

**PEMETAAN TIGA DIMENSI
 GUA AUL DI DESA CIKUPA-CIAMIS, JAWA BARAT MENGGUNAKAN
 TERRESTRIAL LASER SCANNER (TLS)**

***Three-Dimensional Mapping of Aul Cave Using Terrestrial Laser Scanner (TLS),
 Cikupa Village, West Java, Indonesia***

**Ananda Jessyca Ayu Theodolita ¹⁾, Gusti Ayu Jessy Kartini ^{2)*},
 dan Lutfi Yondri ²⁾**

^{1,2)}Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
 Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. PHH Mustopa No.2, Bandung, Indonesia

³⁾Pusat Riset Arkeologi Prasejarah dan Sejarah, Badan Riset dan Inovasi Nasional
 Jl. Jendral Gatot Subroto, Jakarta, Indonesia

**Pos-el: ayujessy@itenas.ac.id (corresponding author)*

Naskah diterima: 1 Juli 2025 - Revisi terakhir: 27 September 2025

Disetujui terbit: 29 September 2025 - Terbit: 25 November 2025

Abstract

This study examines the potential of Terrestrial Laser Scanner (TLS) technology in documenting and understanding the characteristics of cave spaces as part of geospatial and cultural heritage. The study was conducted in Aul Cave, West Java, as part of efforts to preserve and interpret underground spaces through a digital spatial approach. Using the Trimble X7 TLS, this research produced a comprehensive three-dimensional representation of the cave structure, including its geometric shape and surface characteristics. The analysis focused on the differences in material properties between natural elements such as stalactites and rock walls, and artificial materials such as cement and paving blocks, based on laser reflection intensity values. Through this approach, the study not only provides precise visual documentation but also opens up possibilities for interpreting the function of cave spaces and indications of past human activity. The results of the study show that TLS is not only effective as a documentation tool but also relevant as a spatial analysis method in archaeological, geospatial, and cultural heritage preservation studies. This approach is expected to encourage broader utilization of digital technology in spatial-based research and the preservation of underground cultural heritage.

Keywords: Terrestrial Laser Scanner; Intensity; Aul Cave Geometry; 3D Modeling

Abstrak

Artikel ini mengkaji potensi teknologi pemindaian *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dalam mendokumentasikan dan memahami karakter ruang gua sebagai bagian dari warisan geospasial dan budaya. Kajian ini dilakukan di Gua Aul, Jawa Barat, sebagai bagian dari upaya pelestarian dan interpretasi ruang bawah tanah melalui pendekatan spasial digital. Dengan memanfaatkan TLS Trimble X7, kajian ini menghasilkan representasi tiga dimensi dari struktur gua secara menyeluruh, yang mencakup bentuk geometri serta karakteristik permukaan gua. Analisis diarahkan pada perbedaan sifat material antara elemen alami seperti stalaktit dan dinding batuan, serta material buatan seperti semen dan paving block berdasarkan nilai intensitas pantulan laser. Melalui pendekatan ini, kajian tidak hanya menyajikan dokumentasi visual yang presisi, tetapi juga membuka kemungkinan interpretasi terhadap fungsi ruang gua dan indikasi aktivitas manusia di masa lalu. Hasil kajian memperlihatkan TLS tidak hanya efektif sebagai alat dokumentasi, tetapi juga

relevan sebagai metode analisis ruang dalam kajian arkeologi, geospasial, dan pelestarian situs budaya. Pendekatan ini diharapkan dapat mendorong pemanfaatan teknologi digital secara lebih luas dalam kajian berbasis ruang dan warisan budaya bawah tanah.

