

EVALUASI AKURASI PERHITUNGAN VOLUME ESTIMASI DAN AKTUAL PELEDAKAN QUARRY MENGGUNAKAN GNSS RTK DAN FOTOGRAMETRI UAV

(ACCURACY EVALUATION OF ESTIMATED AND ACTUAL QUARRY BLASTING VOLUMES USING GNSS RTK AND UAV PHOTOGRAMMETRY)

Virnanda Nur Mahanani¹, Hanif Ilmawan^{1*}, Hidayat Panuntun¹, Muhammad Iqbal Taftazani¹

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

* Korespondensi E-mail: hanif.ilmawan@ugm.ac.id

Abstrak

Evaluasi volume hasil peledakan *quarry* merupakan bagian penting dalam pengendalian produksi dan penilaian kinerja peledakan pada tambang terbuka. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi akurasi volume estimasi peledakan *quarry* terhadap volume aktual yang didapatkan dari pengukuran menggunakan GNSS *Real Time Kinematic* (RTK) dan fotogrametri *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Penelitian dilakukan di tiga lokasi sampel. Volume estimasi dihitung menggunakan metode C. J. Konya berdasarkan parameter geometri peledakan, sedangkan volume aktual dihitung dengan metode *net volume between DTMs* menggunakan *Digital Terrain Model* (DTM) yang dibangun dari data GNSS RTK dan fotogrametri UAV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa volume aktual dari kedua metode pengukuran secara konsisten lebih besar dibandingkan volume estimasi, yang mengindikasikan terjadinya *overbreak*. Perbandingan volume GNSS RTK terhadap estimasi menghasilkan *relative error* rata-rata 2,328%, sedangkan fotogrametri UAV terhadap estimasi sebesar 3,864%. Sementara itu, perbandingan GNSS RTK dan fotogrametri UAV menghasilkan *relative error* rata-rata 1,490%. Hasil uji *paired t-test* pada tingkat kepercayaan 95% menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antar metode perhitungan volume.

Kata kunci: Konya, Fotogrametri UAV, GNSS RTK, Peledakan *Quarry*, Perhitungan Volume

Abstract

Evaluation of quarry blasting volume is an essential component of production control and blasting performance assessment in open-pit mining operations. This study aims to evaluate the accuracy of estimated quarry blasting volumes against actual volumes obtained through measurements using Global Navigation Satellite System Real-Time Kinematic (GNSS RTK) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry. The research was conducted at three sample locations. Estimated blasting volumes were calculated using the C.J. Konya method based on blasting geometry parameters, while actual volumes were determined using the net volume between DTMs method based on Digital Terrain Models (DTMs) generated from GNSS RTK and UAV photogrammetry data. The results indicate that the actual volumes derived from both measurement methods were consistently greater than the estimated volumes, suggesting the occurrence of overbreak. The comparison between GNSS RTK and estimated volumes yielded an average relative error of 2.328%, while the comparison between UAV photogrammetry and estimated volumes resulted in an average relative error of 3.864%. Meanwhile, the comparison between GNSS RTK and UAV photogrammetry produced an average relative error of 1.490%. The results of the paired t-test at a 95% confidence level showed no statistically significant differences among the volume calculation methods.

Keywords: Konya, GNSS RTK, Quarry Blasting, UAV Photogrammetry, Volume Calculation

Article History	Submitted: 21-06-2026	Revised: 14-07-2026	Accepted: 27-08-2026
Published by	Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Palangka Raya		
License	CC BY-SA 4.0		
DOI	10.36873/jtp.v26i2.26776		

1. Pendahuluan

Penambangan adalah kegiatan ekstraksi atau pengambilan material berharga dari dalam bumi. Material yang ditambang kadang kala bersifat keras dan kompak. Pada kasus tersebut, proses pembongkaran tidak dapat dilakukan secara optimal hanya dengan alat mekanis seperti *excavator*.

Dibutuhkan metode tertentu untuk memberaikan material sehingga lebih mudah digali. Salah satu metode yang umum digunakan adalah peledakan (*blasting*).

Peledakan menghasilkan sejumlah volume material terbongkar yang perlu diketahui secara terukur. Keterukuran tersebut menjadi penting karena digunakan sebagai dasar perencanaan produksi dan pengendalian biaya. Pemantauan kesesuaian antara desain peledakan dan estimasi volume terhadap hasil aktual peledakan dibutuhkan untuk mengevaluasi kinerja peledakan (Bamford et al., 2020).

Estimasi volume peledakan ditentukan berdasarkan parameter geometri dan pola peledakan yang dapat dikontrol (Marina et al., 2024; Murad et al., 2023). Namun, pada pelaksanaan di lapangan berbagai faktor dapat menyebabkan perbedaan antara volume estimasi dan aktual hasil peledakan. Ketidakesesuaian ini dapat memengaruhi evaluasi peledakan dan penyesuaian rencana kerja berikutnya, terutama ketika pembongkaran dilakukan secara bertahap melalui beberapa kali peledakan pada area yang sama hingga material terbongkar mendekati target rencana.

