

Integrasi Data TLS dan UAV Untuk Pemodelan 3D Gua Aul di Kabupaten Ciamis

Daffa Fadhillah Akbar, Gusti Ayu Jessy Kartini*

Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung
Koresponden email: ayujessy@itenas.ac.id

Diterima: 5 Juli 2025

Disetujui: 14 Juli 2025

Abstract

Gua Aul, located in Ciamis Regency, is a cultural heritage site with significant historical and scientific value. To support preservation efforts and digital documentation, this study aims to produce a 3D model of Gua Aul by integrating data from a Terrestrial Laser Scanner (TLS) and an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). TLS data was used to map the cave interior with high accuracy and density, while UAV data captured the cave exterior, including the surrounding topographic area. The registration process employed an independent georeferencing method, in which each point cloud was tied to the global coordinate system WGS 84/UTM Zone 49S using GNSS data. The integration of interior and exterior point clouds resulted in a complete 3D model, with geometric validation accuracy showing an overall RMSE of 0.005 m, indicating a very small and acceptable average deviation of the TLS and UAV integration compared to the actual dimensions. This integration result was not significantly different from the actual object size based on a *t*-distribution statistical test at a 95% confidence level. The resulting 3D modeling is expected to serve as a medium for documentation, education, as well as a foundation for sustainable conservation and management of the cultural site. Thus, the integration of TLS and UAV has proven to be an effective and adaptive approach to supporting the protection of cultural heritage in the future.

Keywords: *gua aul, terrestrial laser scanner (tls), unmanned aerial vehicle (uav), cultural heritage, digital documentation*

Abstrak

Gua Aul di Kabupaten Ciamis merupakan salah satu situs cagar budaya yang memiliki nilai historis dan ilmiah penting. Dalam rangka mendukung upaya pelestarian serta dokumentasi digital, penelitian ini bertujuan menghasilkan model 3D Gua Aul dengan mengintegrasikan data *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Data TLS digunakan untuk memetakan bagian interior gua dengan tingkat akurasi dan kepadatan tinggi, sedangkan UAV digunakan untuk memperoleh data eksterior gua yang mencakup area topografi di sekitarnya. Proses registrasi dilakukan dengan metode *independent georeferencing*, di mana masing-masing *point cloud* diikat ke sistem koordinat global WGS 84/UTM Zona 49S menggunakan data GNSS. Integrasi *point cloud* interior dan eksterior menghasilkan model 3D yang utuh, dengan akurasi validasi geometrik menunjukkan nilai RMSE keseluruhan diperoleh sebesar 0,005 m, yang menunjukkan rata-rata deviasi integrasi TLS dan UAV terhadap ukuran sebenarnya kecil dan dapat diterima untuk pemodelan 3D gua. Hasil integrasi ini dinilai tidak berbeda signifikan dibandingkan ukuran objek aktual berdasarkan uji statistik *t-distribution* pada tingkat kepercayaan 95%. Pemodelan 3D yang dihasilkan diharapkan berperan sebagai media dokumentasi, edukasi, serta landasan konservasi dan pengelolaan situs budaya secara berkelanjutan. Dengan demikian, integrasi TLS dan UAV terbukti menjadi pendekatan efektif dan adaptif dalam mendukung perlindungan warisan budaya di masa mendatang.

Kata Kunci: *gua aul, terrestrial laser scanner (tls), unmanned aerial vehicle (uav), cagar budaya, dokumentasi digital*

1. Pendahuluan

Gua merupakan sebuah bentukan alami berupa ruangan karst yang terbentuk pada medan batu gamping dibawah tanah baik yang berdiri sendiri maupun saling terhubung dengan ruangan-ruangan lain sebagai hasil proses pelarutan oleh aliran air maupun aktivitas geologi yang terjadi [1]. Dalam kehidupan masa lampau gua dimanfaatkan oleh manusia sebagai tempat untuk tinggal dan sembunyi [2]. Salah satu bukti tersebut adalah dengan adanya penemuan di Gua Aul, Dusun Mekarsari, Desa Cikupa, Kecamatan Banjaranyar, Kabupaten Ciamis, Provinsi Jawa Barat berupa bagian dari kerangka manusia berupa *fragmen* tulang tengkorak dan tulang anggota, *moluska*, alat serpih, *perkutor*, *fragmen* beliung persegi, *fragmen* tulang binatang dari kelompok *vertebrata* (badak, sapi, rusa, monyet, musang, dan binatang-binatang pengerat), *moluska* laut dan darat, serta

berbagai macam *fragmen* tembikar [3]. Berdasarkan informasi dari masyarakat, dahulu Gua Aul sempat dimanfaatkan sebagai lokasi penambangan pospat antara tahun 1980-an sampai dengan tahun 1998. Saat dimanfaatkan untuk penambangan pospat, sudah ada indikasi temuan, namun tidak signifikan sehingga oleh para penambang temuan tersebut dipindahkan/dibuang ke lokasi lain [4]. Gua Aul terletak pada bentukan kars dari proses pelarutan yang dicirikan oleh berbagai karakteristik morfologi yang dapat dikelompokkan menjadi satuan unit bentuk lahan perbukitan Kars yaitu kerucut Kars trapesoid (K3) [5].

