

Kajian Penggunaan LiDAR dan Kamera untuk Identifikasi Volume Limbah Tempat Pembuangan Akhir Menggunakan UAV

I Made Satria Suarmahajaya*^{1,2}, Yohanes Bimo Dwianto¹, Rianto Adhy Sasongko¹

¹ Fakultas Teknik mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10, Jawa Barat, Bandung, 40132, Indonesia

² Advanced Master in Unmanned Aircraft System, Service and Management, ENAC
7 Avenue Edouard Belin, Toulouse, 31055, France

E-mail: *madesatria11@gmail.com

Diterima: 18 Januari 2023, disetujui: 27 November 2023, diterbitkan online: 29 Desember 2023

Abstrak

Unmanned Aircraft Vehicle (UAV) merupakan teknologi dirgantara yang berkembang pesat pada berbagai bidang seperti pemetaan, kesehatan, pertanian, peternakan, hingga logistik. Berdasarkan European GNSS Agency 2022, sektor pemetaan menjadi pasar yang cukup besar di industri *drone* dengan perkiraan pasar sebesar €40 juta. Di masa lalu, pemetaan lahan dilakukan menggunakan metode topografi tradisional seperti menggunakan *total stations* yang efisien dalam mengukur tumpukan sederhana atau situs kecil. Namun, dalam kasus yang lebih kompleks seperti Tempat Pembuangan Akhir (TPA), diperlukan pengukuran banyak titik untuk merekonstruksi permukaan dan mengukur volume tumpukan. Seiring dengan perkembangan teknologi dirgantara terutama pada UAV yang dipadukan dengan teknologi LiDAR ataupun fotogrametri maka dapat menghasilkan pemetaan dengan akurasi data tinggi dan waktu yang cepat. Saat ini, PT Bali Drone Production berencana meneliti lebih lanjut terkait perbandingan volume limbah sampah dengan menggunakan UAV berteknologi LiDAR dan fotogrametri. Penelitian akan dilaksanakan pada tiga TPA yaitu TPA X (46,5 Ha), TPA Y (20,8 Ha), dan TPA Z (15,2 Ha). Penelitian dilakukan dengan membandingkan hitungan volume dari akuisisi data UAV LiDAR dan UAV fotogrametri terhadap tiga *trajectory* berbeda untuk setiap lokasi TPA. Hasil analisis perbandingan volume timbunan sampah dari data UAV LiDAR terhadap tiga *trajectory* berbeda menunjukkan hasil yang presisi di bawah 1% dibandingkan data UAV fotogrametri yang menunjukkan hasil perbedaan volume hingga 19.96%. Pemrosesan *Digital Terrain Model* (DTM) menggunakan data UAV LiDAR (19 menit 23 detik) menunjukkan hasil yang lebih cepat dibandingkan pemrosesan DTM UAV fotogrametri (8 jam 44 menit 55 detik).

Kata kunci: UAV, LiDAR, Fotogrametri.

Abstract

Study on the Use of LiDAR and Camera for Identifying Landfill Volume Using UAV: Unmanned Aircraft Vehicle (UAV) is an aerospace technology that growth in various fields such as mapping, health, agriculture, animal husbandry, and logistics. According to the European GNSS Agency 2022, the mapping sector is a fairly large market in the drone industry with an estimated market of €40 million. In the past, land mapping carried out by using traditional topographic methods such as using total stations that was efficient in measuring simple piles or small sites. However, in the complex cases, multiple point measurements are required to reconstruct the surface and measure the volume of the pile. With the evolution of aerospace technology, especially in UAVs integrated with LiDAR or photogrammetry, mapping with high data accuracy and rapid turnaround times can be achieved. Currently, PT Bali Drone Production plans to conduct further research regarding the comparison of waste volumes using UAVs with LiDAR and Photogrammetry technology. The research carried out at three TPAs, namely TPA X (46.5 Ha), TPA Y (20.8 Ha) and TPA Z (15.2 Ha). The research involves comparing volume calculations from LiDAR UAV data and photogrammetry UAV data for three different trajectories at each landfill location. The research involves comparing volume calculations from LiDAR UAV data and photogrammetry UAV data for three different trajectories at each landfill location (8 hours 44 minutes 55 seconds).

Keywords: UAV, LiDAR, Photogrammetry.

1. Pendahuluan

Pesawat tanpa awak atau biasa disebut dengan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) saat ini berkembang dengan sangat pesat ke berbagai bidang kehidupan. Saat ini penggunaan UAV meningkat secara signifikan sehingga perlu dilakukan klasifikasi pesawat berdasarkan berat, *altitude* dan *range*, sayap dan rotor, serta pengaplikasiannya [1]. Pada tahun 2021, *drone service revenue* di Eropa memiliki nilai pasar sekitar €75 juta dan diperkirakan naik menjadi €200 juta pada tahun 2023 dengan sektor pemetaan menjadi pasar yang cukup besar di industri *drone* dengan perkiraan pasar sebesar €40 juta [2].

