



Analisis Perbandingan Volume *Stockpile* Batu Bara Hasil UAV Fotogrametri dan UAV Lidar

(Comparison Analysis of Coal Stockpile Volume using UAV Photogrammetry and UAV Lidar)

Antonius Raditya Seno Aji¹, Djurdjani²

¹ Alumni, Departemen Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada

² Dosen, Departemen Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada

Penulis Korespondensi: Djurdjani | Email: djurdjani@ugm.ac.id

Diterima (Received): 10/Oct/2022 Direvisi (Revised): 06/Dec/2022 Diterima untuk Publikasi (Accepted): 06/Dec/2022

ABSTRAK

Survei volumetrik merupakan kegiatan rutin yang memiliki fungsi pengawasan dalam area *stockpile* (tumpukan material) batu bara. Karena itu hasil pengukuran volume yang akurat sangat diperlukan. Akurasi pengukuran volume ditentukan oleh metode dan peralatan yang digunakan. Perangkat survei yang umum digunakan dalam pengukuran volume adalah alat *Total Station* (TS), GPS/GNSS, atau *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Pemanfaatan wahana *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) metode fotogrametri dan *Light Detection and Ranging* (Lidar) populer digunakan untuk pengukuran *volume stockpile*. Karakteristik tekstur dan warna pada *stockpile* batu bara yang cenderung homogen menjadi tantangan dalam pengambilan data fotogrametri. Penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil hitungan volume dari akuisisi data UAV Fotogrametri, UAV Lidar, dan survei GPS yang dilakukan pada periode waktu yang sama. Uji volume dilakukan dengan membandingkan volume keseluruhan (*bulk volume*) hasil UAV Fotogrametri, UAV Lidar, dan survei GPS merujuk pada ASTM D6172-98. Uji-t juga dilakukan dengan data volume blok uji hasil UAV Fotogrametri dengan UAV Lidar menggunakan tingkat kepercayaan 95%. Hasil uji signifikansi antara blok uji UAV Fotogrametri dengan UAV Lidar menunjukkan bahwa selisih hitungan volume kedua metode berbeda secara signifikan. Artinya pengukuran volume dengan UAV Lidar tidak bisa disamakan dengan UAV Fotogrametri, dan metode UAV Lidar disarankan untuk pengukuran *stockpile* batu bara. Tahapan *image matching* yang tidak maksimal menjadi faktor volume UAV Fotogrametri tidak masuk toleransi, yang disebabkan adanya *under-exposure* dan *over-exposure* pada hasil foto udara serta citra *stockpile* yang umumnya homogen.

Kata Kunci: *stockpile, unmanned aerial vehicle, fotogrametri, lidar, point cloud, perbandingan volume*

ABSTRACT

Volumetric survey is a routine activity that has a supervisory function in the coal stockpile area. Therefore, accurate information of volumetric data is really needed. The accuracy of measured volume is determined by instrument and method used. The survey tools commonly used are Total Station (TS), GPS/GNSS, or Terrestrial Laser Scanner (TLS). Utilization of the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and Light Detection and Ranging (Lidar) are popularly used for stockpile volume measurements. Texture and color characteristics of coal stockpile which tend to be homogeneous are a challenge in photogrammetric data collection. The study was conducted by comparing the results of volume calculations from photogrammetric UAV data acquisition, UAV Lidar, and GPS surveys conducted in the same time period. The volume test was carried out by comparing the overall volume (bulk volume) of UAV Photogrammetry, UAV Lidar, and GPS surveys referring to ASTM D6172-98. The t-test was also carried out with block volume data from UAV Photogrammetry with UAV Lidar using a 95% confidence level. The results of the significance test between the Photogrammetry UAV test block and the Lidar UAV showed that the difference in the volume count of the two methods was significantly different. This means that volume measurement with UAV Lidar cannot be equated with UAV Photogrammetry, and the UAV Lidar method is recommended for coal stockpile measurements. Image matching stages that are not optimal are a factor in the UAV volume. Photogrammetry is not tolerated, which is caused by under-exposure and over-exposure in aerial photographs and tone of stockpile image that commonly homogenous.

Keywords: *stockpile, unmanned aerial vehicle, photogrammetry, lidar, point cloud, volume comparison*

1. Pendahuluan

Stockpile batu bara merupakan tumpukan atau timbunan material batu bara yang bersifat sementara. Volume tumpukan batubara akan berpengaruh pada proses *crushing*, *washing*, dan *blending*. Pengukuran volume merupakan salah satu kegiatan rutin dalam pengawasan *stockpile*. Survei topografi menjadi metode umum yang dipakai dalam pengukuran volume. Beberapa Teknik yang sering dipergunakan adalah *Total Station*, *Terrestrial Laser Scanner* dan, *Global Navigation Satellite System* (Khomsin dkk (2018). Namun demikian survei topografi ini tidak dapat di utilisasi secara cepat apabila terdapat kebutuhan data yang bersifat insidental.