Dalam jangka waktu panjang sangat rentan bahwa gua akan mengalami kerusakan akibat faktor alam maupun aktivitas manusia. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah mitigasi untuk melindungi keunikan dan nilai ilmiah gua. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah pemodelan 3D, yang memungkinkan dokumentasi digital secara mendetail [6]. Pemodelan ini tidak hanya berfungsi sebagai arsip untuk merekam kondisi gua saat ini, tetapi juga sebagai alat penting dalam penelitian lebih lanjut, termasuk analisis arkeologi dan struktur gua. Dengan teknologi 3D ini dapat menjadi salah satu upaya perlindungan dalam mendokumentasikan aset situs cagar budaya yang dapat mengkaji perubahan yang terjadi seiring waktu serta merancang strategi perlindungan yang lebih efektif. Hal ini sejalan dengan Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya, khususnya Pasal 1 Ayat 1.

Metode untuk pemodelan tiga dimensi dapat dilakukan menggunakan teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). TLS merupakan sebuah peralatan penangkapan gambar aktif yang secara cepat dapat memperoleh kumpulan dari titik-titik tiga dimensi dari suatu objek maupun permukaan [7]. Sistem pemindai *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) telah digunakan secara efektif dalam pengukuran gua dalam beberapa tahun terakhir [6]. TLS telah menjadi sistem yang efektif untuk menghasilkan informasi 3D untuk bagian dalam gua seperti lantai, dinding, dan langit-langit gua dengan kemampuan untuk mengumpulkan data di lingkungan yang tidak memiliki cahaya, lingkungan yang kompleks, dan menghasilkan ribuan titik 3D per detik [8]. Dalam dekade terakhir, *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) muncul sebagai alat penting untuk pemetaan 3D karena kemampuannya menghasilkan peta 2D dan 3D beresolusi tinggi, termasuk *ortofoto*, *Digital Elevation Models* (DEM), dan *point cloud*, menggunakan berbagai macam pencitraan dan sensor kedalaman [6].

Teknologi ini memungkinkan penggunaan yang mudah di semua jenis medan, termasuk area di mana akses manusia akan berbahaya. Sistem *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) telah digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk investigasi efek pengembangan gua terhadap tanah longsor dan proses *geomorfologi* [6]. *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) menyediakan data 3D yang sangat rinci untuk memetakan bagian dalam gua, *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dapat menghasilkan peta topografi di luar gua, Data tersebut dapat digunakan untuk menganalisis hasil integrasi kedua data untuk memodelkan bentuk gua dengan kondisi topografi permukaan [9].

Penggunaan teknologi TLS dan UAV telah membuat proses pengukuran gua dengan geometri yang kompleks dan area yang sulit diakses menjadi lebih mudah [6]. TLS dengan kemampuan pengukuran bebas cahaya dan kapasitas pembuatan *point cloud* yang padat merupakan sistem yang berguna untuk menghasilkan data yang detail untuk interior gua, sedangkan UAV berguna untuk memetakan topografi di luar gua dalam hal mengurangi waktu survei tanah dan menghasilkan data dari tempat yang sulit dijangkau manusia [6]. Menggabungkan data dari kedua sistem ini secara 3D penting untuk mendokumentasikan gua serta untuk tujuan pengelolaan gua dan penilaian risiko [6]. Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan data TLS dan UAV guna menghasilkan model 3D Gua Aul yang akurat sebagai bagian dari upaya konservasi dan dokumentasi digital.

2. Metode Penelitian

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan mulai dari 1 April hingga 20 Juni 2025. Berlokasi di Gua Aul, Dusun Mekarsari, Desa Cikupa, Kecamatan Banjaranyar, Kabupaten Ciamis, Provinsi Jawa Barat (7°30'10, 27" LS 108°30'8,47" BT). Berikut beberapa alasan dalam pemilihan lokasi penelitian:

- a) Situs Gua Aul merupakan tinggalan yang khas dan langka di Jawa Barat bagian Selatan.
- b) Situs Gua Aul saat ini merupakan satu-satunya gua di Kabupaten Ciamis yang mengandung tinggalan budaya masa lalu dari masa prasejarah dan kemudian menembus masa sejarah.

Situs Gua Aul merupakan lokasi yang mempresentasikan setting aktivitas kehidupan manusia prasejarah yang didukung oleh berbagai temuan artefaktual dan non artefaktual sesuai masanya. Peta Situs Gua Aul yang disajikan pada **Gambar 1** yang menunjukkan posisi gua terhadap geografis lain di sekitarnya.



Gambar 1. Peta Situs Gua Aul
Sumber: BPK Jawa Barat 2024

Data dan Peralatan

Dalam penelitian ini sumber data primer didapatkan dari Balai Pelestarian Kebudayaan Provinsi Jawa Barat sebagai penunjang dalam pengolahan data. Data primer ini menggunakan alat berupa *Trimble TX7* untuk pemindaian laser terestris, *Drone Mavic 3 Enterprise* untuk foto udara, serta *GNSS Survey E800* untuk pengukuran koordinat dengan ketelitian tinggi, alat – alat tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Data sekunder sebagai referensi tambahan untuk memperkuat hasil penelitian dengan temuan sebelumnya. Dengan menggabungkan data primer dan data sekunder, penelitian dapat memiliki dasar yang lebih kuat dalam menyajikan hasil serta kesimpulan yang valid. Berikut sumber data yang akan digunakan **Tabel 1**.