Pemetaan adalah proses pembuatan peta yang melibatkan pengumpulan, pengolahan, dan interpretasi data geografis yang dapat berasal dari berbagai sumber untuk menghasilkan representasi visual dari informasi tersebut [3]. Di masa lalu, pemetaan lahan dilakukan menggunakan metode topografi tradisional seperti menggunakan *total stations* dan teknologi GNSS-RTK yang efisien digunakan dalam mengukur tumpukan sederhana atau situs kecil. Namun, dalam kasus yang lebih kompleks, diperlukan

pengukuran sejumlah besar titik untuk merekonstruksi permukaan dan mengukur volume tumpukan sehingga membutuhkan waktu lebih lama dan biaya yang lebih tinggi.

Perkembangan teknologi yang terus berlanjut telah mengarah pada kemajuan penginderaan jarak jauh berbasis UAV yang dapat memperoleh informasi spasial dengan cepat sehingga membuka minat dalam pemodelan dan pemantauan permukaan [4]. Saat ini, UAV dilengkapi dengan kamera optik untuk melakukan survei topografi dengan memanfaatkan gambar udara RGB sederhana yang digabungkan untuk eksploitasi fotogrametri digital. Fotogrametri pada dasarnya melibatkan pengukuran dan interpretasi geometrik dari foto atau gambar untuk menghasilkan data spasial yang akurat [5]. Pemahaman mengenai azas fotogrametri diperlukan sebagai dasar untuk menghitung kenampakan gambar hasil interpretasi yang berkaitan dengan lokasi dan bentangannya [6].

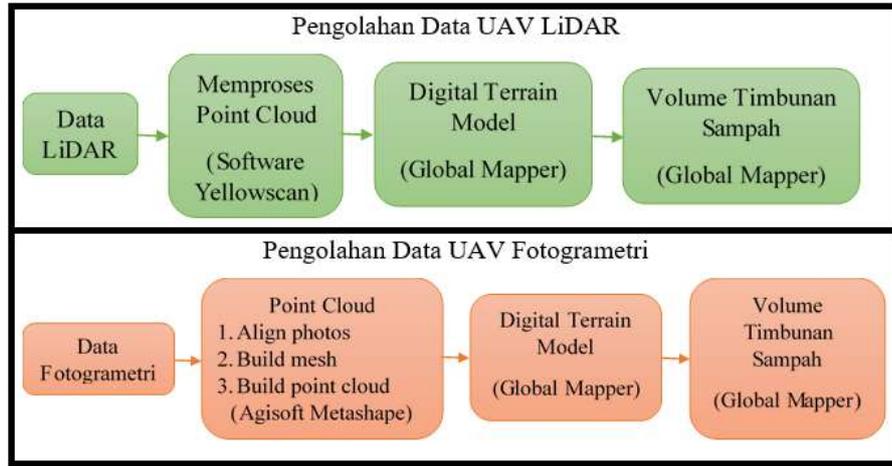
Aerial LiDAR adalah teknologi penginderaan jarak jauh yang menggunakan sensor LiDAR dari platform udara untuk mengumpulkan data tentang permukaan bumi dan objek-objeknya. Data LiDAR mempresentasikan tiga dimensi dari dunia fisik yang dibuat dengan memperkirakan jarak pulsa laser yang dikirimkan dari dan diterima oleh pesawat terbang [7]. Dengan mengukur waktu perjalanan pulsa laser, LiDAR dapat menghasilkan data tiga dimensi yang sangat akurat tentang elevasi, bentuk topografi, dan struktur objek di permukaan bumi [8]. Hasil perhitungan volume UAV fotogrametri dan UAV LiDAR terhadap data volume berdasar pengukuran GPS pada perhitungan volume batu bara diperoleh perbedaan sebesar 1,426% untuk volume dari UAV LIDAR dan sebesar 2,338% untuk data UAV fotogrametri [9].

Penumpukan sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan proses dinamis yang terus-menerus mengalami transformasi topografi yang disebabkan pembuangan limbah dan juga pengaruh komposisi gravimetri limbah padat perkotaan dengan karakteristik heterogenitas, deformabilitas, dan biodegradabilitas [10]. Oleh karena itu, evaluasi operasional TPA menjadi langkah yang kontinu dan berkala dengan melakukan pengukuran, pencatatan data dan survei topografi terhadap dua parameter kontrol pemantauan penting yaitu kompaksi dan geometri [11]. Banyaknya sampah yang ditampung pada TPA menciptakan tumpukan-tumpukan sampah yang semakin bertambah tinggi dan cukup labil untuk dapat berjalan di atasnya. Pemetaan konvensional pada tanah dengan kondisi labil dan luas sangat berisiko untuk dilakukan karena dapat membahayakan jiwa jika terjadi longsor. Dengan mengintegrasikan teknologi LiDAR ataupun fotogrametri pada UAV maka dapat dihasilkan pemetaan dengan akurasi data yang tinggi dan waktu yang cepat.