Selain survei topografi, metode yang dapat digunakan dalam penentuan volume *stockpile* adalah fotogrametri jarak dekat (Nurchahyo & Djurdjani, 2021). Pada metode ini ada dua pendekatan yang dapat dilakukan yaitu secara terestris dalam hal ini kamera diletakkan diatas tripod seperti yang dilakukan Yanu (2016). Pendekatan yang kedua adalah dengan meletakkan kamera pada wahana pesawat tanpa awak yang lebih dikenal dengan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) seperti yang dilakukan oleh Sriwulan N.A dkk (2021).

Utilisasi metode UAV untuk pekerjaan pengukuran volume *stockpile* meningkat pesat. Winn (2018) mencatat kenaikan pengguna UAV pada sektor industri pertambangan sebesar 198% *year-on-year* (YoY) dan lebih dari 300 ribu pekerjaan pengukuran volume *stockpile* dilakukan menggunakan perangkat lunak *Drone Deploy* pada tahun 2017. Pengukuran menggunakan wahana UAV baik metode Fotogrametri dan metode *Light Detection and Ranging* (Lidar) dapat menjadi alternatif karena utilisasi alat hingga *delivery* data yang singkat.

Kedua metode UAV memiliki karakteristik data yang berbeda (Andaru & Santosa, 2017). Data *point cloud* UAV Fotogrametri dihasilkan dari tahapan *feature matching* foto udara yang bertampalan, sedangkan *point cloud* UAV Lidar dihasilkan dari data penyiaran Lidar. Kenampakan fisik tumpukan batubara yang memiliki tekstur serta warna homogen menjadi tantangan dalam tahapan akuisisi dan pengolahan data metode UAV. Paper ini akan membahas hasil estimasi hitungan volume kedua metode UAV yang kemudian dibandingkan dengan volume referensi hasil survei GPS.

Salsabila (2017) melakukan penelitian untuk membandingkan hitungan volume *stockpile* batu bara hasil UAV Fotogrametri dengan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Dalam uji perhitungan volume perbedaan antara data TLS dan UAV sebesar 0,77 %, 2,46%, 2,86%, dan 1,89%. Beda volume kedua data masuk dalam toleransi ASTM dan tidak berbeda secara signifikan. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Immanuel (2017) yang membandingkan ketelitian DTM hasil UAV Fotogrametri dengan DTM hasil TLS objek *stockpile* pasir. Hasil perbandingan perhitungan volume blok uji kedua DTM menunjukkan persentase rata - rata sebesar 0,97%. Hal yang sama juga dilakukan oleh Muh dkk

(2021) yang berkesimpulan bahwa kedua Teknik menghasilkan perbedaan volume sebesar 0,2 %.

He dkk., (2020) melakukan penelitian dengan membandingkan hitungan tumpukan pasir pada *vessel carrier* metode UAV Fotogrametri dengan *Mobile Laser Scanner*. Deviasi rerata hitungan volume metode UAV mencapai 2% menyamai metode *Mobile Laser Scanner*. Draeyer dkk., (2014) merilis *white paper* mengenai akurasi pengukuran UAV Fotogrametri dibanding GPS dan TLS. Dua sampel tumpukan yang diukur dengan UAV Fotogrametri dan GPS menghasilkan perbedaan hitungan volume sebesar 2% dan 3%, sedangkan persentase beda volume sampel yang diukur dengan UAV Fotogrametri dan TLS sebesar 0,1%.

Perbandingan hitungan volume UAV Lidar dilakukan oleh Amaglo (2021) dengan data pembanding volume TLS. Dua pendekatan dilakukan dalam perhitungan volume, pendekatan pertama adalah mengestimasi permukaan alas dari batas (*boundary*) *stockpile* sedangkan pendekatan kedua menggunakan permukaan original. Beda hasil hitungan volume rerata kedua pendekatan tersebut tidaklah berarti yaitu sebesar 2 – 3 m³.