Tabel 1. Data dan Peralatan

Kategori	No	Data	Alat	Keterangan
Data Primer	1.	<i>Point cloud</i>	TLS Trimble TX7	Mempresentasikan bentuk dan struktur Gua Aul untuk model 3D.
	2.	Foto Udara	Drone Mavic 3 Enterprise	Mengidentifikasi sekitar area Gua Aul yang memfokuskan pada luar gua.
	3.	Koordinat BM dan GCP	GNSS Survey E800	Titik acuan untuk melakukan integrasi data
Data Sekunder	1.	Undang-undang No. 11 Tahun 2010	-	Landasan untuk melakukan pendokumentasian cagar budaya.
	2.	Laporan kegiatan eskavasi penyelamatan Gua Aul Kabupaten Ciamis 2024	-	Informasi mengenai latar belakang Gua Aul.



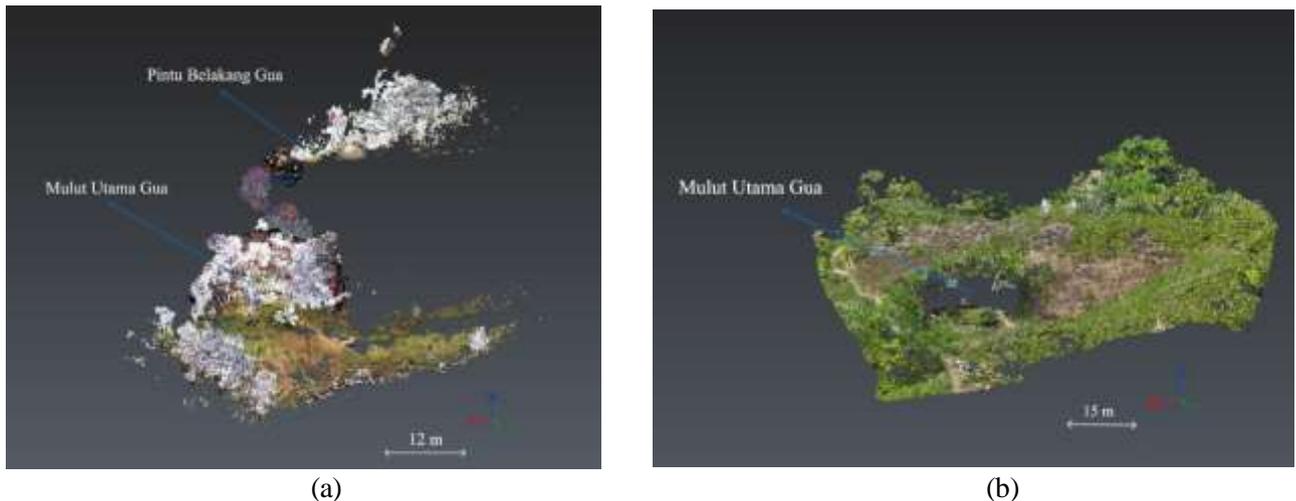
Gambar 2. (a) TLS Trimble TX7 (b) Drone Mavic 3 Enterprise (c) GNSS Survey E800

Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur untuk memahami konsep dasar serta kajian-kajian terdahulu terkait pemetaan dan pemodelan 3D gua. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data lapangan di Gua Aul, mencakup tiga jenis data utama, yaitu data *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), data *Global Navigation Satellite System* (GNSS), dan data *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Ketiga jenis data ini kemudian divalidasi untuk cek data yang dibutuhkan dan cek kualitasnya masing-masing sebelum diproses lebih lanjut.

Pada tahap awal pengolahan data TLS, dilakukan proses registrasi antar hasil pemindaian (*cloud-to-cloud registration*) untuk menggabungkan *point cloud* dari berbagai stasiun pemindaian. Selanjutnya, *point cloud* tersebut digabungkan menjadi satu kesatuan menggunakan perangkat lunak *Cyclone Register 360*, kemudian dilakukan proses *georeferencing* dengan metode *independent georeferencing*, di mana *point cloud* interior dan eksterior diproses secara terpisah melalui tahap registrasi dan georeferensi. Proses ini memanfaatkan data GNSS hasil pengukuran di lapangan, seperti titik *benchmark* (BM), sehingga diperoleh *point cloud* interior yang terintegrasi dalam sistem koordinat WGS 84/UTM Zona 49S. Tahapan ini menghasilkan representasi geospasial dari bagian dalam gua.