Pada artikel ini, peneliti melakukan perbandingan terhadap dua sensor yang berbeda yaitu LiDAR dan kamera fotogrametri pada UAV untuk menghitung volume timbunan sampah pada tiga tempat pembuangan akhir (TPA) di Indonesia yaitu TPA X (46,5 Ha), TPA Y (20,8 Ha), dan TPA Z (15,2 Ha). Selain itu, peneliti juga menganalisis waktu yang dibutuhkan dalam mengolah data LiDAR dan fotogrametri pada beberapa *software*. Peneliti berharap dengan mengetahui perbandingan hasil volume timbunan sampah dan waktu pengolahan data, pembaca dapat menentukan sensor mana yang sebaiknya digunakan pada UAV untuk melakukan pengukuran pemetaan pada TPA yang memiliki area yang luas dan labil dengan vegetasi yang rendah.

2. Metodologi

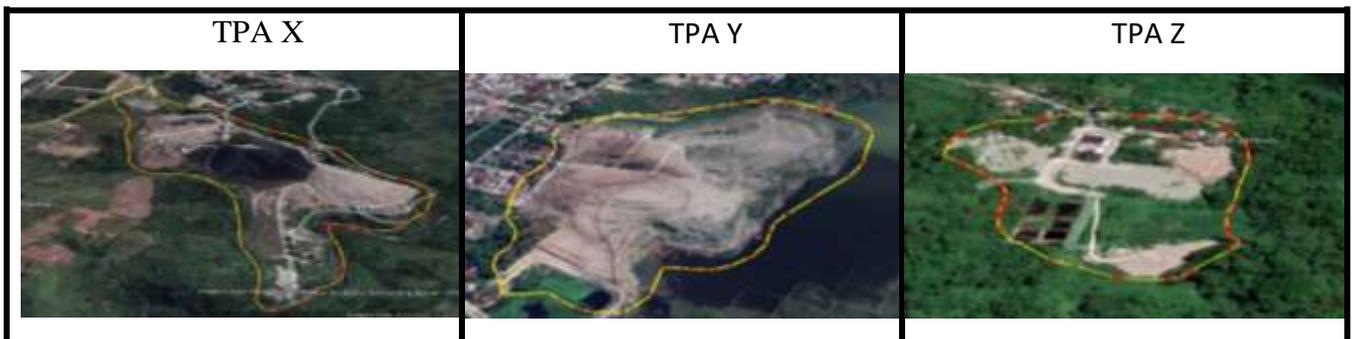
Secara umum, penelitian ini dilakukan dengan mengolah data UAV LiDAR dan data UAV fotogrametri pada tiga *trajectory* berbeda hingga menghasilkan data *Digital Terrain Model* (DTM). Pertama, data diproses menjadi *point cloud* dimana data LiDAR diolah menggunakan *software* bawaan Yellowscan dan data fotogrametri (foto udara) diolah dengan *software* Agisoft Metashape. Data *point cloud* selanjutnya diproses menjadi *Digital Terrain Model* (DTM) menggunakan *software* Global Mapper. Hasil DTM digunakan untuk menghitung volume timbunan sampah dan waktu pemrosesan data untuk setiap *trajectory* pada tiga lokasi TPA. Alur pengolahan data antara UAV LiDAR dan UAV fotogrametri dijabarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Pengolahan Data UAV LiDAR dan Fotogrametri

2.1. Data dan Lokasi

Penelitian dilaksanakan pada tiga lokasi TPA yang tersebar di Indonesia yaitu TPA X (46,5 Ha), TPA Y (20,8 Ha), dan TPA Z (15,2 Ha) yang dijelaskan pada Gambar 2. Terdapat beberapa perlengkapan utama yang digunakan untuk mendapatkan data LiDAR dan data fotogrametri yang ditunjukkan pada Gambar 3.



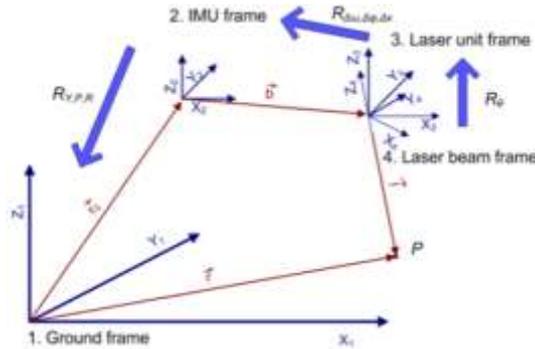
Gambar 2. Lokasi Penelitian



Gambar 3. Perlengkapan Utama Akuisisi Data

2.2. Pengolahan Data Lidar

Data hasil akuisisi UAV LiDAR berupa *raw data* (data GNSS dan *Inertial Measurement Unit* (IMU)). Bersama dengan data GNSS dari *base station* nantinya diolah menghasilkan data lintasan terbang (*trajectory data*). Vektor posisi LiDAR dijelaskan pada Gambar 4 dan dihitung dengan persamaan (1).