Paper ini merupakan sebagian hasil penelitian tugas akhir dari Antonius (2022). Paper ini bertujuan membandingkan hasil perhitungan volume berdasarkan data fotogrametri dan data LIDAR. Pada Teknik fotogrametri data tinggi dihasilkan berdasar konsep kesebidangan (pengukuran posisi horizontal titik yang bersesuaian), sedang pada teknologi LIDAR data tinggi diukur menggunakan konsep jarak sehingga hasil diperoleh diharapkan lebih teliti.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Penelitian dilakukan pada area *stockpile* batu bara yang berlokasi di Kecamatan Tabang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur (lihat Gambar 1)



Gambar 1 Objek *Stockpile* Batu Bara

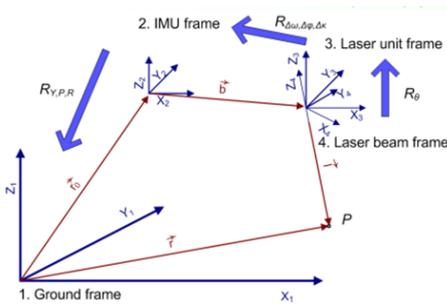
Atas permintaan pemilik data, lokasi rinci serta nama pemilik *stockpile* batu bara tidak disebutkan. Data yang digunakan dalam penelitian adalah data foto udara dan *point cloud* Lidar hasil akuisisi wahana UAV *Microdrones mdLidar1000*, dan hitungan volume hasil survei GPS yang dilakukan pada 11 Oktober 2020.

2.2. Metodologi

Pengukuran volume dilakukan dengan mengolah data hasil pengukuran Lidar dan foto udara. Secara umum tahapan penelitian terbagi menjadi dua yaitu pengolahan *RAW Data* UAV Fotogrametri dan *RAW Data* UAV Lidar. Pengolahan *RAW Data* dilakukan hingga menghasilkan data *point cloud*, dimana data foto udara diolah dalam perangkat lunak *Agisoft Metashape* dan data Lidar diolah dalam perangkat lunak bawaan dari *Microdrones*. Data *point cloud* kemudian akan diolah menjadi *Digital Terrain Model* (DTM) pada perangkat lunak *Global Mapper* beserta tahapan pengukuran volume tumpukan dan volume blok uji masing – masing metode.

2.3. Pengolahan Data UAV Lidar

Data hasil akuisisi UAV Lidar berupa *RAW data* beserta data GNSS dan IMU, dan data GNSS dari *base station* akan diolah bersama menghasilkan data *trajectory* (lintasan terbang). Vektor lokasi titik tapak LIDAR dihitung dengan Rumus 1 dan diilustrasikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2 Relasi antara vektor posisi sensor Lidar, GPS, dan INS (Gonçalves dan Jalobeanu, 2011)

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + R_{Y,P,R} \vec{b} + R_{Y,P,R} R_{\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa} R_{\theta} \vec{l}, \quad (1)$$

Dalam hal ini:

$R_{Y,P,R}$: matrik rotasi terhadap sistem tanah

$R_{\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa}$: matrix *boresight* terhadap IMU dan Laser

θ : sudut penyediaan

l : jarak

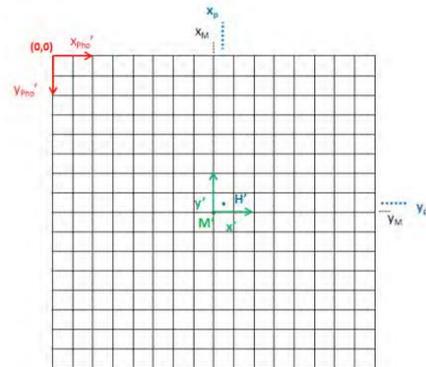
b : vector *lever-arm*

Tahapan kalibrasi *boresight* dan *lever arm* dilakukan pada data *trajectory*, karena data Lidar merupakan gabungan pengukuran posisi dan orientasi oleh sensor GPS dan INS serta vektor posisi pemasangan tiap modul sensor. Parameter dalam kalibrasi *boresight* umumnya terdiri atas sudut *boresight* ($\Delta\omega, \Delta\psi, \Delta\kappa$), dan vektor *lever-arm* ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$).

Metode kalibrasi *boresight* yang umum dipakai adalah metode *simple*, metode *quasi-rigorous*, dan metode *rigorous*. Metode *simple* dan *quasi-rigorous* membutuhkan nilai varian dari algoritma *iterative closest point* (ICP) untuk mencari pasangan *point-triangle*. Dengan bantuan ICP, dua matriks $R = f(\omega, \psi, \kappa)$, $T = (X_T, Y_T, Z_T)$ dapat menghitung *body rigid transformation* antara titik – titik berpasangan (q_i, p_i) dan diantara pasangan *point-normal* (q_i, n_i) (Gonçalves dan Jalobeanu, 2011). *Point Cloud* UAV Lidar dihasilkan dari pengolahan data data *trajectory* yang telah dikalibrasi dan *RAW Data* penyediaan Lidar pada perangkat lunak MdLidar.

