memuat bangunan dan DTM yang telah bebas dari bangunan ditunjukkan pada Gambar 7.

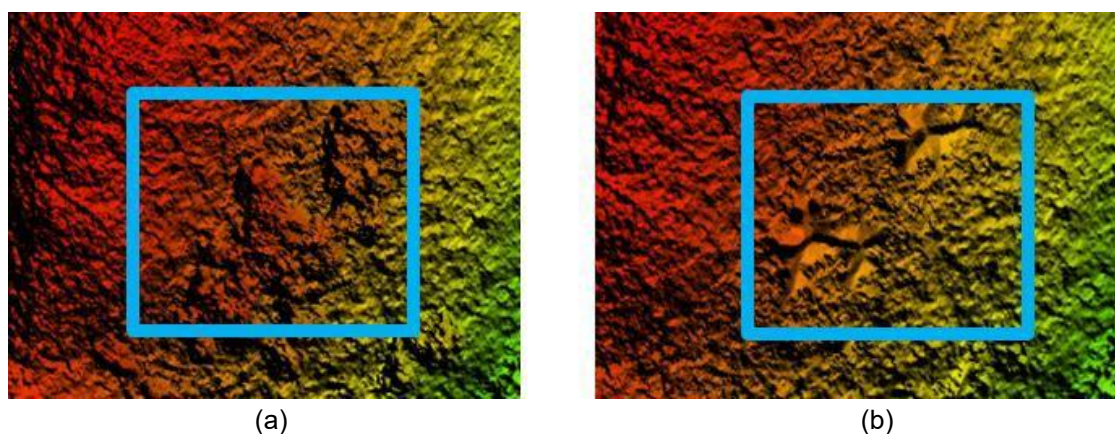
Vegetasi tinggi juga masih terekam pada DSM sehingga sebagian kontur tanah tertutupi pada tahap awal. Proses *filtering* diterapkan untuk memisahkan vegetasi dari *point cloud*, menghasilkan DTM yang menampilkan permukaan tanah secara lebih representatif. Perbedaan tampilan antara DSM yang memuat vegetasi tinggi dan DTM yang telah di-*filter* terlihat pada Gambar 8.

DTM yang dihasilkan melalui proses klasifikasi dan *filtering* menghasilkan model permukaan tanah yang telah terpisah dari objek *non-ground* seperti kendaraan, bangunan, dan vegetasi. Pendekatan penggunaan DTM sebagai dasar perhitungan volume sejalan dengan praktik pada survei tambang karena model ini merepresentasikan elevasi tanah tanpa pengaruh objek sementara. Proses *filtering* berpengaruh langsung terhadap estimasi volume, karena keberadaan objek pada DSM dapat meningkatkan nilai elevasi

dan menyebabkan perbedaan hasil perhitungan volume dibandingkan model permukaan tanah yang telah dibersihkan.



Gambar 7. Objek bangunan pada model DSM (a) dan pada model DTM (b)



Gambar 8. Objek vegetasi tinggi pada model DSM (a) dan pada model DTM (b)

3.3 Hasil Ketelitian DTM

Uji ketelitian horizontal (CE90) dilakukan dengan membandingkan koordinat X dan Y pada DTM terhadap koordinat ICP hasil pengukuran GNSS yang dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai selisih pada masing-masing titik dihitung dan diringkas dalam Tabel 3, yang menunjukkan variasi perbedaan posisi antara kedua sumber data. Perhitungan RMSEr menghasilkan nilai 0,017 meter, kemudian dikonversi menjadi CE90 dengan mengalikan konstanta 1,5175 sehingga diperoleh nilai ketelitian horizontal sebesar 0,026 meter dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil ini memenuhi ketentuan ketelitian kelas 1 untuk peta skala 1:1000 sesuai Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021 dan menunjukkan bahwa 90 persen posisi titik berada dalam radius kesalahan 0,026 meter dari posisi sebenarnya.