Sumber: [12]

Gambar 4. Hubungan antara vektor posisi Lidar, GPS, dan INS

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

Dimana:

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

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

θ : sudut penyiaman

\vec{l} : jarak

\vec{b} : *vector lever-arm*

Pada data *trajectory* dilakukan tahapan kalibrasi *boresight* dan *lever arm* karena data LiDAR merupakan gabungan pengukuran posisi dan orientasi (sensor GPS dan INS) serta vektor posisi tiap modul sensor. Terdapat tiga metode kalibrasi *boresight* yang umum dipakai yaitu metode simpel, metode *quasi-rigorous*, dan metode *rigorous*. *Point cloud* LiDAR dihasilkan menggunakan *software* bawaan Yellowscan melalui pengolahan data *trajectory* terkalibrasi dan *raw data* penyiaman LiDAR.

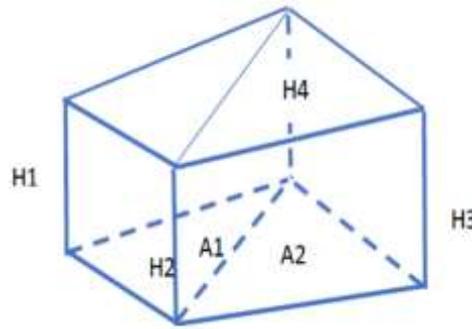
2.3. Pengolahan Data Fotogrametri

Pengolahan data UAV fotogrametri dilakukan pada *software* Agisoft Metashape dengan tahapan *input reference photos* hasil *direct georeferencing*, *align photos*, *build mesh*, *build point cloud*. *Point cloud* dihasilkan dengan menggunakan teknik *area based image matching*. *Direct georeferencing* merupakan suatu perhitungan langsung orientasi eksterior yang diperoleh melalui sensor GPS dan INS yang terintegrasi dengan wahana UAV pada setiap foto atau *scanning line* dari *line censor* dan *aerial laser scanner* [13].

2.4. Pengukuran Volume Timbunan Sampah

Tahap awal dari perhitungan volume adalah pembentukan pemodelan *Digital Terrain Model* (DTM). DTM dibangun menggunakan metode *Triangular Irregular Network* (TIN) dari hasil *point cloud* yang telah diklasifikasi. Pembentukan model TIN menggunakan pendekatan *Delaunay Triangulation* untuk membentuk seluruh jaring segitiga dengan mempertimbangkan data secara keseluruhan.

Tahap berikutnya melakukan deliniasi batas area dari DTM yang terbentuk dengan menggunakan *Tool Create Area Feature* (TCAF). Batas ini ditentukan sekali dan digunakan untuk kedua data DTM. Pengukuran volume pada DTM yang dibentuk menggunakan metode TIN dapat secara otomatis dihitung volumenya dengan metode *borrow pit* pada perangkat lunak. Geometri dasar TIN yang ditampilkan pada Gambar 5 adalah sebuah prisma segitiga dengan permukaan desain yang merupakan model TIN dan permukaan referensi.



Sumber: [1]

Gambar 5. Ilustrasi perhitungan volume 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 (2).

$$V = A1 \times \frac{(H1+H2+H4)}{3} + A2 \times \frac{(H2+H3+H4)}{3} \quad (2)$$

Di mana:

V : Volume objek (m3)

A1, A2 : Luas penampang alas (m2)

H1 ... H4 : Tinggi permukaan di atas bidang referensi (m)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Trajectory UAV