Kata kunci: *Terrestrial Laser Scanner; Intensitas; Geometri Gua Aul; Pemodelan 3D*

PENDAHULUAN

Situs Gua Aul adalah salah situs cagar budaya yang terletak di Desa Cikupa, Kecamatan Banjaranyar, Kabupaten Ciamis, Jawa Barat. Situs ini ditemukan pada akhir 2023 dan memiliki peran penting dalam menelusuri kehidupan prasejarah selain berfungsi sebagai tempat hunian. Gua Aul juga menunjukkan peran multifungsi sebagai ruang aktivitas domestik dan lokasi pemanfaatan sumber daya alam oleh manusia prasejarah. Peran ini tercermin dari berbagai temuan arkeologi yang ditemukan di dalam gua, seperti alat serpih, perkutor, alat tulang, serta sisa fauna dan moluska, yang mengindikasikan kegiatan subsistensi, pengolahan bahan mentah, serta pengolahan hasil tangkapan dari lingkungan sekitar. Berdasarkan hasil ekskavasi, Gua Aul menyimpan beragam artefak seperti alat batu, artefak tulang, fragmen tulang hewan, dan sisa moluska yang menunjukkan keterkaitan erat dengan kehidupan dan budaya masa lalu (Yondri, 2023). Balai Pelestarian Kebudayaan (BPK) Wilayah IX mengungkapkan adanya temuan kerangka manusia berupa rahang yang berasal dari masa prasejarah serta artefak budaya lainnya (BPK IX, 2024). Temuan sisa-sisa kehidupan prasejarah di Gua Aul berdasarkan studi arkeologi menunjukkan gua ini terdiri atas beberapa bagian ruang.

Bagian depan gua merupakan ruang terbesar dengan dimensi panjang dari bagian mulut hingga dinding bagian dalam sekitar 29,7 meter. Lebar bagian mulut gua mencapai 28,66 meter, sementara tinggi dari lantai masuk kini hingga langit-langit bagian tengah mencapai 9,85 meter, sebagaimana dapat diilustrasikan pada Gambar 1 dan tinggi langit-langit di bagian mulut gua sekitar 8,95 meter. Ukuran yang luas ini memungkinkan berlangsungnya berbagai aktivitas manusia pada masa lalu. Keberadaan aktivitas tersebut dibuktikan oleh beragam tinggalan budaya yang ditemukan, terutama saat masyarakat meratakan lantai gua. Artefak yang ditemukan mencerminkan kehidupan manusia prasejarah (BPK IX, 2024).



Gambar 1 Dimensi Ruang Bagian Depan

Ruang bagian tengah pada Gua Aul berbentuk lorong memanjang yang mengarah ke sisi barat laut, terhubung langsung dengan ruang bagian depan melalui bukaan sempit. Lorong ini memiliki ketinggian dan lebar yang relatif lebih kecil dibandingkan ruang utama, serta menunjukkan ciri khas berupa dinding batuan yang tidak beraturan. Permukaan lantai pada lorong ini sebagian besar tertutup oleh endapan tanah dan material lepas yang kemungkinan terbawa oleh aliran air atau proses pelapukan alami.

Ruang bagian belakang terletak di sisi timur dari ruang bagian depan dan baru terungkap dalam proses eksplorasi terbaru. Ruangan ini memiliki ciri khas berupa keberadaan stalaktit yang masih utuh tergantung di bagian langit-langit, menunjukkan kondisi yang relatif belum banyak mengalami gangguan. Lantai ruang bagian belakang tertutup oleh sedimentasi halus, yang mengindikasikan proses pelapukan batuan atau akumulasi material dalam jangka waktu panjang. Letak dan kondisi ruang ini memberikan indikasi bahwa area tersebut kemungkinan belum dimanfaatkan secara intensif oleh manusia masa lalu, berbeda dengan ruang bagian depan yang menunjukkan bukti aktivitas budaya.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut, Gua Aul ditetapkan sebagai Situs Cagar Budaya oleh Pemerintah Kabupaten Ciamis melalui Dinas Kebudayaan, Pemuda, dan Olahraga pada tahun 2023. Hal ini sejalan dengan ketentuan Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya. Salah satu bentuk pelindungan dan pelestarian yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan dokumentasi bentuk Gua Aul secara rinci dengan menggunakan teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Metode ini memungkinkan akuisisi data spasial dengan presisi tinggi yang esensial untuk rekonstruksi digital situs secara menyeluruh, tanpa mengganggu kondisi fisiknya (Kartini dkk., 2023).