Sementara itu, data UAV diawali dengan proses orientasi awal yang diperoleh melalui hasil pemotretan udara menggunakan *software Agisoft Metashape*. Setelah itu dilakukan proses ortorektifikasi. UAV yang digunakan telah dilengkapi teknologi *Real Time Kinematic* (RTK), yang dilakukan pencatatan koordinat secara real-time dengan akurasi tinggi di setiap titik pengambilan gambar. Dengan demikian, proses *georeferencing* dapat dilakukan secara langsung berdasarkan data RTK. Hasilnya berupa *point cloud* eksterior yang merepresentasikan topografi luar gua dengan tingkat ketelitian yang memadai. Penggabungan kedua teknologi TLS dan UAV dilakukan dikarenakan TLS tidak bisa untuk memperoleh data atas gua [10].

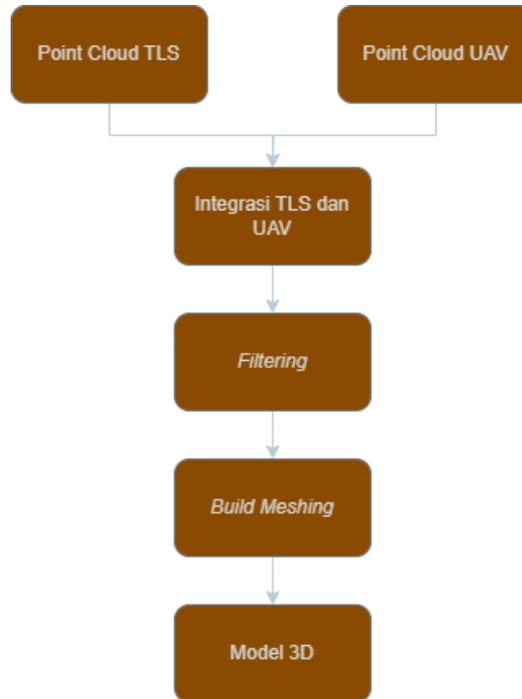


Gambar 3. (a) Hasil Pemindaian TLS (b) Hasil Pemindaian UAV

Hasil pemindaian interior dan eksterior Gua Aul dapat dilihat pada Gambar 3, yang selanjutnya akan diintegrasikan untuk menjadikan model 3D yang utuh. Data *point cloud* yang dihasilkan kemudian dimanfaatkan untuk membangun model 3D Gua Aul, yang merepresentasikan kondisi gua secara menyeluruh, baik dari aspek bentuk, topografi, maupun orientasi spasialnya. Secara umum, alur pemrosesan mengikuti tahapan yang digambarkan pada **Gambar 4**. Seluruh data telah terproyeksikan dalam sistem koordinat yang

sama, yaitu WGS 84/UTM Zona 49S, sesuai dengan lokasi penelitian yang berada di Kabupaten Ciamis, Jawa Barat.

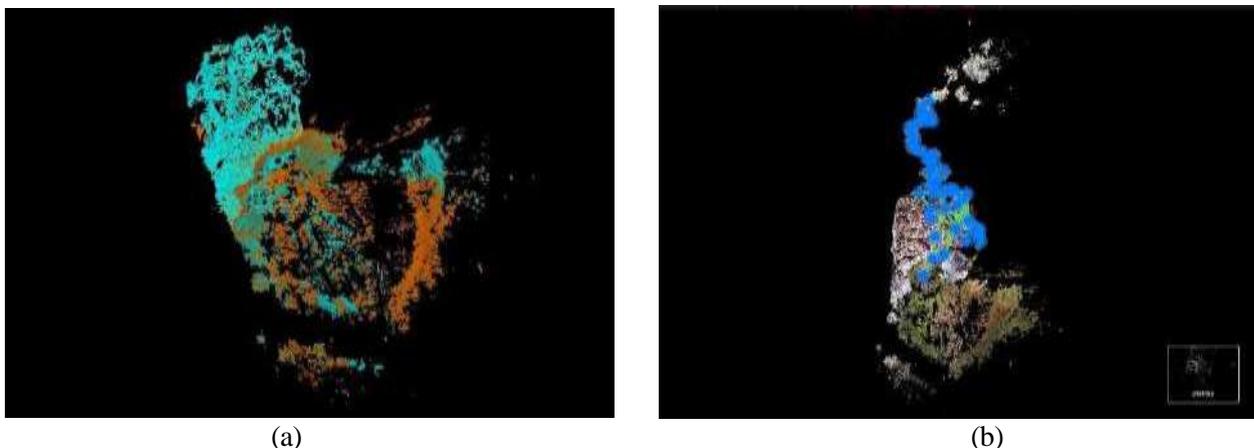
Format data yang dihasilkan dari pengolahan TLS maupun UAV menggunakan format .e57. Format ini dipilih karena bersifat ringkas, netral terhadap platform atau vendor, serta mendukung interoperabilitas untuk penyimpanan dan pertukaran data 3D. Selain itu, format .e57 juga didukung oleh banyak perangkat lunak pemrosesan *point cloud* komersial maupun *open-source*, sehingga mempermudah proses integrasi dan analisis lebih lanjut [11].