Tabel 2. Koordinat Horizontal ICP dan DTM

Nama Titik	X ICP (m)	X DTM (m)	Y ICP (m)	Y DTM (m)
ICP01	470018,495	470018,466	9114336,582	9114336,600
ICP02	470107,503	470107,488	9114516,807	9114516,811
ICP03	470237,322	470237,290	9114403,072	9114403,084
ICP04	470032,243	470032,233	9114479,237	9114479,264

Uji ketelitian vertikal (LE90) dilakukan dengan membandingkan nilai elevasi ICP terhadap nilai elevasi pada DTM sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Selisih elevasi dihitung untuk memperoleh nilai RMSEz sebesar 0,032 meter, kemudian dikonversi menggunakan konstanta 1,6499 sehingga

menghasilkan LE90 sebesar 0,052 meter. Nilai tersebut menempatkan akurasi elevasi DTM dalam klasifikasi ketelitian kelas 1 untuk peta skala 1:1000 (Peraturan BIG Nomor 18 Tahun 2021).

Tabel 3. Tabel Penghitungan CE90

Nama Titik	(ΔX) (m)	(ΔX) ² (m)	(ΔY) (m)	(ΔY) ² (m)	(ΔX) ² + (ΔY) ² (m)
ICP01	0,0290	0,0008410	-0,0180	0,0003240	0,0011650
ICP02	0,0150	0,0002250	-0,0040	0,0000160	0,0002410
ICP03	0,0320	0,0010240	-0,0120	0,0001440	0,0011680
ICP04	0,0100	0,0001000	-0,0270	0,0007290	0,0008290
Jumlah					0,0034
Rerata					0,0003
RMSE					0,017
CE90					0,026

Tabel 4. Tabel Penghitungan LE90

Nama Titik	Z ICP (m)	Z DTM (m)	(ΔZ) (m)	(ΔZ) ² (m)
ICP01	433,054	433,139	-0,085	0,00722500
ICP02	420,833	420,870	-0,037	0,00136900
ICP03	366,830	366,886	-0,056	0,00313600
ICP04	396,430	396,412	0,018	0,00032400
Jumlah				0,012
Rerata				0,001
RMSE _z				0,032
LE90				0,052

3.4 Hasil Perhitungan Volume

Estimasi volume dilakukan untuk memperoleh besarnya material galian pada area tambang kapur dalam batas IUP. Penghitungan menggunakan metode *surface to surface* dengan *comparison surface* berupa DTM hasil dari foto udara yang telah dipotong menggunakan boundary poligon IUP. *Base surface* yang digunakan adalah batas IUP pada elevasi 379,900 meter. Elevasi acuan didapatkan dari rata-rata elevasi hasil pengukuran GNSS pada sebagian lokasi tambang yang telah dilakukan ekskavasi. Penghitungan estimasi menghasilkan volume *cut* sebesar 914.198,4 m³, sedangkan volume *fill* sebesar 156.853,1 m³ (Tabel 4). Volume *fill* tidak digunakan dalam analisis karena aktivitas lapangan berfokus pada penggalian tebing kapur. Kedalaman galian mencapai 57,172 meter dan ketinggian timbunan maksimum mencapai 37,540 meter pada elevasi *base surface* 379,900 meter (Tabel 5).

Tabel 4. Tabel Volume *cut and fill* elevasi 379,900 m

Volume From Surface Geometry	
Material Below 379,900 m (<i>cut</i>)	156.853,1 m ³
Material Above 379,900 m (<i>fill</i>)	914.198,4 m ³
Difference	757.345,3 m ³