Kajian mengenai dokumentasi gua telah banyak dilakukan sebelumnya. Secara konvensional, alat ukur seperti kompas, pita ukur, dan klinometer digunakan untuk mengukur serta mencatat elemen-elemen geomorfologis gua maupun situs warisan alam dan budaya lainnya (Büyükşalih dkk., 2020; Giordan dkk., 2021). Seiring perkembangan teknologi, pendekatan yang lebih maju seperti penggunaan Teodolit atau *Total Station* dan fotogrametri mulai diadopsi.

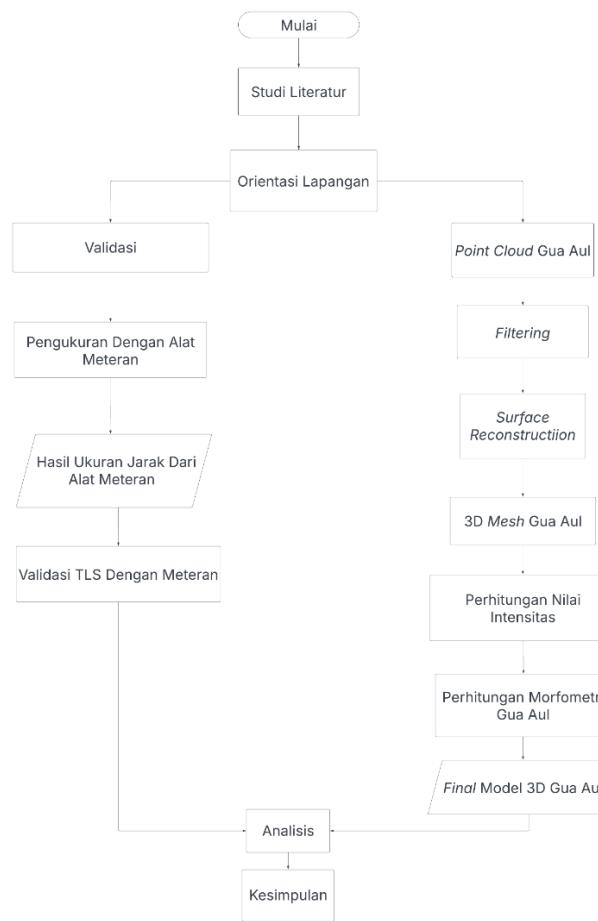
Pemanfaatan teknologi TLS juga menunjukkan tren yang semakin meluas karena kemampuannya dalam menghasilkan dokumentasi tiga dimensi yang akurat dan beresolusi tinggi, terutama pada gua dengan struktur morfologi yang kompleks. Teknologi ini mampu merekam objek secara rinci dengan cepat dan efisien di lingkungan yang sulit dijangkau dan menghasilkan jutaan titik koordinat (x, y, z) dilengkapi dengan nilai intensitas (Pavelka dkk., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, kajian ini membahas penerapan teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dalam dokumentasi Gua Aul, termasuk proses pengolahan data dan pembuatan model tiga dimensi (3D), serta analisis karakteristik geometrik dan nilai intensitas dari material alami maupun buatan berdasarkan data *point cloud*. Tujuan kajian ini adalah untuk menghasilkan model 3D Gua Aul yang akurat berbasis data TLS, serta

menganalisis geometri dan intensitas reflektansi permukaan gua guna mendukung dokumentasi dan pelestarian situs.

METODE

Kajian ini menggunakan teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Metode utama untuk memperoleh hasil akuisisi data secara detail dan akurat untuk menghasilkan model tiga dimensi gua yang terperinci. Akuisisi data dilakukan di Gua Aul menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) Trimble X7, dengan total 49 titik pemasangan alat. Gambar 2 menunjukkan tahapan yang akan dilakukan dalam kajian ini.