Ketidakesesuaian antara volume estimasi dan aktual peledakan dapat bersumber dari dua sisi. Jika dilihat dari sudut pandang estimasi, kesalahan dapat bersumber dari penggunaan parameter yang kurang tepat. Sebaliknya, dari sudut pandang volume aktual, sumber kesalahan bisa berasal dari metode pengukuran yang kurang tepat.

Salah satu metode pengukuran yang umum dilakukan di industri pertambangan adalah survei GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (Kumara et al., 2024; Sari et al., 2025). Survei GNSS dapat dilakukan melalui berbagai cara, salah satunya penentuan posisi secara diferensial dengan koreksi posisi *real time*. Metode tersebut dikenal dengan istilah *Real Time Kinematic* (RTK). Metode ini dapat menghasilkan ketelitian posisi hingga fraksi centimeter, bahkan milimeter pada kondisi tertentu. Namun, salah satu kendala survei GNSS RTK adalah surveyor harus berada di atas tumpukan material hasil peledakan. Aktivitas ini menjadikan surveyor berada dalam kondisi yang berisiko tinggi mengalami kecelakaan kerja.

Pemanfaatan teknik fotogrametri berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menjadi alternatif untuk pemantauan pertambangan, termasuk dalam pekerjaan peledakan (Bamford et al., 2020; Himmy et al., 2025). Fotogrametri UAV dapat digunakan untuk memodelkan suatu tumpukan material hasil peledakan secara 3D. Beberapa keunggulan yang diberikan oleh metode ini yaitu: (1) aktivitas survei dapat dilakukan dari jarak jauh; (2) pengambilan data relatif lebih cepat; dan (3) data topografi yang dihasilkan lebih rapat dan menyeluruh (disajikan sebagai *point cloud*) (Maulana and Kuncoro, 2025).

Fotogrametri UAV memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode GNSS RTK. Namun, akurasi yang dihasilkan fotogrametri UAV umumnya lebih rendah daripada GNSS RTK, baik itu secara horizontal maupun vertikal (Raeva et al., 2016). Hal tersebut tentunya berpengaruh pada hasil akhir perhitungan volume.

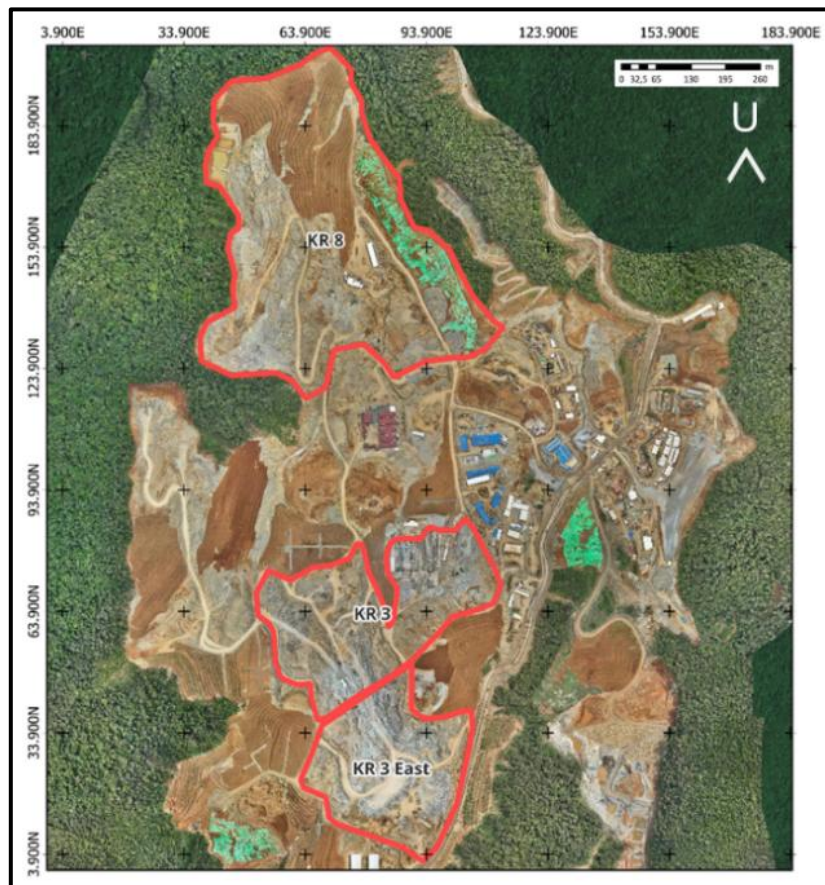
Penelitian ini bermaksud mengevaluasi ketelitian perhitungan volume peledakan. Dalam penelitian ini, digunakan tiga buah model perhitungan volume, yaitu (1) perhitungan estimasi berdasarkan desain peledakan; (2) perhitungan hasil aktual peledakan dari survei GNSS RTK; serta (3) perhitungan volume aktual peledakan hasil survei fotogrametri UAV. Hasil penelitian ini diharapkan mampu menggambarkan akurasi ketiga model perhitungan tersebut secara komparatif sehingga dapat dimanfaatkan untuk menentukan metode perhitungan yang tepat.