2.4. Pengolahan Data UAV Fotogrametri

Pengolahan data UAV Fotogrametri pada perangkat lunak *Agisoft Metashape* terdiri dari tahapan *input reference photos* hasil *direct georeferencing*, *align photos*, dan *build dense cloud* menggunakan teknik *area based image matching* menghasilkan *output data* berupa *point cloud*. *Direct georeferencing* didefinisikan sebagai perhitungan langsung orientasi eksterior setiap foto atau *scanning line* dari *line sensor* dan *aerial laser scanner* (Eisenbeiß, 2009). Dengan demikian, parameter orientasi luar diperoleh melalui sensor GPS dan INS yang terintegrasi dengan wahana UAV (Cramer dalam Eisenbeiß, 2009).



Gambar 3 Relasi antara Sistem Koordinat Sensor (contoh CMOS atau CCD) (X_{pho}' dan Y_{pho}') dan sistem koordinat foto (x' dan y') (Eisenbeiß, 2009)

Ditampilkan pada Gambar 3, sistem koordinat sensor merupakan sistem koordinat 2D. Sumbu Y (Y_{pho}') didefinisikan sebagai baris dan sumbu X (X_{pho}') didefinisikan sebagai kolom. Titik pusat pada foto M' (X_m dan Y_m) ditentukan dengan titik acuan atau titik *fiducial* (sistem berbasis *film*) atau susunan piksel (sistem digital). Titik *principal* H' (x_p dan y_p) merupakan perpotongan sumbu optik dan bidang gambar. Koordinat sensor (dalam piksel untuk kamera digital) dapat ditransformasi menjadi koordinat metrik menggunakan ukuran piksel arah x (p_x) dan ukuran piksel arah y (p_y) (persamaan (2)).

$$\begin{aligned} x' &= (X_{pho}' - X_m) p_x \\ y' &= (Y_{pho}' - Y_m) p_y \end{aligned} \quad (2)$$

Untuk setiap obyek (P) yang diukur dalam sistem koordinat foto, relasi antara kamera dan sistem koordinat *ground* (Ob) dapat ditulis dalam persamaan (3) (Eisenbeiß, 2009).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ob} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{ob} + \lambda R_p^{Ob}(\omega, \varphi, \kappa) \begin{pmatrix} (x' - x_p) \\ (y' - y_p) \\ -f \end{pmatrix}_P \quad (3)$$

Koordinat *principal point* (x_p dan y_p) serta nilai panjang fokus (f) pada persamaan (3) merupakan parameter orientasi dalam, sedangkan parameter orientasi luar terdiri dari matriks rotasi $R_p^{Ob}(\omega, \varphi, \kappa)$ dan pusat proyeksi dalam sistem koordinat objek. R_p^{Ob} adalah matriks rotasi dari koordinat foto ke sistem koordinat objek, sedangkan λ merupakan faktor skala. Apabila posisi kamera beserta sensor GPS dan INS pada UAV dimasukkan, persamaan (3) dapat diperluas ke persamaan (4) (Eisenbeiß, 2009).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ob} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{ob} + R_{INS}^{Ob} \left(\lambda R_p^{INS} \begin{pmatrix} (x' - x_p) \\ (y' - y_p) \\ -f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_{cam} \\ \Delta Y_{cam} \\ \Delta Z_{cam} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix} \right)_P \quad (4)$$

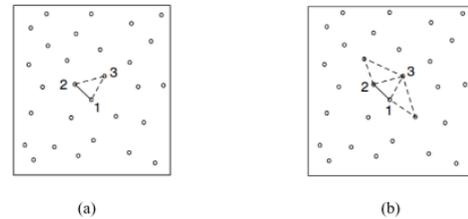
Dalam hal ini:

- $P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ob}$: Koordinat Objek yang didefinisikan dalam Sistem Koordinat Lokal atau Global (Ob).
- $\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{ob}$: Posisi GPS/INS dalam sistem koordinat Ob.
- $\begin{pmatrix} \Delta X_{cam} \\ \Delta Y_{cam} \\ \Delta Z_{cam} \end{pmatrix}$: Vektor antara INS dan pusat proyeksi kamera, dalam sistem koordinat INS.
- $\begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix}$: Vektor antara antenna GPS (*phase center*) dan INS, dalam sistem koordinat INS.
- R_{INS}^{Ob} : Matriks rotasi sistem koordinat foto (P) ke sistem koordinat INS.
- R_p^{INS} : Matriks rotasi sistem koordinat INS ke sistem koordinat Ob. Nilai sudut rotasi ditentukan dalam sensor GPS/INS.