Gambar 4. Proses Integrasi Data TLS dan UAV

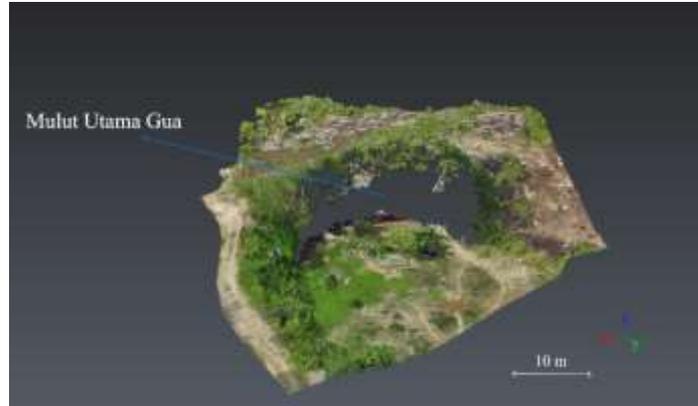
Pengolahan data TLS dilakukan menggunakan *software Cyclone Register 360* untuk proses registrasi sebanyak 49 hasil pemindaian (*scan*). Metode *cloud-to-cloud* diterapkan dengan identifikasi serta pemilihan objek yang bersesuaian secara manual pada *point cloud* dari posisi pemindaian yang berdekatan [12]. Proses ini juga mencakup penggabungan dua sesi akuisisi terpisah dengan cara mengidentifikasi titik-titik tumpang tindih (*overlap*) yang ada di antara keduanya. Penyelarasan dilakukan melalui transformasi geometris berupa translasi dan rotasi manual untuk mencocokkan objek referensi secara presisi.

Hasil registrasi menunjukkan tingkat *overlap* sebesar 71%, yang mengindikasikan bahwa seluruh hasil pemindaian dapat dihubungkan secara optimal. Selain itu, diperoleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,002 m.



(a) (b)
Gambar 5. (a) Proses Registrasi Data TLS (b) Hasil Registrasi Seluruh Scan

Pemindaian eksterior gua dilakukan dengan data UAV foto udara yang berjumlah 494 foto yang dilakukan pengolahan pada *Agisoft Methasape*. Langkah awal dengan penyelarasan foto yang digunakan untuk mengidentifikasi titik-titik gambar. Selanjutnya Proses *build model* yang akan menghasilkan model 3D awal. Tahap akhirnya dilakukan build *Point Cloud* untuk menghasilkan model 3D yang berupa *point cloud* yang berjumlah 275.116.705 titik yang dapat di export dalam format e57. Report hasil akhir data UAV memiliki *Ground Sampling Distance (GSD)* 0.397 $\mu\text{m}/\text{pix}$ yang berarti semakin kecil GSD, semakin tinggi resolusi spasial, dan semakin detail informasi yang dapat diperoleh dari data fotogrametri [13].



Gambar 6. Proses Foto udara menjadi *Point Clouds*

3. Hasil dan Pembahasan

Integrasi data TLS dan UAV yang dilakukan pada *Cyclone 3DR*, data tersebut digabungkan menjadi satu set. Dalam penggabungannya data *point cloud* harus dipastikan memiliki sistem koordinat yang sama dalam masing-masing data (*Independent Georeferencing*). Prosedur integrasi data dilakukan dengan memilih objek yang sama pada kedua set data. Pada bagian depan mulut gua, belakang pintu gua dan halaman depan gua yang dapat memungkinkan untuk memilih objek pada *N-Point Registration 3DR* yang dapat dilihat pada Gambar 7. Hasil geoferensi dapat dilihat pada Tabel 2 yang menunjukkan kualitas model 3D yang cukup baik.



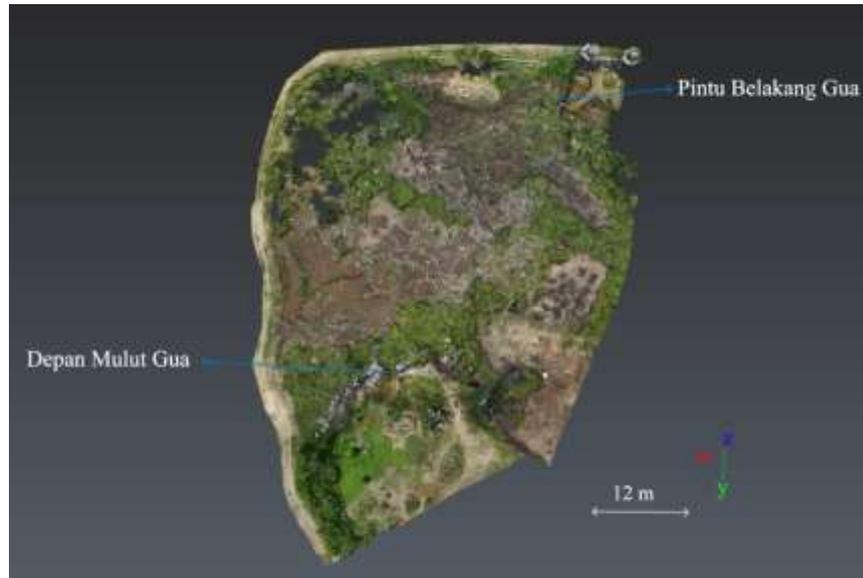
Gambar 7. Hasil *N-Point Registration 3DR*