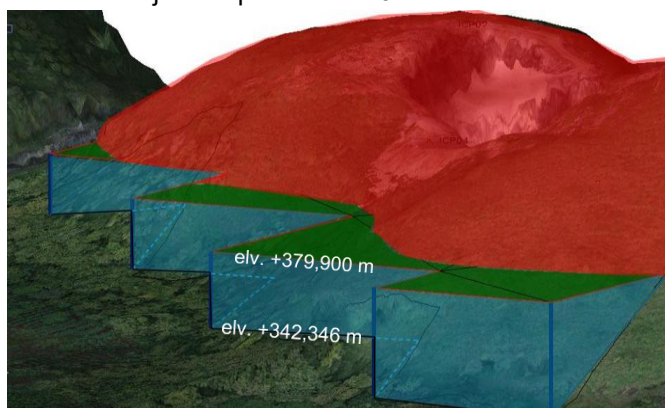
Tabel 5. Tabel Informasi Kedalaman *cut and fill* elevasi 379,900 m

Depth Summary	
Maximum depth above 379,900 m	57,172 m
Maximum depth below 379,900 m	37,540 m

Visualisasi area *cut* dan *fill* ditunjukkan pada Gambar 9. Area yang berwarna merah adalah volume *cut*. Area yang berwarna hijau menunjukkan elevasi dasar (*base surface*) sesuai batas IUP. Area berwarna biru menunjukkan hitungan *fill* yang didapatkan dari perbandingan antara *base surface* dengan *comparison surface*. Berdasarkan kondisi lapangan, hanya volume *cut* yang digunakan karena volume tambang direpresentasikan oleh hitungan volume *cut*.

Perhitungan lanjutan menggunakan elevasi terendah *boundary* menghasilkan kedalaman galian maksimum 94,726 meter tanpa nilai timbunan, karena tidak terdapat material di bawah elevasi acuan

tersebut. Volume galian yang dapat ditambang mencapai pada elevasi 342,346 meter adalah sebesar 2.546.016,1 meter kubik. Hal ini menunjukkan potensi material maksimal apabila produksi dilakukan hingga elevasi terendah, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.



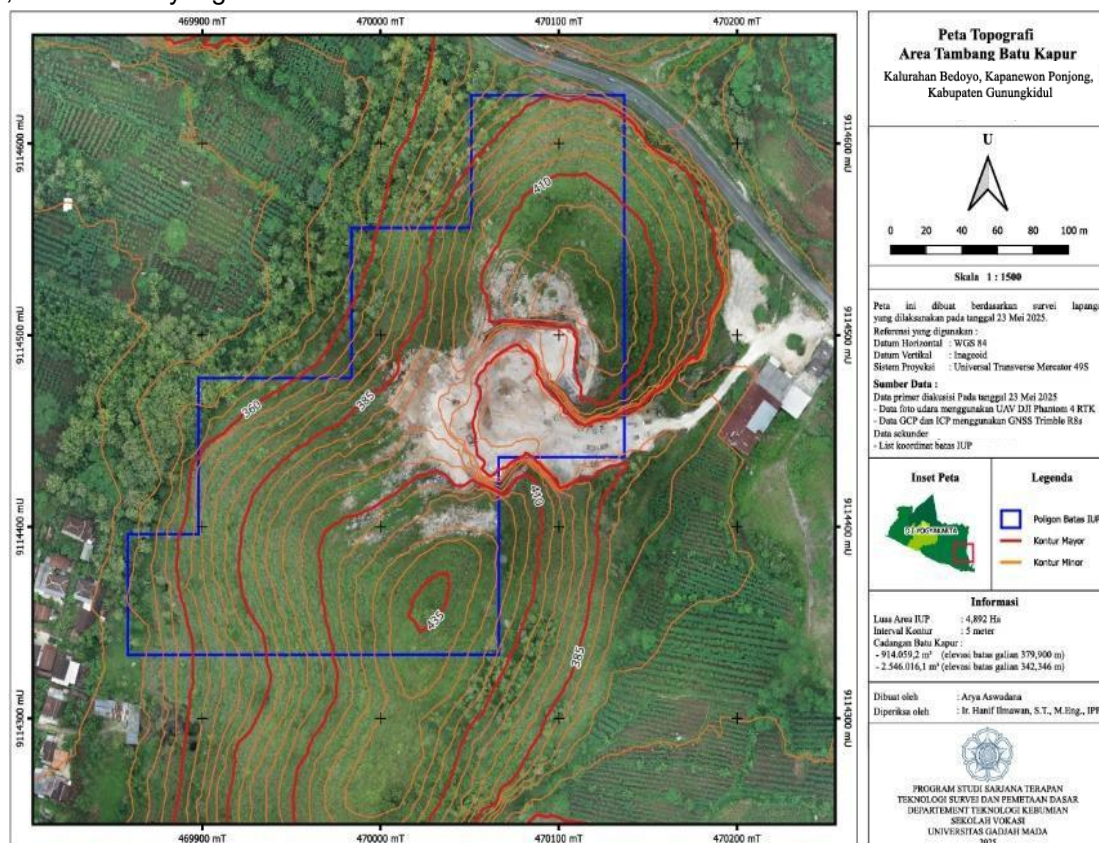
Gambar 9. Visualisasi volume *cut* dan *fill*.