2.5. Pemodelan *Digital Terrain Model* (DTM)

Permukaan DTM dibangun menggunakan metode *Triangular Irregular Network* (TIN) dari hasil *point cloud* yang telah diklasifikasi. Terdapat dua pendekatan dalam pembentukan model TIN; pertama menggunakan *Delaunay Triangulation* untuk membentuk seluruh jaring segitiga dengan mempertimbangkan data secara keseluruhan, atau menggunakan triangulasi dinamik dimana dalam proses pembentukan jaring terjadi interpolasi titik baru dan atau

pengurangan titik. Pendekatan pertama digunakan dalam penelitian, tahapan awal adalah penentuan titik awal untuk interpolasi jaring segitiga. Titik awal yang digunakan merupakan pusat geometrik, titik yang dapat membentuk jaring terpendek, dan segmen garis imajiner di luar data (Li, Zhu dan Gold dalam Immanuel, 2017). Gambar 4 menampilkan hasil tahapan jaring segitiga dalam pembentukan model TIN.

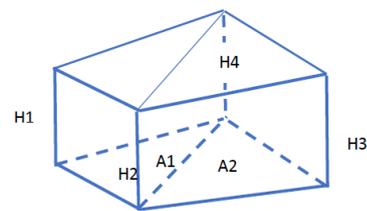


Gambar 4 Pembentukan Jaring Segitiga pada TIN

2.6. Pengukuran Volume dan Uji Volumetrik

Tahap awal dari perhitungan volume adalah melakukan deliniasi batas area dari DTM yang terbentuk. Batas (*boundary*) *stockpile* batubara didefinisikan untuk mendefinisikan bidang referensi. Digitasi dilakukan pada *toe of slope area stockpile*, membentuk fitur area. Digitasi *boundary stockpile* dilakukan menggunakan *Tool Create Area Feature*. Batas ini ditentukan sekali dan digunakan untuk kedua data DTM.

Pengukuran volume dilakukan pada DTM UAV Fotogrametri dan DTM UAV Lidar. DTM yang dibentuk menggunakan metode TIN dapat secara otomatis dihitung volumenya dengan metode *borrow pit* pada perangkat lunak. Metode *borrow pit* digunakan untuk rangkaian segi empat atau segitiga yang teratur (Ghilani dan Paul, 2015). Geometri dasar TIN adalah sebuah prisma segitiga yang memiliki permukaan desain yang merupakan model TIN dan permukaan referensi. Gambar 5 menampilkan visualisasi perhitungan volume TIN.



Gambar 5 Ilustrasi perhitungan volume dari data TIN

Nilai volume dihasilkan dari perkalian luas bidang alas dengan tinggi prisma, nilai tinggi dalam prisma adalah rerata jarak antara bidang desain dan bidang referensi sebagaimana ditunjukkan Persamaan (5).

$$V = A1 \times \frac{(H1+H2+H4)}{3} + A2 \times \frac{(H2+H3+H4)}{3} \quad (5)$$

Dalam hal ini:

- V : Volume objek (m³)
- A1, A2 : Luas penampang alas (m²)
- H1 ... H4 : Tinggi permukaan di atas bidang referensi (m)

Uji volumetrik dilakukan menggunakan uji statistik dan uji volumetrik menggunakan standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM). ASTM D6172-98 adalah standar teknis pengukuran volume tumpukan material (*bulk material*). Batas toleransi maksimal yang diambil adalah dibawah 2% yang merupakan nilai *industry accepted error*. Uji statistik distribusi T dipakai untuk membandingkan hubungan rata - rata sampel terhadap rata - rata populasi yang didasarkan jumlah pengukuran lebih pada sampel. Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah blok uji volume. Distribusi T digunakan untuk mengetahui nilai interval konfidensi dari rata - rata populasi (μ) berdasarkan nilai rata - rata sampel (\bar{X}) dan varian (S2) dari sampel serta derajat kebebasan (*degree of freedom*) (Ghilani, 2010). *Mean* sampel pertama dibandingkan dengan *mean* sampel kedua untuk mengetahui perbedaan kedua sampel uji. Nilai t-hitung dapat diperoleh menggunakan persamaan (6).