Tabel 2. Hasil *Geoferencing*

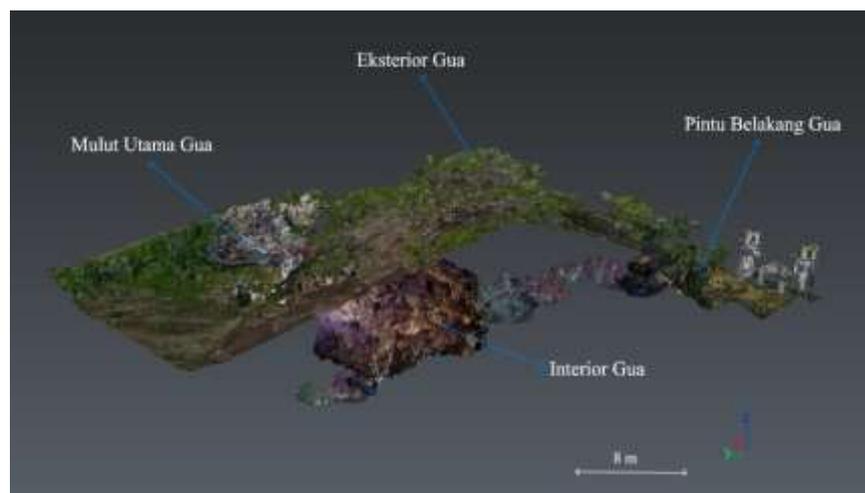
TLS	Titik	Error (mm)		
		X	Y	Z
	1	0,019	0,055	0,000
	2	0,023	0,053	0,000
	3	0,004	0,002	0,000

Data *point cloud* yang dihasilkan pada tahap awal pemindaian mengandung sejumlah *noise* akibat adanya objek-objek di luar area target pemodelan gua, seperti vegetasi, alat peraga, atau pantulan permukaan

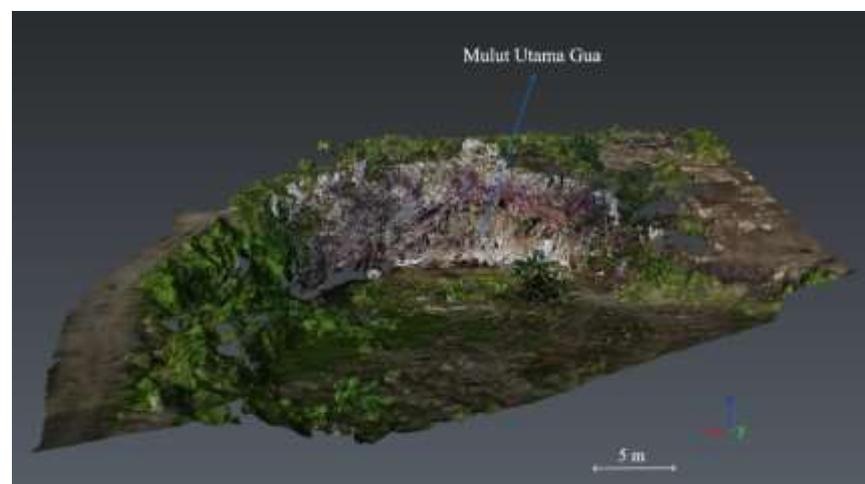
yang tidak diinginkan. Untuk memastikan hanya area relevan yang tersisa, dilakukan proses *filtering* secara manual dengan memanfaatkan fitur *clean separate* pada *Cyclone 3DR*. Proses ini menghilangkan titik-titik yang dianggap sebagai *outlier* atau bukan bagian dari permukaan gua. Pengurangan ini sekaligus mencerminkan efektivitas metode *filtering* dalam membersihkan *noise*, sehingga menghasilkan dataset *point cloud* yang lebih akurat dan siap digunakan untuk tahap pemodelan tiga dimensi gua secara detail [8].



Gambar 8. Hasil Integrasi Data TLS (Interior) dan UAV (Eksterior) Tampak Atas



Gambar 9. Hasil Integrasi Tampak Samping



Gambar 10. Hasil Integrasi Tampak Depan

Pada **Gambar 8** dapat dilihat bahwa Gua Aul terletak pada bentukan *karst* hasil proses pelarutan batuan karbonat, yang dicirikan oleh berbagai karakteristik morfologi khas. Karakteristik tersebut dapat dikelompokkan ke dalam satuan unit bentuk lahan perbukitan *karst*, di mana Gua Aul termasuk ke dalam kategori K3 sesuai klasifikasi geomorfologi [3]. Pada **Gambar 9**, yang menampilkan penampang samping gua, terlihat adanya celah antara data hasil pemetaan UAV dan data hasil pemindaian TLS. Celah ini mengindikasikan adanya material sedimentasi yang terakumulasi di bagian dalam gua. Keberadaan endapan sedimentasi ini memberi petunjuk tentang dinamika proses deposisi di mulut gua, yang berpotensi merekam peristiwa alam yang mempengaruhi akumulasi material di dalam gua.