Beberapa penelitian telah melakukan komparasi volume yang dihasilkan dari metode GNSS RTK dengan fotogrametri UAV. Namun, umumnya penelitian yang telah dilakukan hanya terbatas pada komparasi selisih volume dan *error*, baik itu secara kubikasi maupun presentase (Kokamägi et al., 2020; Mantey and Aduah, 2021; Maulana and Kuncoro, 2025; Raeva et al., 2016). Berbeda dengan hal tersebut, penelitian ini melakukan evaluasi perbedaan volume secara statistik melalui *paired t-test*. Penelitian terdahulu pada umumnya melakukan pengujian dengan menggunakan objek berupa tumpukan (*stockpile*) (Mantey and Aduah, 2021; Maulana and Kuncoro, 2025; Putrawiyanta, 2024; Sari et al., 2025). Objek penelitian ini adalah volume peledakan sehingga berupa cekungan hasil pengerukan yang memiliki karakteristik berbeda dengan *stockpile*. Bentuk *stockpile* umumnya menyerupai kerucut atau limas dengan kemiringan seragam, sedangkan hasil peledakan lebih bervariasi.

2. Metode

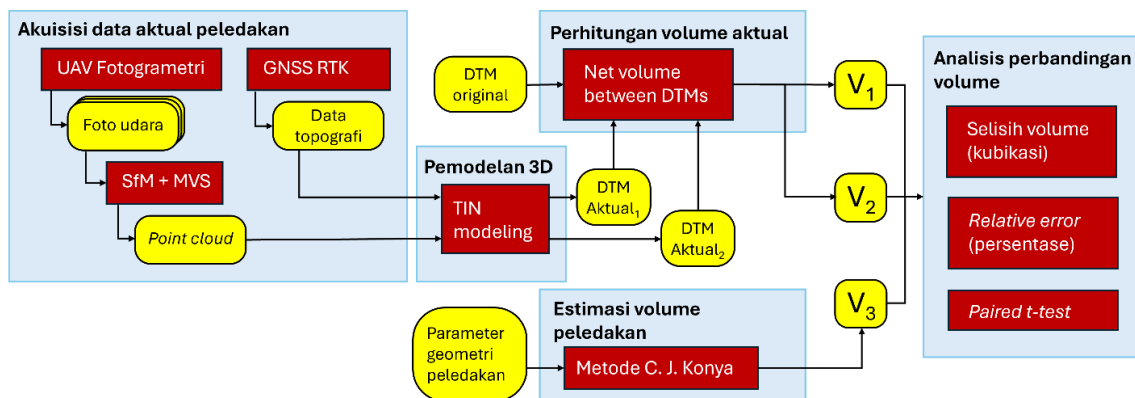
a. Lokasi dan Sampel Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di area pertambangan nikel, tepatnya di Kecamatan Wasile Selatan, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara. Secara geologi regional, wilayah Halmahera terletak pada zona tumbukan tiga lempeng litosfer dan tersusun atas kompleks ofiolit dengan batuan dasar ultrabasa berupa harzburgit dan lherzolit yang terdepleksi kuat, disertai dunit dan serpentinit (Konopka et al., 2022). Proses pelapukan lateritik tropis pada periode Kenozoikum membentuk profil laterit setebal $\pm 8\text{--}10$ m di atas batuan dasar tersebut, dengan gradasi dari zona limonit yang lunak dan porous di bagian atas menuju zona saprolit dan *bedrock* ultrabasa segar yang keras dan masif pada lapisan yang lebih dalam. Material *bedrock* ultrabasa yang kompak tidak dapat digali secara langsung menggunakan alat gali mekanis. Oleh karena itu, aktivitas penambangan di wilayah ini harus terlebih dahulu diberai melalui proses peledakan (*blasting*).



Gambar 1. Lokasi dan sebaran sampel penelitian.

Wilayah kajian ditunjukkan pada pada Gambar 1. Tiga area yang dibatasi garis berwarna merah merupakan sampel penelitian. Ketiga lokasi tersebut secara berurutan dari utara ke selatan disebut dengan sub pit KR 3, sub pit KR 3 East, dan sub pit KR 8. merupakan sampel penelitian. Ketiga lokasi tersebut secara berurutan dari utara ke selatan disebut dengan sub pit KR 3, sub pit KR 3 East, dan sub pit KR 8. Ketiga lokasi sampel memiliki karakteristik lapangan yang bervariasi. Sub pit KR 3 merupakan blok penambangan utama berintensitas alat berat tinggi dengan material batuan keras dan jenjang topografi yang dinamis. Sub pit KR 3 East berfungsi sebagai area perluasan lateral dengan geometri lereng yang lebih sempit serta pola rekahan batuan alami yang lebih bervariasi. Sub pit KR 8 memiliki luasan area peledakan yang masif dengan geometri lubang bor seragam. Dari ketiga lokasi tersebut, sub pit KR 8 memiliki topografi terbuka yang mengalami perubahan paling cepat setiap minggu akibat tingginya ritme pengangkutan material pasca peledakan. Variasi ketiga sampel tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang menyeluruh dan objektif berkaitan dengan fokus penelitian ini.