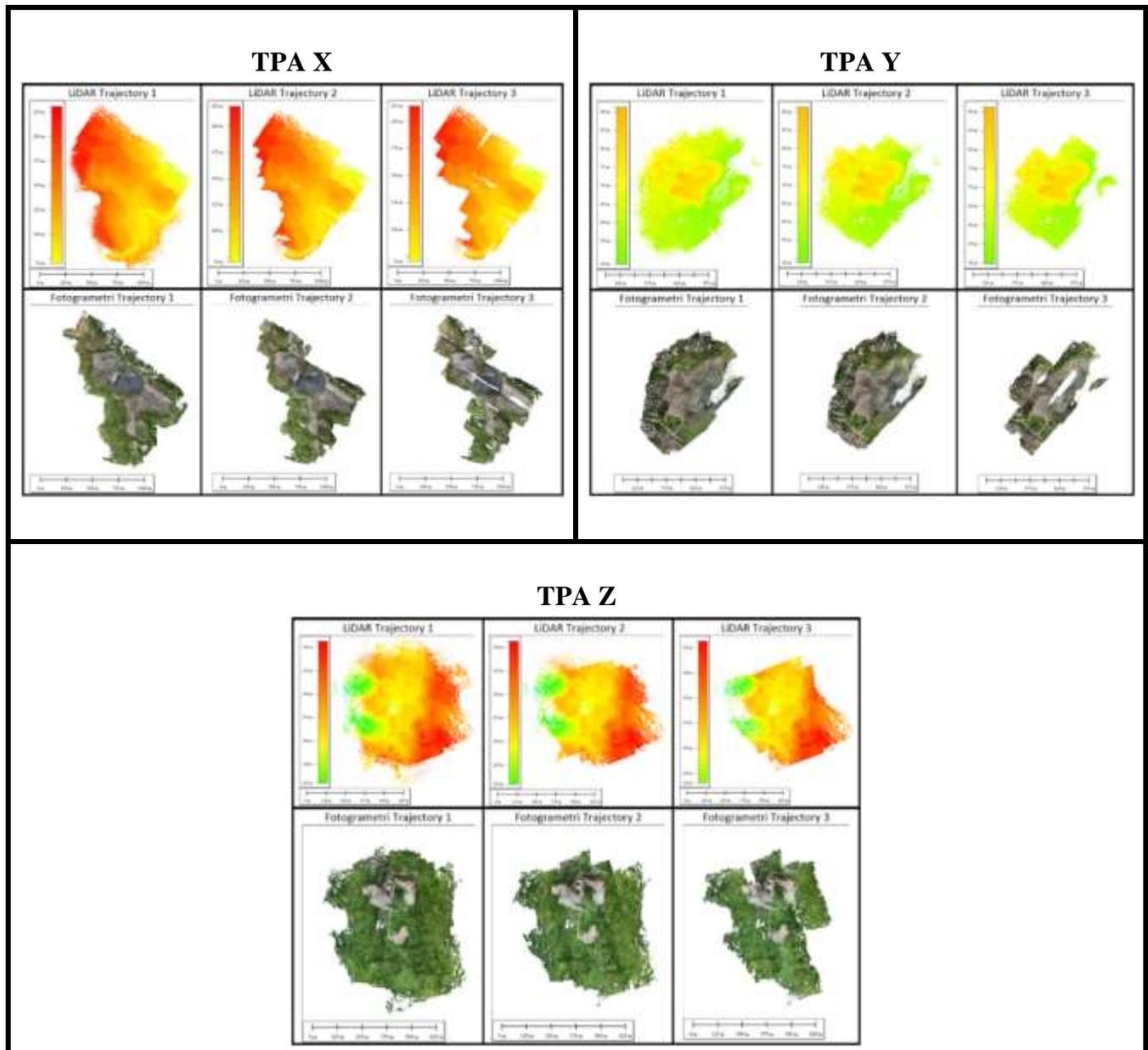
Penelitian ini dilakukan dengan menerbangkan UAV yang dilengkapi dengan sensor LiDAR Yellowscan VX15 dan kamera Sony a6500 (fotogrametri) di TPA X, TPA Y dan TPA Z. Data terbang UAV yang didapat pada setiap lokasi TPA didefinisikan sebagai *trajectory 1*. Sedangkan *trajectory 2* dan *trajectory 3* didapat dengan menghilangkan beberapa lintasan terbang pada *trajectory 1* sehingga nanti dapat dilakukan analisis perbedaan yang terjadi untuk setiap data LiDAR dan data fotogrametri. Perbedaan *trajectory* terbang UAV pada tiga lokasi TPA yang diteliti ditampilkan pada Gambar 6.

Trajectory 1	Trajectory 2	Trajectory 3
TPA Jatibarang Semarang		
TPA Antang Makassar		
TPA Toisapu Ambon		

Gambar 6. Trajectory Terbang UAV

3.2. Hasil Point Cloud

Data LiDAR dan foto udara yang dikumpulkan, selanjutnya diolah menggunakan *software* untuk menghasilkan *point cloud*. Data LiDAR diproses menggunakan *software* bawaan dari Yellowscan sedangkan data foto udara diproses menggunakan *software* Agisoft Metashape. Hasil *point cloud* LiDAR dan fotogrametri ditampilkan pada Gambar 7.