Gambar 2 Diagram Alir Kajian

Pemrosesan dan rekonstruksi model 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak *open-source* CloudCompare (CC). Salah satu tahap utama dalam proses ini adalah pengolahan data *point cloud*, yang memuat informasi posisi serta orientasi permukaan pada setiap titik. Orientasi tersebut direpresentasikan dalam bentuk normal *point cloud*, yang berperan penting dalam menentukan kualitas hasil rekonstruksi permukaan (*meshing*). Kesalahan dalam estimasi normal dapat menyebabkan terbentuknya lubang atau distorsi pada hasil model 3D.

Rekonstruksi permukaan atau *meshing* dilakukan dengan menerapkan algoritma *Poisson Surface Reconstruction* (PSR) yang tersedia pada *software CC*. Algoritma ini

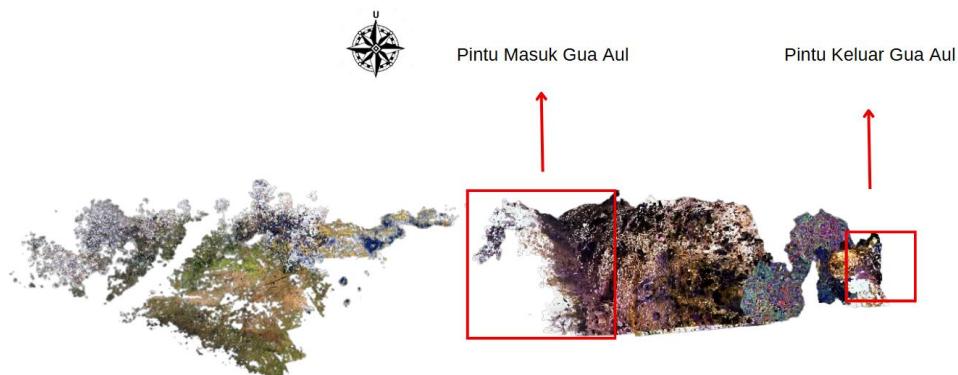
mampu merekonstruksi permukaan kompleks secara akurat dari data *point cloud* yang tidak terstruktur. Salah satu parameter penting dalam PSR adalah kedalaman *Octree*, yang mengontrol tingkat detail (*Level of Detail / LoD*) pada hasil akhir model. Pada kajian ini, digunakan kedalaman *Octree* antara 8 hingga 10 untuk menghasilkan model permukaan dengan tingkat kedetailan yang optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemetaan Pemodelan 3D Gua Aul

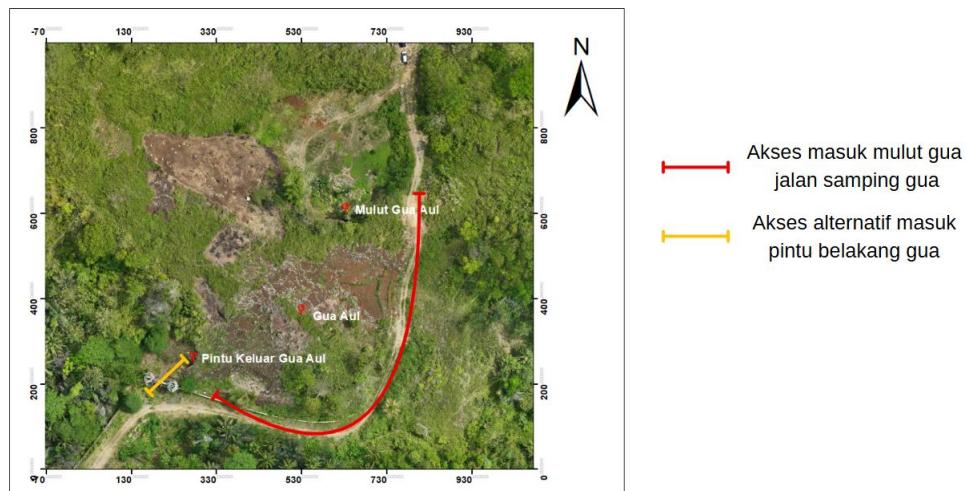
Proses dokumentasi digital dan perancangan model akhir dibagi ke dalam empat tahapan utama. Tahap awal mencakup pembuatan model awal bentuk geometri Gua Aul serta pembuatan visualisasi (*output*) yang diperlukan untuk proses modifikasi lebih lanjut. Modifikasi dilakukan secara digital pada model tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk tahap rekonstruksi objek secara menyeluruh.