Gambar 2. Tahapan penelitian

b. Estimasi Volume Peledakan

Estimasi volume peledakan dilakukan berdasarkan parameter geometri peledakan di ketiga sampel lokasi. Parameter peledakan yang digunakan meliputi *burden* (B), *spacing* (S), *depth* (D), serta jumlah lubang ledak (n). Seluruh parameter diperoleh dari data desain dan laporan pelaksanaan peledakan di masing-masing sampel lokasi. Nilai *burden* menunjukkan jarak antar lubang ledak. *Spacing* menggambarkan jarak lubang ledak terhadap bidang bebas (*free face*) yang terpengaruh peledakan. Parameter *depth* menunjukkan kedalaman lubang bor yang merepresentasikan tinggi jenjang batuan yang diledakkan, sedangkan jumlah lubang ledak menunjukkan total titik peledakan pada setiap pelaksanaan peledakan.

Perhitungan volume peledakan dilakukan menggunakan metode C. J. Konya (Konya and Walter, 1990). Dalam metode tersebut, volume peledakan didapatkan dari hasil perkalian *burden*, *spacing*, *depth*, dan jumlah lubang ledak. Volume yang didapatkan merupakan akumulasi volume teoritis setiap lubang berdasarkan dimensinya dikalikan dengan jumlah lubang dalam satu kali peledakan. Hasil estimasi volume diukur dalam volume insitu atau biasa disebut *bank cubic meter* (BCM). Metode C. J. Konya dipilih karena lebih optimal dari segi teknis dan pertimbangan ekonomis dibandingkan metode R. L. Ash dan ICI-Explosive (Murad et al., 2023).

c. Volume Aktual Peledakan

Pengambilan data volume aktual pada penelitian ini mewakili satu periode peledakan yang berlangsung selama 5 hingga 6 minggu. Volume aktual peledakan didapatkan dari akumulasi volume material hasil peledakan yang terbongkar setiap minggunya secara progresif hingga total volume aktual mendekati total volume estimasi perencanaan awal pada akhir periode peledakan. Terdapat dua metode pengukuran volume aktual yang digunakan, yaitu survei GNSS RTK dan survei fotogrametri UAV. Metode GNSS RTK merupakan sistem penentuan posisi secara *real time* yang bekerja secara diferensial. Dalam metode ini, *receiver rover* menerima data fase dan *pseudorange* dari stasiun referensi (*base station*) secara *real time* melalui media komunikasi tertentu. Dengan demikian, posisi suatu titik dapat diperoleh secara langsung tanpa memerlukan proses *post-processing* (Tiberius et al., 2022). Data survei GNSS RTK berupa data topografi situasi pit harian (*daily*). Data ini mencakup kegiatan survei pada bagian *crest*, *toe*, dan *spotheight*. Kerapatan data disesuaikan dengan kondisi topografi hasil peledakan sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan model 3D yang representatif. Data disimpan sebagai koordinat *Easting* (E), *Northing* (N), dan *Elevation* (Z) dalam sistem koordinat UTM zona 52N. Metode kedua dilakukan dengan mengambil sekumpulan foto udara menggunakan sensor yang diangkut UAV. Proses akuisisi data foto udara dilakukan dengan mengacu pada Keputusan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 17.K/HK.02/DJB.S/2023. Dalam ketentuan tersebut, nilai pertampalan ke muka (*overlap*), pertampalan ke samping (*sidelap*), dan tinggi terbang (*altitude*) berturut-turut ditetapkan sebesar 80%, 60%, dan 200 m.

Pengolahan foto udara menggunakan metode *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi View Stereo* (MVS). SfM diterapkan dengan mencakup empat proses, yaitu: (1) identifikasi titik ikat; (2) pencocokan titik ikat antar foto; (3) penyaringan titik ikat dengan tingkat kecocokan tertentu; serta (4) *bundle adjustment* untuk rekonstruksi *sparse cloud* (Toriya et al., 2022). Keempat proses ini akan menghasilkan posisi kamera dan sekumpulan titik ikat yang disebut *sparse cloud*. Akurasi posisi ditingkatkan melalui proses *georeferencing* menggunakan *Ground Control Point* (GCP) pada tahap

bundle adjustment. Masing-masing sampel lokasi memiliki sebaran GCP yang diukur menggunakan metode GNSS *static* selama 15 menit. Dengan memanfaatkan hasil dari proses SfM, MVS digunakan untuk mengekstraksi sekumpulan titik 3D yang disebut *dense cloud* (Sun et al., 2024). *Dense cloud* dan *sparse cloud* pada dasarnya merujuk pada jenis data yang sama, yaitu *point cloud*, tetapi dengan tingkat kerapatan yang berbeda.