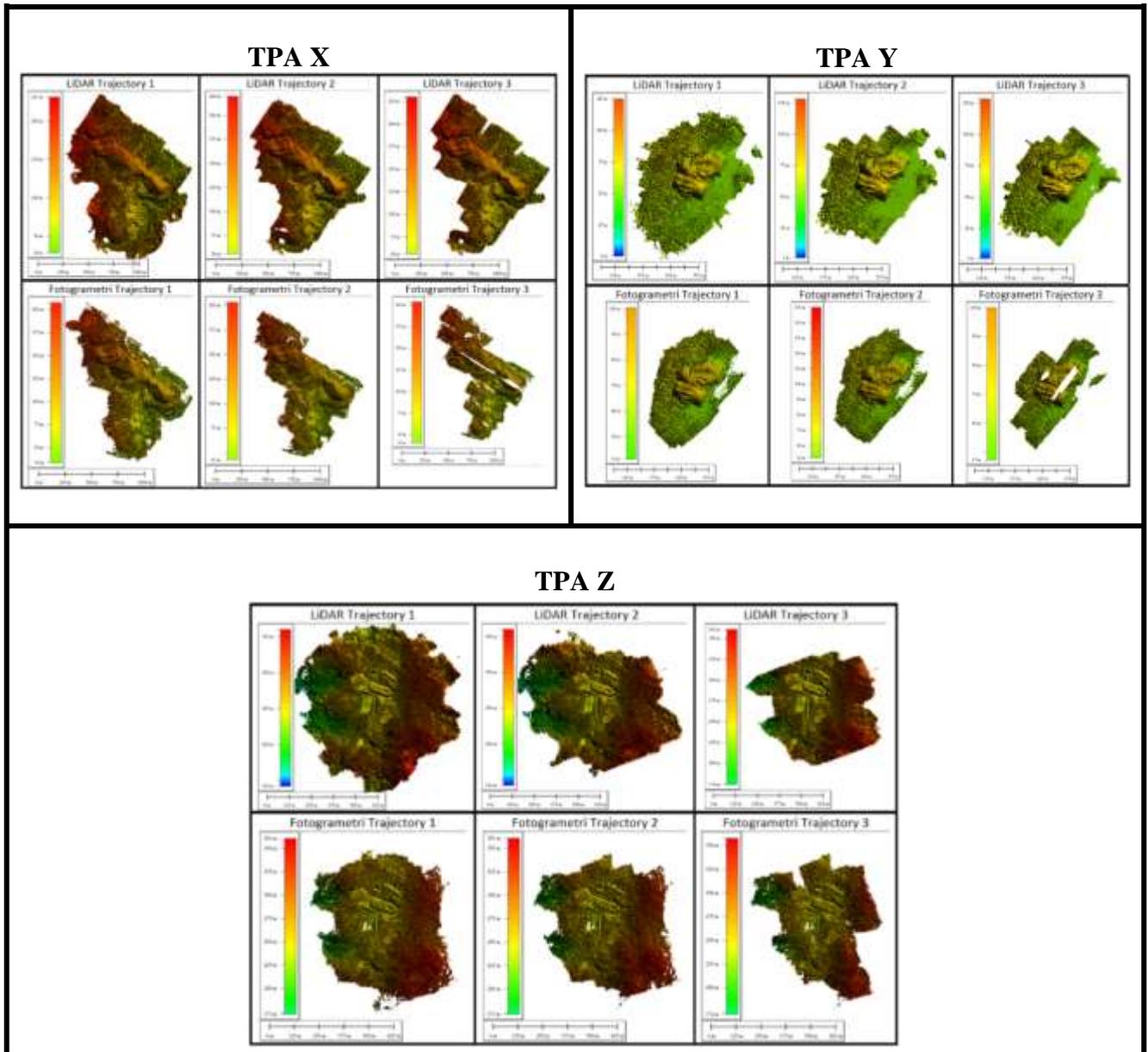


Gambar 7. Point Cloud Lidar dan Fotogrametri

Dari Gambar 7 dapat dilihat perbedaan *point cloud* yang dihasilkan oleh data LiDAR memiliki gambar yang lebih luas dibandingkan *point cloud* yang dihasilkan melalui fotogrametri. Pada *trajectory 2* dan *trajectory 3*, terlihat adanya perbedaan luasan yang cukup signifikan antara *point cloud* LiDAR dengan *point cloud* fotogrametri. Terdapat beberapa area yang tidak terjangkau pada *point cloud* fotogrametri yang mengakibatkan gambar terlihat tidak utuh.

3.3. Hasil Digital Terrain Model (DTM)

Digital Terrain Model (DTM) diperoleh dengan memproses data hasil *point cloud* LiDAR dan fotogrametri menggunakan *software* Global Mapper. Hasil DTM LiDAR dan DTM fotogrametri yang nantinya digunakan untuk menghitung volume timbunan sampah ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. DTM LiDAR dan Fotogrametri

Gambar 8 menunjukkan bahwa DTM LiDAR memiliki luasan yang lebih besar dibandingkan DTM fotogrametri. Pada *trajectory 3*, DTM fotogrametri menghasilkan gambar yang tidak utuh dan tidak menjangkau keseluruhan area yang ditinjau.