Hasil pemodelan mulut gua terdapat pada **Gambar 10**, penemuan artefak maupun fosil di Situs Gua Aul umumnya teridentifikasi di area mulut gua atau ruang depan. Hal ini berkaitan dengan karakteristik ruang pertama gua yang memiliki ukuran paling besar dibandingkan ruang lainnya, sehingga memberikan ruang yang cukup untuk berbagai aktivitas manusia pada masa lalu [3]. Selain itu, orientasi mulut gua yang menghadap ke arah timur laut memungkinkan intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalam ruangan relatif tinggi, menciptakan kondisi pencahayaan alami yang memadai sekaligus mengurangi tingkat kelembapan di dalam ruang tersebut [4]. Berbeda dengan bagian dalam gua, yaitu ruang tengah dan ruang belakang, yang cenderung lebih gelap serta memiliki tingkat kelembapan yang lebih tinggi, sehingga kurang mendukung aktivitas sehari-hari manusia di masa lalu. Faktor-faktor ini menjadikan mulut gua sebagai lokasi strategis bagi aktivitas hunian prasejarah sekaligus memfasilitasi proses pelestarian sisa budaya yang ditemukan di area ini [3]. Gambar jelas untuk area dalam mulut gua dapat dilihat pada **Gambar 11**.

Salah satu tantangan utama dalam integrasi data TLS dan UAV adalah perbedaan resolusi dan kepadatan *point cloud* yang dihasilkan oleh kedua metode. *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) menghasilkan data dengan densitas tinggi serta akurasi hingga tingkat milimeter, terutama pada area interior yang berada dalam jangkauan alat. Sebaliknya, data yang diperoleh dari *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) umumnya memiliki resolusi yang lebih rendah, meskipun masih memadai untuk kebutuhan pemodelan 3D secara global [14]. Namun demikian, terdapat beberapa keterbatasan pada data UAV, terutama di area dengan tutupan vegetasi yang lebat atau struktur kompleks, di mana sistem UAV seringkali gagal menangkap titik secara merata sehingga menimbulkan lubang (*holes*) pada hasil *point cloud*. Kondisi ini disebabkan oleh keterbatasan sudut pandang kamera UAV serta karakteristik teknologi fotogrametri yang sensitif terhadap obstruksi vegetasi padat [12]. Meskipun demikian, data UAV tetap berkontribusi signifikan dalam menyediakan cakupan spasial yang luas sebagai pelengkap data TLS, sehingga integrasi keduanya tetap menjadi pendekatan yang efektif dalam menghasilkan model 3D yang komprehensif.



(a)



(b)

Gambar 11. (a) Hasil interior sample ruangan Gua Aul (b) Hasil model dalam mulut gua

Berdasarkan perbedaan jarak model dan ukuran sebenarnya, Metode statistik digunakan untuk menilai apakah hasil Integrasi akan berbeda secara signifikan dari ukuran sebenarnya dengan jumlah sample 10 objek. Perhitungan uji statistik dilakukan dengan menggunakan *t-distribution* dengan interval kepercayaan 95%. Hasil perhitungan uji statistik dengan menggunakan *metode t-distribution* menunjukkan bahwa semua hasil pengukuran dari model 3D Gua Aul dapat diterima, yaitu sudah berada di dalam interval nilai batas bawah dan batas atas. Nilai RMSE keseluruhan diperoleh sebesar 0,005 m, yang menunjukkan rata-rata deviasi integrasi TLS dan UAV terhadap ukuran sebenarnya kecil dan dapat diterima untuk pemodelan 3D gua [15].

Tabel 3. Hasil Uji Statistik

No	Objek	Nilai Sebenarnya (m)	Nilai Integrasi (m)	Selisih (m)	Selisish ² (m)	95% Confidence Interval (m)	Keterangan
1	Lebar Mulut Gua Utama	27,500	27,496	0,004	0,000016	27,473 – 27,523	Diterima
2	Tinggi Mulut Gua Utama	10,270	10,276	-0,006	0,000036	10,234 – 10,311	Diterima
3	Lebar Pintu Gua Belakang	2,148	2,152	-0,004	0,000016	2,124 – 2,175	Diterima
4	Tinggi Pintu Gua Belakang	2,569	2,571	-0,002	0,000004	2,557 – 2,582	Diterima
5	Lebar Panggung	6,563	6,568	-0,005	0,000025	6,533 – 6,597	Diterima
6	Tinggi Panggung	4,458	4,451	0,007	0,000049	4,410 – 4,499	Diterima
7	Lebar Tangga	1,646	1,644	0,002	0,000004	1,632 – 1,657	Diterima
8	Lebar Lorong Gua	1,743	1,748	-0,005	0,000025	1,713 – 1,777	Diterima
9	Lebar Paving Blok	0,760	0,768	-0,008	0,000064	0,713 – 0,814	Diterima
10	Tinggi Paving Blok	1,990	1,985	0,005	0,000025	1,956 – 2,019	Diterima

4. Kesimpulan

Integrasi data *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) pada penelitian ini berhasil menghasilkan model 3D Gua Aul, Kabupaten Ciamis, yang komprehensif dan representatif. Data TLS memberikan akurasi dan densitas tinggi terutama di bagian interior gua, sedangkan data UAV mampu mencakup area eksterior dengan jangkauan spasial yang luas meskipun memiliki resolusi yang relatif lebih rendah.