Tabel 6. Tabel Volume *cut and fill* dengan elevasi 342,346 m

Volume From Surface Geometry	
Material Below 342,346 m (<i>cut</i>)	0 m ³
Material Above 342,346 m (<i>fill</i>)	2.546.016 m ³
Difference	2.546.016 m ³

3.5 Hasil Peta Topografi

Peta ortofoto dan peta kontur skala 1:1000 dihasilkan untuk merepresentasikan kondisi aktual area tambang. Data diperoleh melalui akuisisi lapangan dan diolah menjadi informasi spasial yang mencakup perhitungan volume material, luasan wilayah IUP berdasarkan data sekunder, ortofoto hasil pemotretan udara, serta kontur yang dibentuk dari DTM.



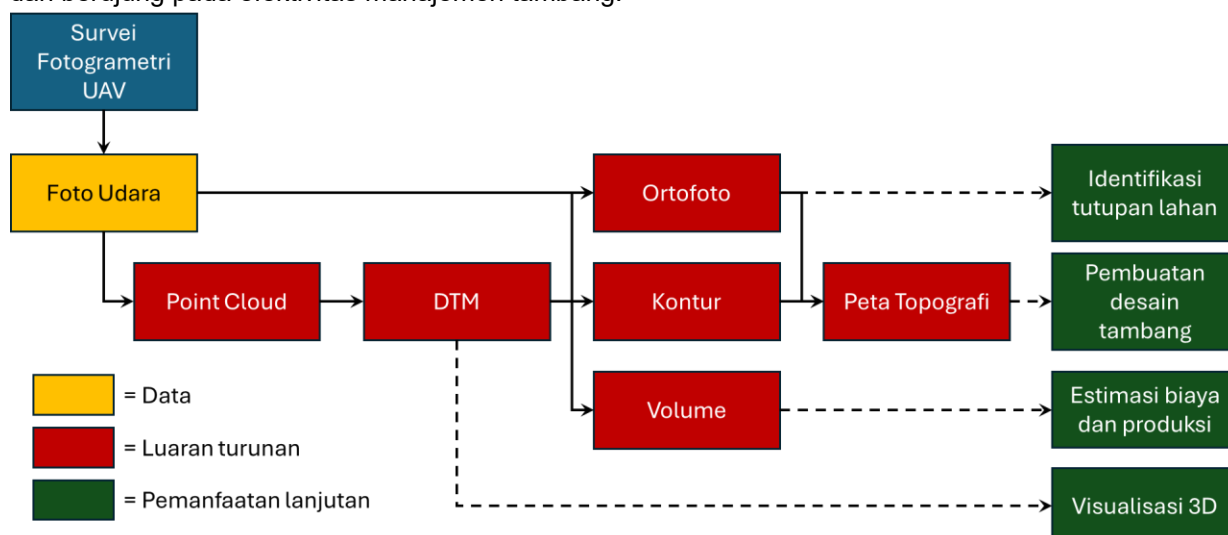
Gambar 10. Hasil Peta Topografi.