$$t = \frac{D - \delta}{\frac{SD}{\sqrt{n}}} \quad (6)$$

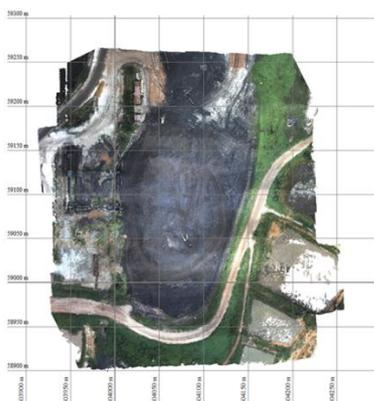
Dalam hal ini:

- t : t-hitung
- D : selisih antara dua data
- δ : Nilai yang diharapkan (0)
- SD : simpangan baku selisih antara dua data
- n : jumlah data Tingkat Kepercayaan 95%

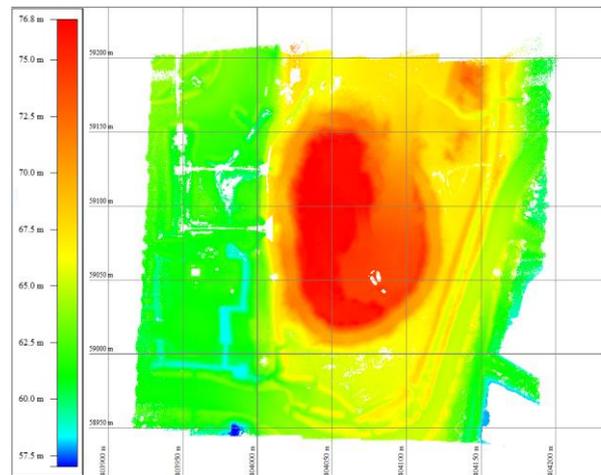
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Point Cloud

Gambar 6 menampilkan hasil *point cloud* UAV Fotogrametri dan Gambar 7 menampilkan hasil *point cloud* UAV Lidar.



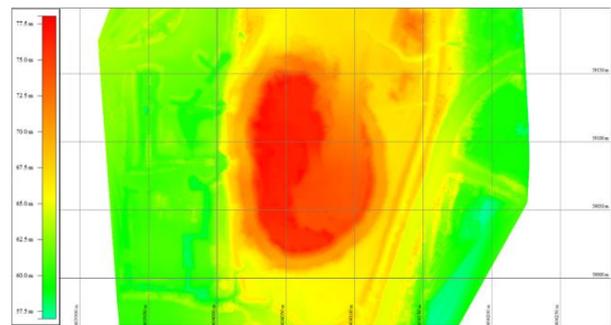
Gambar 6 Hasil Point Cloud UAV Fotogrametri



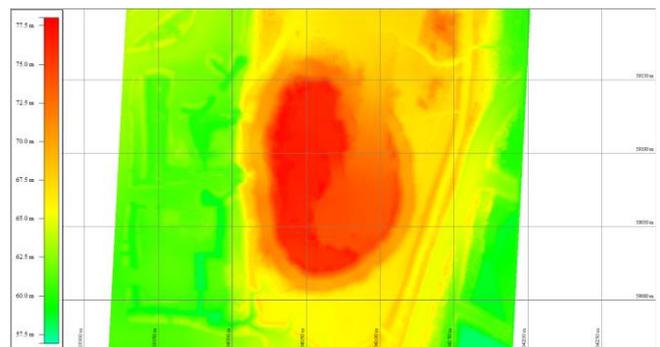
Gambar 7 Hasil Point Cloud UAV Lidar

3.2. Hasil Digital Terrain Model

Gambar 8 menampilkan hasil DTM UAV Fotogrametri dan Gambar 9 menampilkan hasil DTM UAV Lidar. Pemodelan DTM dilakukan pada perangkat lunak *Agisoft Metashape* menggunakan input data *point cloud*. Tidak ada perbedaan visual yang signifikan pada kedua DTM.