Pada tahap berikutnya, dilakukan proses penyaringan (*filtering*) yang bertujuan untuk menghapus *noise* atau data *point cloud* yang tidak relevan. *Filtering* dilakukan terhadap data hasil akuisisi guna memperoleh *point cloud* yang bersih dan siap digunakan dalam tahap rekonstruksi permukaan. Hasil proses ini menunjukkan penurunan jumlah *point cloud* secara signifikan dari semula 2.357.254.429 titik menjadi 4.319.142 titik. *Point cloud* hasil penyaringan tersebut kemudian digunakan untuk membentuk model permukaan dengan metode *Triangulated Irregular Network* (TIN), guna merepresentasikan bentuk objek tiga dimensi secara akurat. Visualisasi hasil setiap tahapan proses ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Trimble X7 Scanning Gua Aul 49 Scan Point Cloud Gua Aul Setelah *filtering*

Gua Aul memiliki dimensi sekitar 84,96 meter berdasarkan data model 3D. Akses menuju pintu utama gua dapat dicapai melalui jalan setapak di area samping gua. Jalur alternatif untuk menuju gua dapat dilakukan melalui pintu belakang yang terhubung dengan area permukiman warga. Akan tetapi, jalur ini relatif sulit dijangkau karena tertutup oleh vegetasi semak belukar yang lebat serta lorong gua yang sempit di bagian dalam sebagaimana dapat diilustrasikan pada Gambar 4.



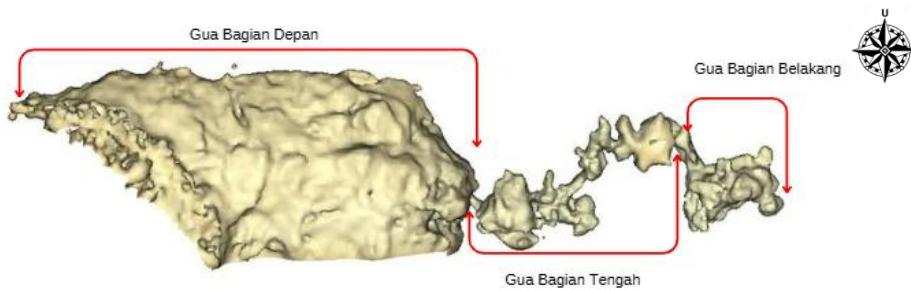
Gambar 4 Akses Masuk Gua Aul

Kondisi aksesibilitas ini menjadi pertimbangan krusial dalam pemilihan peralatan pemindaian. Penggunaan alat pemindaian yang besar dan berat akan menimbulkan tantangan mobilitas. Mulai dari memasuki Gua Aul hingga menavigasi lorong-lorong sempitnya dapat dilihat pada Gambar 5. Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan peralatan pemindaian yang ringkas dan portabel. Idealnya berupa peralatan yang dapat disimpan dengan mudah di dalam ransel guna memfasilitasi eksplorasi gua yang efektif.



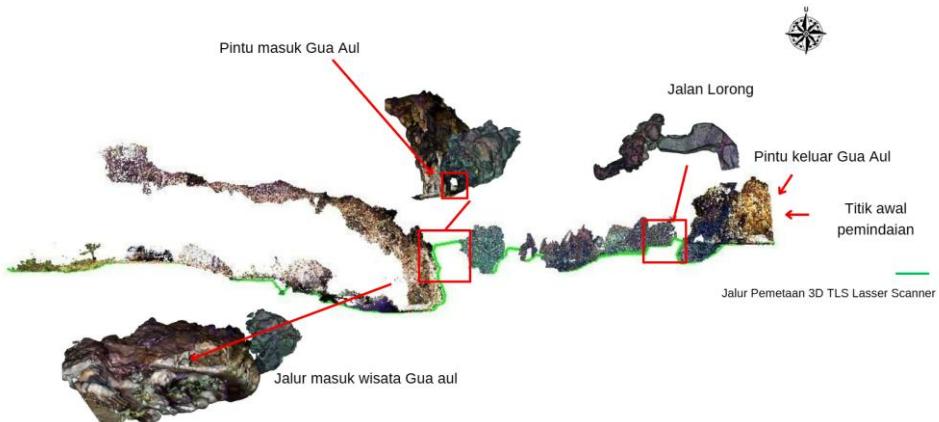
Gambar 5 Proses Pemindaian di Area Gua yang Sempit