Kombinasi kedua teknologi ini, melalui proses registrasi, *georeferencing*, serta validasi geometrik, terbukti mampu meminimalkan kekurangan masing-masing metode secara terpisah. Model 3D yang dihasilkan dapat merepresentasikan bentuk, orientasi spasial, dan topografi gua secara utuh dengan tingkat akurasi yang sesuai standar toleransi. Dengan demikian, integrasi TLS dan UAV menjadi pendekatan yang efektif dan efisien untuk pemodelan gua, terutama pada kawasan yang kompleks dan sulit dijangkau sepenuhnya oleh satu jenis teknologi saja.

Pemodelan 3D ini dapat dimanfaatkan sebagai media dokumentasi dan pendukung upaya pelestarian cagar budaya, mengingat Gua Aul memiliki nilai historis dan lingkungan yang penting untuk dijaga keberlanjutannya. Model 3D yang dihasilkan dapat digunakan sebagai arsip digital, dasar perencanaan konservasi, serta sarana edukasi bagi masyarakat maupun pihak terkait dalam upaya perlindungan dan pengelolaan warisan budaya secara berkelanjutan. Dengan demikian, integrasi TLS dan UAV dapat menjadi pendekatan yang efektif, efisien, dan adaptif dalam mendukung pelestarian situs-situs cagar budaya di masa mendatang.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung dari berbagai pihak yang patut diapresiasi. Kami menyampaikan terimakasih kepada Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah IX Jawa Barat sebagai penyedia data primer, PT GPS Land Indosolutions sebagai pendukung survey di lapangan. Dukungan Leica Geosystems dalam menyediakan *license* pada *software Cyclone* untuk pengolahan data, serta PT Jade Karya Trinusa yang telah memfasilitasi penyediaan *workstation* untuk mendukung proses pengolahan data. Tidak terlepas dari dukungan Kepala Dinas Kebudayaan Kabupaten Ciamis dan Masyarakat Desa Cikupa yang telah berperan penting dalam memfasilitasi perizinan, akses, dan dukungan logistik yang sangat membantu kelancaran penelitian ini.

6. Referensi

- [1] Uca dan R. Angriani. "Pemetaan Gua Kalibong Aloa Kawasan Karst" *Jurnal Sainsmat, Halaman 92-101*, 2018.
- [2] Annisa, A. Halin, and Salniwati, "Analisis bentuk kerusakan Soronga pada situs Gua Peti Mati di Desa Matahori, Kecamatan Padangguni, Kabupaten Konawe," 2024.

- [3] L. Yondri, "Laporan peninjauan arkeologi," *Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Republik Indonesia*, 2023.
- [4] Direktorat Jenderal Kebudayaan Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah IX, "Laporan kegiatan eskavasi penyelamatan Gua Aul Kabupaten Ciamis," *Kementerian Pendidikan Kebudayaan Riset dan Teknologi*, 2024.
- [5] L. Youndri, "Naskah rekomendasi penetapan situs Gua Aul Desa Cikupa, Kecamatan Banjaranyar, Kabupaten Ciamis," *Balai Pelestarian Kebudayaan*, 2023.
- [6] R. Çömert, et al., "3D data integration for geo-located cave mapping based on Unmanned Aerial Vehicle and Terrestrial Laser Scanner data," *Baltica*, 2023.
- [7] Lichti, D. D. "A review of geometric models and self-calibration methods for terrestrial laser scanners". *Boletim de ciências geodésicas*, 16(1), 3-19, 2010.
- [8] M. O. Idrees and B. Pradhan, "A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development," *Official Journal of Union Internationale de Spéléologie*, 2016.
- [9] L. Alessandri and V. Baiocchi, "The fusion of external and internal 3D photogrammetric models as a tool to investigate the ancient human/cave interaction," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B2 XXIV ISPRS Congress*, 2020.
- [10] Ulvi, A. Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 42(6), 2021.
- [11] Gusti A. J. Kartini and N. D. Saputri, "3D modelling of Boscha Observatory with TLS and UAV integration data," *Journal of Geomatics and Planning*, 2022.
- [12] Y. Alshawabkeh and N. Haala, "Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation," *Institute for Photogrammetry (IFP), University of Stuttgart, Germany*, 2017.
- [13] F.J. Lamia. J.E. Rogi dan D. Tiwow, " Pengukuran Ketajaman Ground Sampling Distance (GSD) Di Berbagai Ketinggian Lahan Sawah Dengan Menggunakan Drone Tipe Mavic 2 Pro Di Desa Matani Kecamatan Tumpa. *Agri-SosioEkonomi Unsrat, ISSN (p) 1907– 4298, ISSN (e) 2685-063X, Sinta 5, Volume 19 Nomor 1*, 2023
- [14] B. Kordić, B. L. Oberiter, K. Pikelj, B. Matoš, and G. Vlastelica, "Integration of terrestrial laser scanning and UAS photogrammetry in geological studies," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 63(4), pp. 989–1003, 2019.
- [15] Maharani, M. "Analisis Ketelitian Model Tiga Dimensi Bangunan Besar Yang Dihasilkan Dari Metode Fotgrametri Jarak Dekat. Skripsi", Jurusan Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2015