Gambar 8 Hasil DTM UAV Fotogrametri



Gambar 9 Hasil DTM UAV Lidar

3.3. Hasil Uji Perbandingan Volume

Uji volume dilakukan dengan cara membandingkan hasil pengukuran volume UAV fotogrametri dan UAV LIDAR. Hasil perbandingan ditunjukkan di Tabel 1 berikut,

Tabel 1 Perbandingan Hitungan Volume Blok Uji UAV Lidar dengan UAV Fotogrametri

No. Blok	Volume UAV Lidar (m ³)	Volume UAV Foto (m ³)	Selisih Volume (%)	(xi - x̄) ²
A1	1980,102	1922,644	2,90	5,53
A2	3792,739	3760,005	0,86	0,10
A3	3181,006	3158,355	0,71	0,03
A4	1108,805	1084,760	2,17	2,62
B1	2834,510	2808,336	0,92	0,14
B2	3793,223	3787,998	0,14	0,17
B3	3392,033	3389,324	0,08	0,22
B4	1672,365	1668,041	0,26	0,09
C1	2539,832	2514,413	1,00	0,20
C2	3784,757	3792,163	0,20	0,13
C3	3673,544	3682,899	0,25	0,09
C4	2267,586	2271,652	0,18	0,14
C5	1813,013	1814,353	0,07	0,23
D1	2637,551	2625,862	0,44	0,01
D2	3854,333	3863,865	0,25	0,09
D3	3421,940	3433,933	0,35	0,04
D4	2688,391	2691,788	0,13	0,18
D5	2462,385	2463,917	0,06	0,24
E1	2249,034	2227,787	0,94	0,16
E2	3391,134	3397,940	0,20	0,12
E3	2722,388	2725,161	0,10	0,20
E4	2583,884	2585,628	0,07	0,23
E5	2389,504	2387,258	0,09	0,21
F1	2114,040	2070,920	2,04	2,22
F2	3539,474	3526,726	0,36	0,04
F3	3012,411	3009,844	0,09	0,22
F4	2791,690	2791,781	0,00	0,30
X̄	2803,395	2794,717	0,551	
Standard Deviation (σ)			0,72	
2σ			1,44	
X̄ + 2σ			2,15	
t-hitung			2,68	
t-tabel (25,0.025)			2,06	
t-hitung > t-tabel				

Uji distribusi T dilakukan untuk membandingkan hasil hitungan volume UAV Fotogrametri dengan UAV Lidar menggunakan derajat kepercayaan 95%. Nilai simpangan baku yang dihasilkan sebesar 0,72. Sampel blok uji yang memiliki selisih volume diatas $\bar{x}+2\sigma$ tidak disertakan dalam perhitungan nilai t hitung. Dari 27 sampel blok uji, 25 sampel masuk syarat uji global (nilai dibawah $\bar{x}+2\sigma$). Nilai T hitung yang diperoleh sebesar 2,68 dan nilai T tabel adalah 2,06. Hipotesis awal ditolak karena nilai t-hitung lebih besar daripada nilai t-tabel dan disimpulkan bahwa hasil hitungan volume UAV Fotogrametri dengan UAV Lidar berbeda secara signifikan.

Uji perbandingan volume UAV Lidar dan UAV Fotogrametri dengan volume dari survei topografi

mengacu pada ASTM D6172-98. Volume yang diukur adalah bulk volume atau volume tumpukan keseluruhan, kemudian menghitung persentase selisih volume antar metode. Hasil perbandingan ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Persentase Selisih Hitungan Timbunan *Stockpile*

Uji ASTM Hitungan Volume Timbunan (<i>Bulk Volume</i>)			
UAV Foto (m ³)	UAV Lidar (m ³)	Survei GPS (m ³)	(%)
	91699,438	93017,061	1,43
90821,981		93017,061	2,34

Selisih hitungan volume UAV Lidar dengan volume survei topografi adalah 1,426% dan selisih hitungan volume UAV Fotogrametri dengan survei topografi adalah 2,338%. Hitungan volume UAV Lidar diterima karena dibawah persentase selisih industry *accepted error* yaitu 2% dibanding UAV Fotogrametri.

Terdapat beberapa faktor yang kemungkinan mempengaruhi ketelitian volume hasil pengukuran secara fotogrametris. Yang pertama adalah faktor homogenitas citra yang berpengaruh pada ketelitian hasil *matching*. Ini dikarenakan material batubara yang mempunyai permukaan yang halus akan menghasilkan pantulan gelombang yang relatif sama. Kondisi homogen memungkinkan jumlah kandidat titik yang bersesuaian lebih dari satu lokasi. Faktor yang kedua adalah resolusi tanah (*ground resolution*) dari piksel yang dihasilkan. Resolusi ini dipengaruhi resolusi sensor dan ketinggian terbang. Untuk selanjutnya resolusi tanah piksel akan berpengaruh pada ketelitian horisontal dan vertikal dari koordinat obyek. Ketelitian vertikal yang dihasilkan melalui proses pemotongan dalam ruang ini umumnya akan memiliki hasil lebih jelek dari pada ketelitian horisontal.