Hasil survei GNSS RTK dan survei fotogrametri UAV diolah lebih lanjut menjadi *Digital Terrain Model* (DTM). Metode *Triangulated Irregular Network* (TIN) digunakan untuk merepresentasikan topografi melalui jaringan segitiga. Tiap titik pada ujung segitiga (*vertices*) memiliki nilai elevasi tertentu sesuai hasil interpolasi dari data masukan (dalam hal ini data topografi dari survei GNSS RTK dan *sparse cloud* dari fotogrametri UAV). Tiap segitiga pada TIN saling terhubung dan menghadap ke arah tertentu (*face*), tetapi tidak saling berpotongan. Karena sifat tersebut, TIN mampu merepresentasikan dengan baik suatu bentuk topografi yang kompleks (He et al., 2025). Secara konseptual, volume antara dua DTM diperoleh dari ruang yang terbentuk di antara dua permukaan digital pada area dengan batasan (*boundary*) yang sama. Setiap posisi horizontal (X,Y) pada area perhitungan memiliki dua nilai elevasi, yaitu elevasi permukaan awal atau *pre-blast* (Z_{pre}) dan elevasi permukaan akhir atau *post-blast* (Z_{post}). Selisih elevasi antara kedua permukaan tersebut menghasilkan nilai perubahan tinggi (ΔZ). Apabila selisih elevasi tersebut dikalikan dengan luas area pengaruhnya, maka akan diperoleh volume perubahan permukaan. Dengan demikian, volume tidak diperoleh dari satu titik pengukuran tertentu, melainkan dari akumulasi selisih elevasi antara dua model permukaan DTM pada seluruh area perhitungan. Pada model TIN, perubahan tinggi dievaluasi pada setiap segitiga yang terbentuk (Li et al., 2004). Perhitungan volume dilakukan dengan membandingkan DTM hasil peledakan dengan DTM topografi original (*net volume between DTM*s). DTM topografi original merupakan model topografi pit sebelum dilakukan peledakan. Volume dari DTM hasil survei GNSS RTK dan fotogrametri UAV menggunakan DTM original dan *boundary* yang sama guna memastikan perbandingan volume yang setara.

d. Analisis Perbandingan Volume

Dalam penelitian ini, perbandingan dilakukan terhadap tiga jenis volume, yaitu volume aktual hasil survei GNSS RTK (V_1) dan fotogrametri UAV (V_2), serta volume estimasi hasil perhitungan dengan metode C. J. Konya (V_3). Analisis perbandingan dilakukan melalui tiga cara. Yang pertama adalah perbandingan langsung dengan menghitung selisih antara dua volume. Karena menggunakan tiga sampel dan hasilnya masing-masing dapat berupa nilai negatif maupun positif, maka selisih rata-rata dihitung sebagai *mean absolute error* (MAE) (Hodson, 2022). Analisis kedua adalah mengevaluasi persentase selisih antara dua volume atau disebut dengan *relative error*. *Relative error* adalah perbandingan selisih antara dua volume terhadap salah satu volume yang dianggap sebagai *true value*. Karena salah satu volume ditetapkan sebagai *true value*, maka selisih antara dua volume tersebut disebut sebagai kesalahan atau *error*. Sebagaimana dijelaskan oleh Kokamägi et al. (2020), nilai *relative error* hingga 3% umumnya dapat diterima dalam industri pertambangan. Analisis ketiga dilakukan dengan uji statistik *paired t-test*. Hipotesis nol yang digunakan adalah rata-rata selisih antara kedua volume sama dengan nol. Hipotesis nol ditolak atau kedua volume dinyatakan berbeda signifikan jika nilai t-hitung (absolut) lebih dari nilai t-tabel (Ghilani, 2017). Pengujian dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95%.