Kontur menggunakan interval 5 meter dengan kontur mayor setiap 25 meter, yang dibedakan melalui warna oranye untuk kontur minor dan merah untuk kontur mayor. Bagian barat wilayah IUP terlihat memiliki topografi lebih *landai* yang ditandai oleh keberadaan permukiman serta lahan pertanian singkong. Berdasarkan koordinat batas IUP, luas IUP tercatat sebesar 4,892 hektar yang mencakup bentang lahan batu kapur dengan kondisi bervariasi antara area yang telah ditambang dan area yang masih berupa perbukitan. Peta ortofoto dan kontur tersebut berfungsi sebagai sumber informasi spasial yang dapat digunakan untuk mendukung kegiatan inventarisasi dan pengelolaan wilayah tambang. Hasil Peta Topografi ditunjukkan pada Gambar 10.

3.6 Potensi Penerapan pada Manajemen Pertambangan

Pada studi kasus dalam penelitian ini, fotogrametri dari UAV menghasilkan beberapa luaran. Luaran utama berupa volume cadangan tambang didapatkan setelah menghasilkan luaran-luaran lain terlebih dahulu, yaitu yaitu *point cloud* dan DTM. Luaran-luaran tersebut divisualisasikan dalam bentuk peta topografi (Gambar 10) yang mencakup informasi berupa ortofoto dan kontur. Setidaknya terdapat enam luaran yang dihasilkan dalam kegiatan perhitungan volume dan pembuatan peta topografi.

Jika melihat pemanfaatan lebih jauh selain perhitungan volume, maka terdapat beberapa potensi penggunaan luaran-luaran tersebut (Gambar 11). Hasil perhitungan volume digunakan lebih lanjut dalam estimasi biaya dan produksi (Prakash & Ray, 2021). Pada penelitian ini didapatkan ketelitian DTM secara horizontal sebesar 0,026 meter dan vertikal sebesar 0,052 meter. Ketelitian tersebut dapat menjamin hasil perhitungan volume yang tinggi. Hal ini berpotensi menghasilkan estimasi biaya dan produksi yang akurat dan berujung pada efektivitas manajemen tambang.



Gambar 11. Hasil pengolahan foto udara UAV dan pemanfaatan lanjutan pada industri pertambangan

Masih pada aspek manajemen tambang, ortofoto yang dihasilkan dapat digunakan untuk identifikasi tutupan lahan (Clark dkk., 2023). Hasil identifikasi dapat menjadi acuan dalam menentukan wilayah mana yang akan dilakukan produksi. Hal tersebut akan menentukan batas area yang dikerjakan (*boundary*), sehingga perhitungan volume dapat dilakukan pada lokasi yang lebih spesifik.

Peta topografi yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat dimanfaatkan lebih lanjut untuk pembuatan desain tambang (Spearing dkk., 2022). Bentuk desain tambang akan mempengaruhi volume produksi. Penelitian ini belum mempertimbangkan desain tambang yang biasanya dibuat berundak (memiliki *bench* dan *toe*) atau dengan kemiringan lereng tertentu supaya aman dari longsor. Penerapan desain tambang sebagai *base surface* akan menghasilkan nilai volume tambang yang lebih akurat untuk keperluan produksi tambang. Bahkan desain tersebut dapat disajikan dalam bentuk 3D dan di-*overlay* dengan DTM hasil pengolahan *point cloud* dari foto udara. Penyajian dalam bentuk 3D berpotensi meningkatkan pemahaman pengelola tambang dalam merencanakan aktivitas pertambangan (Choi dkk., 2020).

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada studi kasus ini, fotogrametri dengan UAV dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam berbagai keperluan manajemen pertambangan batu kapur. Berbeda dengan metode lainnya (survei Total Station, Auto Level, dan GNSS) yang umum digunakan dalam industri pertambangan batu kapur, fotogrametri dengan UAV memiliki keunggulan dalam proses akuisisi data yang relatif lebih cepat. Hal ini berdampak langsung pada biaya survei dan perhitungan volume yang lebih efisien. UAV fotogrametri juga memberikan kerapatan data yang lebih tinggi dibandingkan metode survei lainnya sehingga menjamin ketepatan perhitungan volume yang lebih baik.