Survei Gua Aul terbukti lebih menantang dan membutuhkan waktu karena morfologi gua yang bercabang serta adanya segmen-segmen yang sangat rendah dan sempit. -Pemetaan 3D dibagi menjadi tiga bagian guna mengakomodasi kompleksitas morfologi, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 6. Pembagian ini esensial karena ketiga bagian tersebut memiliki posisi awal yang identik dan mencakup segmen gua yang sama.



Gambar 6 Perencanaan Survei Gua Aul yang Dibagi Menjadi Tiga Bagian

Strategi pemindaian dimulai dari pintu keluar Gua Aul kemudian dilanjutkan ke bagian lorong-lorong sempit Gua Aul. Pada area lorong sempit, perlu dilakukan beberapa kali pemindaian agar seluruh ruang kecil dapat terpindai dengan baik. Area terakhir yang dipindai adalah area yang berada tepat di depan pintu masuk Gua Aul. Pemindaian tersebut mencakup seluruh struktur gua, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Tampilan Denah Ruangan dan Struktur Gua Aul

Analisis Nilai Intensitas

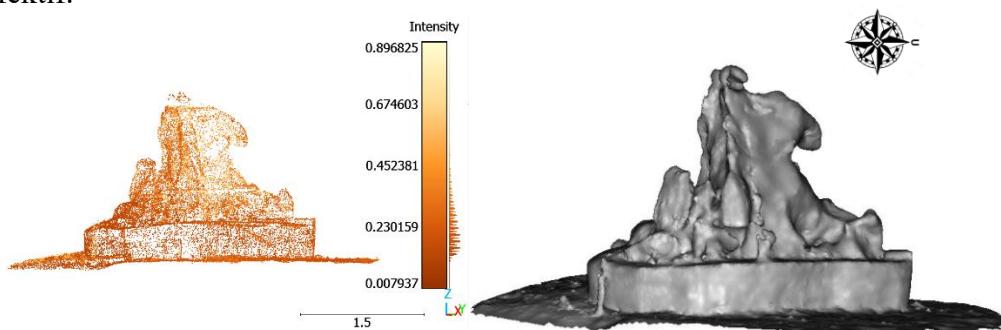
Hasil yang diperoleh dari visualisasi nilai intensitas berbentuk 3D *mesh* dan visualisasi nilai intensitas menunjukkan kekuatan pantulan sinyal laser sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8. Gambar tersebut menunjukkan dominasi intensitas rendah hingga menengah. Hasil pemrosesan menunjukkan TLS dengan panjang pantulan sinyal laser. Menurut Jalandoni dkk. (2021), nilai intensitas dipengaruhi oleh permukaan target, nilai reflektansi jarak, sudut insiden, dan kondisi atmosfer.

Mayoritas titik data pada segmen ini menunjukkan nilai intensitas TLS yang relatif rendah hingga menengah, berkisar antara 0,18 hingga 0,35 dapat dilihat pada Gambar 8. Nilai intensitas yang rendah pada hasil pemindaian TLS umumnya disebabkan oleh sifat permukaan yang kurang reflektif terhadap pancaran sinyal laser. Faktor-faktor yang memengaruhi rendahnya reflektansi tersebut meliputi jenis material seperti batuan berwarna gelap, tanah dengan tingkat kelembapan tinggi, tekstur permukaan yang kasar, serta area yang memiliki kandungan air tinggi. Menurut Soudarissanane dkk. (2020), permukaan dengan tingkat kelembapan tinggi dapat menyebabkan penurunan signifikan pada nilai intensitas hasil pemindaian TLS.