3. Hasil dan Pembahasan

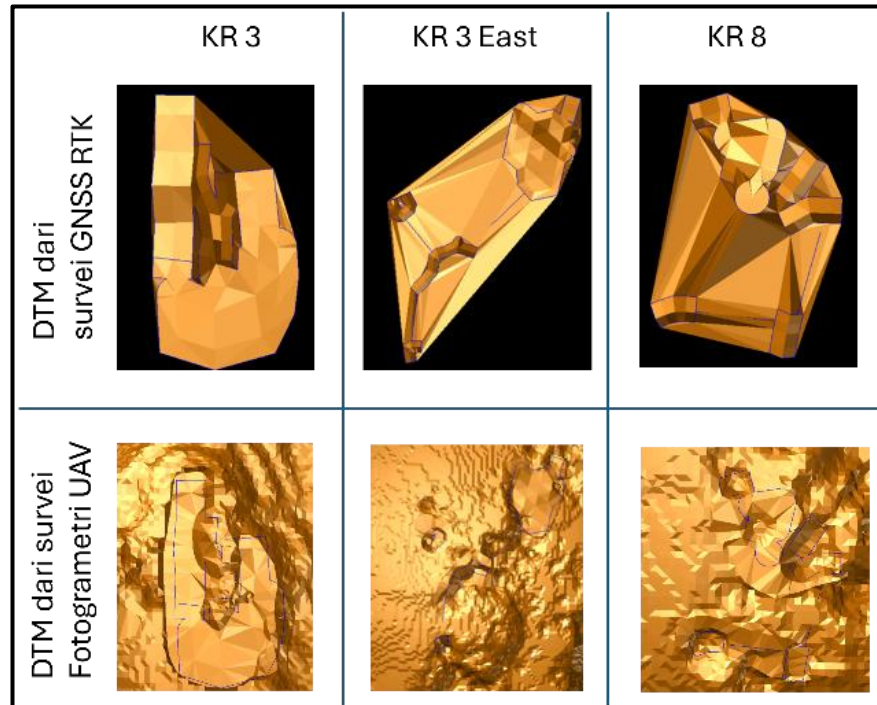
a. Hasil pembuatan DTM

DTM merepresentasikan bentuk topografi aktual hasil peledakan. Gambar 3 menunjukkan perbandingan hasil pembuatan DTM dari data survei GNSS RTK (selanjutnya disebut DTM Aktual₁) dan survei fotogrametri UAV (selanjutnya disebut DTM Aktual₂). Tampak bahwa DTM Aktual₂ memiliki detail variasi topografi yang lebih baik di semua lokasi. Bagian tepi DTM Aktual₁ kurang terbentuk dengan baik. Hal ini terindikasi dari jaringan segitiga TIN yang membangun DTM di bagian tepi memiliki sisi (*edge*) yang sangat panjang. Menurut Li et al. (2004), pembentukan TIN yang baik mensyaratkan segitiga yang dibangun memiliki bentuk sama sisi (atau mendekati sama sisi), serta jumlah panjang sisi segitiga tersebut seminimal mungkin.

DTM Aktual₂ menggunakan lebih banyak titik elevasi daripada DTM Aktual₁ (Tabel 1). Hal ini disebabkan karena survei fotogrametri UAV mampu menghasilkan titik topografi yang lebih banyak dan rapat dibandingkan metode survei GNSS RTK. Menurut Li et al. (2025), salah satu hal yang menentukan tingkat ketepatan DTM dalam merepresentasikan suatu permukaan adalah jumlah titik topografi. Hasil pengolahan foto udara menunjukkan kerapatan *point cloud* mencapai ± 20 titik/m².

Point cloud tersebut merupakan hasil dari proses MVS saat pengolahan foto udara dan bertindak sebagai titik topografi dalam pembentukan DTM.

Kemampuan survei fotogrametri UAV untuk menghasilkan kerapatan titik yang lebih tinggi daripada survei GNSS RTK mengindikasikan potensi pemanfaatan yang baik dalam merepresentasikan suatu permukaan objek, terutama jika variasi topografinya tinggi. Pada pengukuran *stockpile* (Mantey and Aduah, 2021; Raeva et al., 2016; Sari et al., 2025), objek memiliki bentuk yang relatif lebih teratur dengan kemiringan seragam. Hal tersebut tidak ditemui pada lokasi hasil peledakan yang memiliki bentuk topografi lebih bervariasi. Representasi variasi topografi yang lebih detail berpotensi menghasilkan akurasi perhitungan volume yang lebih baik.



Gambar 3. Hasil Pembuatan DTM

Hasil pembuatan DTM aktual pada Tabel 1 menunjukkan rentang elevasi maksimal dan minimal pada masing-masing sampel lokasi. Terlihat bahwa terdapat selisih yang cukup signifikan antara DTM Aktual₁ dengan DTM Aktual₂. Rata-rata selisih elevasi terendah adalah sebesar 5,046 m, sedangkan rata-rata selisih elevasi tertinggi adalah 4,174. Secara teoritis, ketelitian posisi yang dihasilkan oleh survei fotogrametri UAV lebih rendah dibandingkan survei GNSS RTK (Raeva et al., 2016). Namun, Tabel 1 mengindikasikan tiap lokasi memiliki variasi selisih elevasi yang beragam, sehingga dapat diasumsikan bahwa tidak terjadi kesalahan sistematis, misalnya akibat kesalahan pendefinisian elevasi datum referensi. Perbedaan elevasi dapat disebabkan karena ada beberapa titik yang tidak terekam pada metode GNSS RTK. Sebagaimana dijelaskan pada sub bab 1, survei GNSS RTK mensyaratkan surveyor untuk berdiri langsung di lokasi hasil peledakan. Jika akses titik tersebut tidak dapat dijangkau, maka tidak ada perekaman elevasi pada posisi tersebut. Dalam kasus tersebut, proses generalisasi diterapkan pada saat pembuatan model DTM sehingga dapat mempengaruhi akurasi perhitungan volume.

Tabel 1. Perbandingan hasil pembuatan DTM

Lokasi	DTM Aktual ₁			DTM Aktual ₂		
	Jml. Titik	Elev. Min. (m)	Elev. Max. (m)	Jml. Titik	Elev. Min. (m)	Elev. Max. (m)
KR 3	298	321,928	330,001	5.650	314,810	328,940
KR 3 East	394	321,307	329,048	2.010	324,600	335,120
KR 8	204	292,148	304,090	2.887	287,420	309,480

b. Hasil perhitungan volume

Volume aktual hasil survei GNSS RTK (selanjutnya disebut dengan V_1) pada sub pit KR 3, KR 3 East, dan KR 8 masing-masing sebesar 3.126,475 BCM, 884,516 BCM, dan 5.820,423 BCM. Volume aktual hasil survei fotogrametri UAV (selanjutnya disebut dengan V_2) pada lokasi yang sama secara berturut-turut sebesar 3.198,920 BCM, 895,337 BCM, dan 5.874,518 BCM. Sementara itu, volume estimasi peledakan (selanjutnya disebut dengan V_3) pada KR 3, KR 3 East, dan KR 8 masing-masing sebesar 2.979,040 BCM, 870,800 BCM, dan 5.793,750 BCM. Pada ketiga lokasi, volume aktual dari kedua metode pengukuran (GNSS RTK dan fotogrametri UAV) secara konsisten lebih besar dibandingkan volume estimasi (Tabel 2). Kondisi ini mengindikasikan terjadinya *overbreak*, yaitu terbongkarnya material di luar batas rencana peledakan akibat penjarangan gelombang kejut yang melampaui geometri lubang ledak yang didesain. Fenomena *overbreak* merupakan hal yang lazim ditemukan pada operasi peledakan tambang terbuka dan menjadi salah satu faktor utama ketidaksesuaian antara volume estimasi dan volume aktual (Bamford et al., 2020).