Terlepas dari hasil-hasil tersebut, metode fotogrametri UAV tetap membutuhkan integrasi dengan survei lainnya. Pengukuran GCP/ICP dan batas *boundary* perhitungan volume perlu dilakukan menggunakan survei GNSS atau survei Total Station. Volume yang didapatkan dari metode fotogrametri UAV juga hanya menggambarkan cadangan tambang sebagai satu jenis material. Dibutuhkan tambahan data penyelidikan tanah guna meningkatkan ketepatan perhitungan volume.

4. KESIMPULAN

DTM area penelitian dapat dihasilkan melalui pengolahan foto udara menggunakan metode SFM- MVS di *Agisoft Metashape* dengan data yang diakuisisi menggunakan UAV DJI Phantom 4 RTK. Uji akurasi menghasilkan nilai CE90 sebesar 0,026 meter dan LE90 sebesar 0,052 meter, sehingga ketelitiannya memenuhi standar kelas 1 untuk peta skala 1:1000 berdasarkan Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 18 Tahun 2021. Perhitungan volume tambang kapur dilakukan menggunakan metode *surface to surface* pada TBC. Perhitungan menggunakan *base surface* pada elevasi 379,900 meter menghasilkan volume galian sebesar 914.198,4 meter kubik dengan kedalaman maksimum 57,172 meter antara elevasi permukaan tertinggi dan elevasi *bottom surface*. Perhitungan menggunakan *base surface* yang mengacu pada elevasi terendah patok batas IUP (342,346 meter) menghasilkan volume galian sebesar 2.546.016,1 meter kubik dengan kedalaman maksimum 94,726 meter. Meski hasil pengujian DTM menunjukkan ketelitian yang baik, perlu dilakukan perbandingan dengan volume galian aktual untuk memastikan ketelitian perhitungan volume. Studi lebih lanjut diperlukan untuk menyelidiki jenis lapisan tanah serta menguji kualitas batu kapur sehingga perhitungan volume menjadi lebih akurat. Penyesuaian terhadap rencana pengelolaan tambang juga dibutuhkan untuk mendapatkan perhitungan volume yang lebih aplikatif.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis berikan kepada PT Anindya Mitra Internasional yang telah memberikan izin akuisisi data.

Daftar Pustaka

- Abidin, H. Z. (2021). *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya* (edisi 2021). ITB Press.
- Apsandi, O. A., Yuwono, B. D., & Sabri, L. M. (2018). Analisis pengukuran metode rapid static dengan single base dan multi base (Studi kasus titik geoid geometri di Kota Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*, 7(4), 138–146.
- ASI. (2025). *Indonesia Cement Statistics 2024*. Asosiasi Semen Indonesia. <https://asi.or.id/wp-content/uploads/2025/09/Indonesia-Cement-Statistics-2024.pdf>
- Bakara, J. (2011). Perkembangan sistem satelit navigasi global dan aplikasinya. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, 12(2).
- Choi, Y., Baek, J., & Park, S. (2020). Review of GIS-based applications for mining: Planning, operation, and environmental management. *Applied Sciences*, 10(7), 2266. <https://doi.org/10.3390/app10072266>