3.4. Hasil Perbandingan Volume Timbunan Sampah

Hasil DTM yang telah didapatkan selanjutnya digunakan untuk mencari volume timbunan sampah antara data LiDAR dengan fotogrametri menggunakan *software* Global Mapper. Hasil perbandingan volume timbunan sampah dijabarkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Volume Timbunan Sampah

Lokasi TPA	Metode Perhitungan	Total Volume (m3)	Selisih Volume (m3)	Prosentase Selisih Volume (%)
TPA X	LIDAR trajectory 1	1.422.822	-	0,00%
	LIDAR trajectory 2	1.416.517	6.304	0,44%
	LIDAR trajectory 3	1.418.234	4.587	0,32%
	Fotogrametri Trajectory 1	1.411.149	11.673	0,82%
	Fotogrametri Trajectory 2	1.402.219	20.603	1,45%
	Fotogrametri Trajectory 3	1.205.886	216.935	15,25%
TPA Y	LIDAR trajectory 1	1.980.503	-	0,00%
	LIDAR trajectory 2	1.976.070	4.433	0,22%
	LIDAR trajectory 3	1.981.172	669	0,03%
	Fotogrametri Trajectory 1	1.994.614	14.111	0,71%
	Fotogrametri Trajectory 2	1.957.511	22.992	1,16%
	Fotogrametri Trajectory 3	1.585.235	395.268	19,96%
TPA Z	LIDAR trajectory 1	78.750	-	0,00%
	LIDAR trajectory 2	79.101	351	0,45%
	LIDAR trajectory 3	79.351	601	0,76%
	Fotogrametri Trajectory 1	79.814	1.064	1,35%
	Fotogrametri Trajectory 2	82.163	3.413	4,33%
	Fotogrametri Trajectory 3	94.072	15.322	19,46%

Pada Tabel 1, perhitungan volume data LiDAR *trajectory 1* digunakan sebagai acuan perbandingan volume timbunan sampah pada tiga lokasi TPA. Dihasilkan perbedaan volume dengan data LiDAR untuk setiap *trajectory* memiliki perbedaan di bawah 1% dengan perbedaan terbesar terdapat pada TPA Z dengan nilai 0,76%.

Data fotogrametri terdapat perbedaan perhitungan volume yang cukup signifikan terutama pada *trajectory 3* yang menghasilkan perbedaan volume terbesar mencapai 19,96% karena adanya ketidaklengkapan data fotogrametri yang diproses menjadi DTM sehingga mempengaruhi volume timbunan sampah yang dihitung.

3.5. Perbandingan Waktu Pemrosesan Data

Proses pertama pengolahan data LiDAR dan data fotogrametri di tiga lokasi TPA dimulai dengan menghasilkan *point cloud*. Data LiDAR diproses dengan *software* bawaan Yellowscan dan data fotogrametri diproses menggunakan *software* Agisoft Metashape. Hasil *point cloud* selanjutnya diproses menggunakan *software* Global Mapper untuk menghasilkan DTM. Waktu pemrosesan data LiDAR dan fotogrametri menjadi DTM ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu Pemrosesan Data LiDAR dan Fotogrametri

Lokasi TPA	Metode Pemrosesan Data	Jumlah Foto	Align Photos	Build Mesh	Built Point Cloud	Build DTM	Total Waktu
TPA X	LIDAR trajectory 1				0:12:07	0:03:14	0:15:21
	LIDAR trajectory 2				0:09:14	0:02:02	0:11:16
	LIDAR trajectory 3				0:05:22	0:01:48	0:07:10
	Fotogrametri Trajectory 1	527	0:14:32	3:16:00	1:35:00	0:27:14	5:32:46
	Fotogrametri Trajectory 2	241	0:06:24	01:18:29	0:25:29	0:23:06	2:13:28
	Fotogrametri Trajectory 3	162	0:03:25	0:56:26	0:14:19	0:17:44	1:31:54
TPA Y	LIDAR trajectory 1				0:16:11	0:03:32	0:19:43
	LIDAR trajectory 2				0:12:08	0:02:39	0:14:47
	LIDAR trajectory 3				0:07:48	0:02:16	0:10:04
	Fotogrametri Trajectory 1	713	0:27:28	3:04:00	4:39:00	0:34:27	8:44:55
	Fotogrametri Trajectory 2	340	0:10:39	2:01:45	1:06:00	0:28:12	3:46:36
	Fotogrametri Trajectory 3	196	0:06:06	1:03:27	0:22:42	0:25:55	1:58:10
TPA Z	LIDAR trajectory 1				0:11:41	0:02:08	0:13:49
	LIDAR trajectory 2				0:07:51	0:01:37	0:09:28
	LIDAR trajectory 3				0:04:29	0:01:01	0:05:30
	Fotogrametri Trajectory 1	489	0:13:21	2:53:00	1:45:00	0:24:17	5:15:38
	Fotogrametri Trajectory 2	243	0:06:31	1:15:28	0:48:01	0:20:11	2:30:11
	Fotogrametri Trajectory 3	140	0:05:10	0:45:39	0:19:17	0:16:32	1:26:38