Tabel 2. Hasil perhitungan volume

Lokasi	V_1 (BCM)	V_2 (BCM)	V_3 (BCM)
KR 3	3.126,475	3.198,920	2979,040
KR 3 East	884,516	895,337	870,800
KR 8	5.820,423	5.874,518	5793,750

Analisis perbandingan volume secara kuantitatif disajikan pada Tabel 3 melalui tiga skenario. Skenario 1 (V_1 dengan V_3) menghasilkan MAE sebesar 62,608 BCM dengan *relative error* rata-rata 2,328%. Skenario 2 (V_2 dengan V_3) menghasilkan MAE sebesar 108,395 BCM dengan *relative error* rata-rata 3,864%. Skenario 3 (V_1 dengan V_2) menghasilkan MAE sebesar 45,787 BCM dengan *relative error* rata-rata 1,490%.

Tabel 3. Perbandingan volume estimasi dan aktual

Lokasi	Skenario 1 (V_1 dengan V_3)			Skenario 2 (V_2 dengan V_3)			Skenario 3 (V_1 dengan V_2)		
	Selisih (BCM)	<i>Relative error</i> (%)	t hitung	Selisih (BCM)	<i>Relative error</i> (%)	t hitung	Selisih (BCM)	<i>Relative error</i> (%)	t hitung
KR 3	147,435	4,949		219,880	7,381		72,445	2,317	
KR 3 East	13,716	1,575	1,725	24,537	2,818	2,140	10,821	1,223	1,176
KR 8	26,673	0,460		80,768	1,394		54,095	0,929	
MAE	62,608	2,328		108,395	3,864		45,787	1,490	
Kesimpulan	t hitung < t tabel ; H0 diterima			t hitung < t tabel ; H0 diterima			t hitung < t tabel ; H0 diterima		

Selisih volume estimasi dengan volume aktual di lokasi KR 3 cenderung lebih besar dibandingkan dua lokasi lainnya. Berdasarkan Tabel 2, volume KR 3 lebih kecil daripada KR 8, tetapi lebih besar daripada KR 3 East. Hal ini mengindikasikan tidak adanya hubungan linear antara besarnya volume dengan tingkat perbedaan antar metode perhitungan volume. Bahkan selisih volume di KR 3 cenderung lebih besar dibandingkan lokasi lainnya. Nilai selisih dan *relative error* pada Skenario 2 cenderung lebih besar dibandingkan Skenario 1 di semua lokasi sampel. Jika merujuk pada ketentuan umum di industri pertambangan dan V_3 diasumsikan sebagai mekanisme kontrol, maka V_2 tidak dapat diterima karena nilai *relative error* pada Skenario 2 lebih dari 3%. Namun, hasil Skenario 3 mengindikasikan bahwa V_1 dan V_2 menghasilkan nilai yang mendekati sama. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa sebenarnya V_1 dan V_2 lebih akurat daripada V_3 . Hal ini diperkuat dengan konsistensi hasil serupa yang ditemukan hampir di seluruh lokasi sampel, kecuali KR 8. Hasil uji *paired t-test* pada ketiga skenario menunjukkan bahwa nilai |t hitung| lebih kecil dari nilai t tabel, sehingga H_0 diterima pada seluruh skenario. Dengan demikian, tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara volume estimasi, volume aktual GNSS RTK, maupun volume aktual fotogrametri UAV pada tingkat kepercayaan 95%.

4. Simpulan

Berdasarkan perbandingan yang telah dilakukan, ditemukan bahwa perhitungan volume estimasi yang dilakukan dengan metode C. J. Konya terindikasi kurang akurat. Hal tersebut didasari

pada hasil volume aktual yang didapatkan di penelitian ini menggunakan metode GNSS RTK dan fotogrametri UAV selalu lebih besar daripada volume estimasi C. J. Konya. Kondisi tersebut mengindikasikan parameter perhitungan yang digunakan dalam estimasi volume peledakan pada wilayah kajian belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Namun, secara statistik tidak ada perbedaan volume yang signifikan di antara ketiga metode dalam penelitian ini. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa volume aktual dari metode GNSS RTK memiliki selisih yang relatif kecil dibandingkan metode fotogrametri UAV. Dengan kata lain, metode UAV fotogrametri patut dipertimbangkan sebagai alternatif pengukuran volume peledakan *quarry* mengingat terdapat beberapa keunggulan dibandingkan metode GNSS RTK yang umum digunakan saat ini. Walaupun terdapat kecenderungan konsistensi hasil yang didapatkan dalam penelitian ini, jumlah sampel yang digunakan masih terbatas. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan jumlah yang lebih memadai guna memastikan konsistensi temuan yang didapatkan.