4. Kesimpulan

Hasil perhitungan volume UAV Fotogrametri dan UAV LIDAR memiliki perbedaan yang signifikan. Apabila kedua perhitungan tersebut dibandingkan dengan data volume berdasar pengukuran GPS, diperoleh perbedaan sebesar 1,426 % untuk volume dari UAV LIDAR dan sebesar 2,338% untuk data UAV Fotogramteri. Hasil perhitungan volume UAV Lidar masuk toleransi dalam uji standar ASTM karena memiliki perbedaan < 2 %.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini (*The authors declare no competing interest*).

6. Referensi

- Amaglo, W. Y. A. O. (2021). Volume Calculation Based on LiDAR Data. *Thesis*. Transport and Geoinformation Technology School of Architecture and the Built Environment. Stockholm, Sweden.
- Andaru, R. & Santosa, P. B. (2017). Analisis Spasial Bencana Longsor Bukit Telogolele Kabupaten Banjarnegara Menggunakan Data Foto Udara UAV. *Jurnal Nasional Teknologi Terapan (JNTT)*, Vol 1, No 1 (2017). <https://doi.org/10.22146/jntt.34089>
- Antonius R.S., A. (2022). Perbandingan Perhitungan Volume Stockpile Batubara hasil UAV Fotogrametri dan UAV LIDAR. *Skripsi*. Departemen Teknik Geodesi UGM. Yogyakarta.
- Draeyer, B., & Strecha, C. (2014). How accurate are UAV surveying methods?. *Pix4D White paper*.
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV photogrammetry*. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. Issue 18515. Institute of Geodesy and Photogrammetry. Zürich.
- Ghilani, C. D. (2010). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis: Fifth Edition*. John Wiley & Sons. New Jersey.
- Ghilani, C. D dan Paul R.W. (2015). *Elementary Surveying. Introduction to Geomatic*, Pearson Education Inc, USA.
- Gonçalves, G. R., & Jalobeanu, A. (2011). LiDAR boresight calibration: a comparative study. *AGU Fall Meeting*. San Fransisco.
- He, H., Xu, X., Chen, T., & Lu, P. (2020). Volume measurement of sand carrier using uav-based mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(3), 19–24.
- Immanuel, B. A. N. (2017). Analisis Ketelitian Model Terrain Digital Hasil Pemetaan Metode Fotogrametris Menggunakan Wahana UAV dan Metode Terrestrial Laser Scanner. *Skripsi*. Departemen Teknik Geodesi FT-UGM. Yogyakarta.
- Khomsin, Danar G. P. ,Achmad F. A. (2018). Analisa perbandingan volume dan ketelitian icp dari 3's (TS, GNSS, dan TLS). *Jurnal Geoid*. Vol. 14. No. 1, 2018 (112-123)
- Muh, G.R., Sumarno, Nurul Y. (2021). Perbandingan perhitungan volume stockpile hasil pengukuran unmanned aerial vehicle (uav) dan pengukuran electronic total station (ets) (studi kasus: pt. Indocement tunggal prakarsa tbk. Palimanan, cirebon). *Prosiding Seminar Nasional dan Desiminasi Tugas Akhir. 8-9 Februari 2021*. ITN. Malang.
- Nurchahyo, A. & Djurdjani. (2021). Analisis Perbandingan Ketelitian Model 3D Menggunakan Lensa Normal dan Lensa Fisheye. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, Vol 4, No 2 (2021). <https://doi.org/10.22146/jgise.67869>
- Salsabila, R. (2017). Perbandingan Perhitungan Volume Stockpile Batu Bara Menggunakan Data Terrestrial Laser Scanner (TLS) dan Data Foto Udara Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Skripsi*. Departemen Teknik Geodesi FT-UGM. Yogyakarta.
- Sri Wulan N. A., Dewi R., Yosa M., Wahyudi Z. (2021). Pemodelan Stockpile Menggunakan Metode Fotogrametri Dengan Wahana Uav (Unmanned Aerial Vehicle) Di PT Triaryani. *Jurnal Geomine*. Volume 9. Nomor 2: Agustus 2021. Hal. 141 – 149.
- Winn, M. (2018). 2018 *Commercial Drone Industry Trends*. DroneDeploy, August,14. https://dronedeploy-www.cdn.prismic.io/dronedeploy-www%2Fae535fda-dfc9-4bcf-9743-292df714e9fe_dd_2018_trends_report-f.pdf diakses pada tanggal 11 Januari 2022, 17.42.
- Yanu A.W. (2016). Hitungan Volume Stockpile Batubara Dengan Metode Fotogrametri Jarak Dekat. *Skripsi*. Teknik Geodesi UGM., Yogyakarta.