Dari Tabel 2, diketahui waktu yang dibutuhkan dalam mengolah data fotogrametri lebih lama dibandingkan mengolah data LiDAR karena data fotogrametri diolah menggunakan foto udara yang disatukan untuk menghasilkan *point cloud*. Semakin banyak foto yang diproses maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk memproses data hingga menjadi DTM. Pada penelitian ini diketahui bahwa pengolahan data fotogrametri di TPA Y dengan *trajectory 1* menghasilkan waktu terlama yaitu 8 jam 44 menit 55 detik.

4. Kesimpulan

Memerhatikan perbedaan *trajectory* UAV pada pengolahan data setiap lokasi TPA yang diteliti, terdapat beberapa perbedaan yang dihasilkan menggunakan sensor LiDAR (UAV LiDAR) dan kamera (UAV fotogrametri).

Hasil analisis perbandingan volume timbunan sampah dari data UAV LiDAR terhadap tiga *trajectory* berbeda menunjukkan hasil yang lebih presisi di bawah 1% dibandingkan data UAV fotogrametri yang menunjukkan hasil perbedaan volume hingga 19.96%. Perhitungan waktu pemrosesan *Digital Terrain Model* UAV LiDAR (19 menit 23 detik) menunjukkan hasil yang lebih cepat dibandingkan pemrosesan DTM UAV fotogrametri dengan waktu terlama 8 jam 44 menit 55 detik.

Untuk penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengambilan data menggunakan UAV yang berbeda untuk sensor LiDAR dan kamera fotogrametri agar mendapatkan data *trajectory* yang lebih bervariasi. Selain itu, hasil penelitian ini dapat membantu penelitian lain yang berkaitan dengan pemetaan di area terbuka dengan vegetasi rendah.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih atas dukungan dari Kementerian Perhubungan RI dalam hal ini Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia yang telah memberikan beasiswa Program Magister Double Degree (S2-DD) di ITB & ENAC, dosen dan staf ITB dan PT Bali Drone Production dalam melakukan penelitian untuk topik ini.

Daftar Pustaka

- [1] V. Chamola, P. Kotes, A. Agarwal, Naren, N. Gupta, and M. Guizani, "A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques," *Ad Hoc Networks*, vol. 111, p. 102324, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102324.
- [2] The European Commission & The European Union Agency for the Space Programme, "EUSPA EO and GNSS Market Report," Luxembourg, 2022.
- [3] K. Chang, *Introduction to Geographic Information Systems*, 9th ed. New York: Mc Graw- Hill, 2019.
- [4] B. Ruzgienė, T. Berteška, S. Gečyte, E. Jakubauskienė, and V. Č. Aksamitauskas, "The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation," *Measurement*, vol. 73, pp. 619–627, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.04.018.
- [5] C. Ghilani and P. R. Wolf, *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics*, 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2012.
- [6] B. S. Hadi, "Dasar-Dasar Fotogrametri," Universitas Negeri Yogyakarta, 2007.
- [7] V. Verma, R. Kumar, and S. Hsu, "3D Building Detection and Modeling from Aerial LIDAR Data," in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 2 (CVPR '06)*, IEEE, pp. 2213–2220. doi: 10.1109/CVPR.2006.12.
- [8] X. Wang, H. Pan, K. Guo, X. Yang, and S. Luo, "The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 502, no. 1, p. 012008, May 2020, doi: 10.1088/1755-1315/502/1/012008.
- [9] A. R. S. Aji and D.- Djurdjani, "Perbandingan Volume Stockpile Batu Bara Hasil UAV Fotogrametri dan UAV Lidar," *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, p. 70, Dec. 2022, doi: 10.22146/jgise.78295.
- [10] G. F. Simões and C. A. A. Catapreta, "Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil," *Waste Management*, vol. 33, no. 2, pp. 420–430, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.10.001.
- [11] R. Cossu and R. Stegmann, *Solid Waste Landfilling*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2012-0-02435-0.
- [12] G. R. Gonçalves and A. Jalobeanu, "LiDAR boresight calibration: a comparative study," in *AGU Fall Meeting Abstracts*, San Fransisco, 2011.
- [13] H. Eisenbeiß, "UAV Photogrammetry," Zurich, 2009.