- Clark, A., Phinn, S., & Scarth, P. (2023). Optimised U-Net for land use–land cover classification using aerial photography. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 91(2), 125–147. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00233-3>
- Croneborg, L., Saito, K., Matera, M., & McKeown, D. (2020). *Digital elevation models*. Washington, D.C.: The World Bank. <https://doi.org/10.1596/34445>
- Eren, M., Kurtulgu, Z., & Pirti, A. (2025). Evaluation of the repeatability and accuracy of RTK GNSS under tree canopy. *Jurnal Sylva Lestari*, 13(2), 392–405. <https://doi.org/10.23960/jsl.v13i2.1110>
- Franstein, K. J. B., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. (2019). Analisis akurasi DTM hasil ekstraksi data pemetaan airborne LiDAR skala besar menggunakan algoritma cloth simulation filtering, parameter-free ground filtering dan simple morphological filtering terhadap slope based filtering. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(4), 195–204.
- Ghilani, C. D. (2018). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Gumilar, I., & Bramanto, B. (2021). *Metode Penentuan Posisi dengan GNSS dan Langkah Praktis Pengolahan Data GNSS*. Refika Aditama.
- Hao, J., Zhang, X., Wang, C., Wang, H., & Wang, H. (2023). Application of UAV digital photogrammetry in geological investigation and stability evaluation of high-steep mine rock slope. *Drones*, 7(3), 198. <https://doi.org/10.3390/drones7030198>
- Harwin, S., & Lucieer, A. (2012). An accuracy assessment of georeferenced *point clouds* produced via multi-view stereo techniques applied to imagery acquired via unmanned aerial vehicle. *ISPRS Archives*, XXXIX-B7, 475–480. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-475-2012>
- Huang, D., & Qin, R. (2025). Uncertainty estimation for photogrammetric *point clouds* of UAV imagery. *ISPRS Archives*, XLVIII-G-2025, 657–664. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-G-2025-657-2025>
- Jang, Y. J., Oh, J. H., & Lee, C. N. (2020). Urban building change detection using nDSM and road extraction. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38(3), 237–246. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.3.237>
- Nugroho, G. S., & Hazmin, G. (2022). Perbandingan algoritma untuk mereduksi noise pada citra digital. *Journal of Information Technology Ampera*, 3(2), 159–174. <https://doi.org/10.51519/journalita.volume3.issue2.year2022.page159-174>
- Oates, J. A. H. (1999). *Lime and limestone: Chemistry and technology, production and uses*. Wiley-VCH.
- Pepe, M., Costantino, D., Alfio, V. S., & Zannotti, N. (2021). 4D geomatics monitoring of a quarry for the calculation of extracted volumes using TIN and grid model. *Geographia Technica*, 16(3), 1–14. https://doi.org/10.21163/GT_2021.163.01
- Prakash, A. & Ray, A., 2021. Criticality in computation of volume excavated by opencast mining: Some key observations. *Indian Journal of Engineering*, 18(49), 48–57.
- Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 18 Tahun 2021 Tentang Tata Cara Penyelenggaraan Informasi Geospasial, Badan Informasi Geospasial (2021). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/217091/peraturan-big-no-18-tahun-2021>
- Priyadinata, R. & Siregar, C. A. (2022). Perbandingan analisis perhitungan *cut and fill* menggunakan data topografi manual dan digital. *SIMTEKS*, 2(2), 215–228. <https://doi.org/10.32897/simteks.v2i2.1239>
- Pysmennyi, S., Peremetchyk, A., Chukharev, S., Fedorenko, S., Anastasov, D., & Tomiczek, K. (2022). The mining and geometrical methodology for estimating of mineral deposits. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1049, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.
- Rasyid, R. W., Sudarsono, B., & Amarrohman, F. J. (2016). Analisis pengukuran bidang tanah dengan menggunakan GNSS metode RTK-NTRIP pada jaringan CORS. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(4), 101–111.
- Skorobogatov, G., Barrado, C., Salamí, E., & Pastor, E. (2021). Flight planning in multi-unmanned aerial vehicle systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(1). <https://doi.org/10.1177/1729881421989551>

- Spearing, A. S., Ma, L., & Ma, C. A. (2022). *Mine design, planning and sustainable exploitation in the digital age*. CRC Press.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Wu, S., Feng, L., Zhang, X., Yin, C., Quan, L., & Tian, B. (2025). Optimizing overlap percentage for enhanced accuracy and efficiency in oblique photogrammetry building 3D modeling. *Construction and Building Materials*, 489, 142382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142382>