Referensi

- Bamford, T., Medinac, F., Esmaili, K., 2020. Continuous Monitoring and Improvement of the Blasting Process in Open Pit Mines Using Unmanned Aerial Vehicle Techniques. *Remote Sens. (Basel)*. 12, 1–34. <https://doi.org/10.3390/rs12172801>
- Ghilani, C.D., 2017. Adjustment Computations: Spatial Data Analysis. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119390664>
- He, Z., Gan, S., Yuan, X., 2025. A Terrain-Constrained TIN Approach for High-Precision DEM Reconstruction Using UAV Point Clouds. *J. Imaging* 12, 8. <https://doi.org/10.3390/jimaging12010008>
- Himmy, O., Nguyen, T.T., Vazhacharickal, P.J., Buerkert, A., 2025. Monitoring of granite quarries using deep learning and UAV photogrammetry in Bengaluru, India. *PLoS One* 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334493>
- Hodson, T.O., 2022. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geosci. Model Dev.* <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Kokamägi, K., Türk, K., Liba, N., 2020. UAV photogrammetry for volume calculations. *Agronomy Research* 18, 2087–2102. <https://doi.org/10.15159/AR.20.213>
- Konya, C.J., Walter, E.J., 1990. Surface Blast Design, (No Title). Prentice Hall.
- Konopka, G., Szamalek, K., Zglinicki, K., 2022. Ni-Co Bearing Laterites from Halmahera Island (Indonesia). *Appl. Sci.* 12, 7586. <https://doi.org/10.3390/app12157586>
- Kumara, I.D.M.P., Tanggara, D.N.S.P., Putrawiyanta, I.P., Usup, H.L.D., Murati, F., 2024. Analisis Kemajuan Tambang Berdasarkan Survey RTK pada Aktivitas Coal Getting di Pit Outh Sekako 1 PT Suprabari Mapanindo Mineral. *INNOVATIVE: Journal of Social Science Research* 4, 2361–2370.
- Li, F., Zhu, H., Li, W., Liu, C., Ma, J., Li, L., 2025. Generation of an optimal triangulated irregular network for topographic surface via optimal transport theory. *Geo-Spatial Information Science* 28, 2636–2651. <https://doi.org/10.1080/10095020.2024.2446306>
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., 2004. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC Press.
- Mantey, S., Aduah, M.S., 2021. Comparative Analysis of Stockpile Volume Estimation using UAV and GPS Techniques. *Ghana Mining Journal* 21, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.4314/gm.v21i1.1>
- Marina, Salu, S.P., Dzahir, L.O., 2024. Analisis Geometri Peledakan Terhadap Fragmentasi Hasil Peledakan pada PT. Diamond Alfa Propertindo Kecamatan Mawasangka Tengah Kabupaten Buton Tengah Provinsi Sulawesi Tenggara. *Mining Science and Technology Journal* 3, 1–10.
- Maulana, M.H.R., Kuncoro, H., 2025. Evaluasi Pendekatan Hybrid dalam Pengukuran Volume Stockpile Batubara Menggunakan UAV, GNSS RTK dan Total Station. *Jurnal Serambi Engineering* 10, 15653–15659.
- Murad, Setiawati, S., Mukhtar, W., 2023. Rancangan Geometri Peledakan yang Efisien untuk Mendapatkan Sistribusi Ukuran Fragmentasi Batu Gamping. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara* 19, 95–110. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol19.No2.2023.1386>

- Putrawiyanta, I.P., 2024. Perhitungan Volume dengan Permodelan Software Terramodel terhadap Stockpile Batubara. *Jurnal Teknik Pertambangan* 24, 1–9. <https://doi.org/10.36873/jtp.v24i1.12316>
- Raeva, P.L., Filipova, S.L., Filipov, D.G., 2016. Volume computation of a stockpile - A study case comparing GPS and UAV measurements in an open pit quarry, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 999–1004. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-999-2016>
- Sari, Y.W., Putri, Y.E., Lucyana, Parapelta, A., 2025. Analisis Perbandingan Penghitungan Stockpile Material Batu Kapur Menggunakan GNSS dengan Metode RTK dan NTRIP. *Jurnal Media Teknologi* 12.
- Sun, D., Wang, H., Komine, H., Tsunai, H., Ito, D., Pan, G., Ruan, K., 2024. Improved SfM-MVS approach using artificial backgrounds. *Soils and Foundations* 64. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101495>
- Tiberius, C., van der Marel, H., Reudink, R., van Leijen, F., 2022. Surveying and Mapping, Surveying and Mapping. TU Delft. <https://doi.org/10.5074/T.2021.007>
- Toriya, H., Tungol, Z.P.L., Ikeda, H., Owada, N., Jang, H.D., Adachi, T., Kitahara, I., Kawamura, Y., 2022. Fragmentation Size Distribution Measurement by GNSS-Aided Photogrammetry at Real Mine Site. *Mining* 2, 438–448. <https://doi.org/10.3390/mining2030023>