Gambar 8 Tampilan Dominasi Intensitas Rendah-Menengah Histogram Intensitas Gua Aul

Pada Gambar 9, permukaan stalaktit yang direkam menggunakan TLS Trimble X7 menunjukkan representasi visual dari bagian stalaktit yang telah runtuh. Bagian bawah stalaktit tersebut telah ditambal menggunakan material semen. Skala intensitas yang terekam berkisar antara 0,0079 hingga 0,8968, yang merepresentasikan tingkat pantulan sinyal laser dari permukaan objek ke sensor TLS. Nilai intensitas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain komposisi material, warna, kekasaran permukaan, jarak sensor, serta sudut datang sinar laser. Area tambalan semen yang terletak di bagian bawah struktur cenderung menunjukkan nilai intensitas yang lebih rendah, yaitu antara 0,0079 hingga 0,23. Hal ini mengindikasikan permukaan semen memiliki karakteristik fisik yang menyerap lebih banyak energi laser, kemungkinan disebabkan oleh warna yang lebih gelap, tekstur yang lebih kasar, atau orientasi bidang yang kurang optimal terhadap arah datangnya sinar laser. Sebaliknya, bagian atas yang merupakan material asli stalaktit menunjukkan nilai intensitas yang lebih tinggi, berkisar antara 0,45 hingga 0,89. Nilai ini mencerminkan permukaan batu kapur stalaktit memiliki daya pantul yang tinggi dan permukaan yang relatif lebih halus sehingga mampu memantulkan sinyal laser secara lebih efektif.

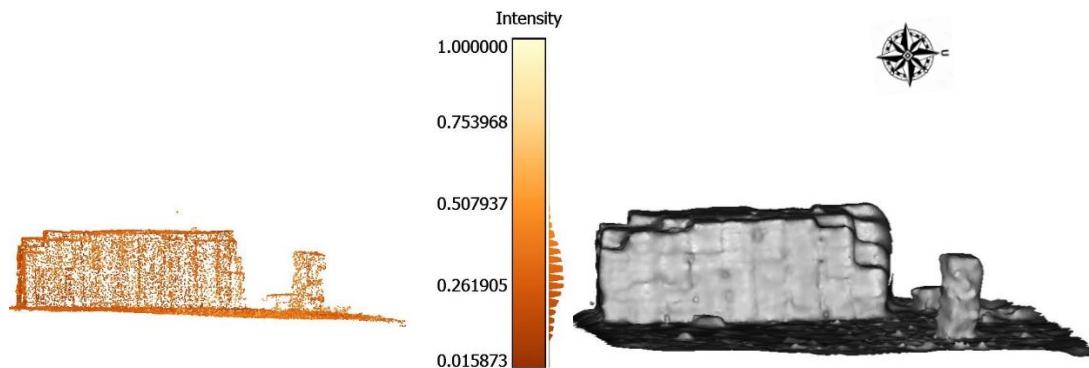


Gambar 9 Runtuhan Stalaktit yang Bagian Bawahnya Ditambal dengan Material Semen

Gambar 10 menunjukkan hasil pemindaian *point cloud* dari tumpukan material paving blok yang berada di dalam gua. Distribusi intensitas yang terekam berada pada rentang tinggi, yaitu antara 0,50 hingga 1,00 nilai tersebut menunjukkan tumpukan paving blok memiliki daya pantul sinyal laser yang tinggi. Hal ini mengindikasikan permukaan paving blok bersifat sangat reflektif, yang kemungkinan disebabkan oleh komposisi material semen serta orientasi vertikal dari tumpukan blok yang memungkinkan bidang pantulan mengarah langsung ke sensor laser.

Distribusi intensitas yang tinggi dan konsisten pada paving blok mencerminkan karakteristik permukaan yang homogen. Pola intensitas ini dapat digunakan sebagai

indikator untuk membedakan antara material buatan seperti paving blok, dari material alami, seperti batuan gua. Perbedaan nilai intensitas yang signifikan tersebut memungkinkan untuk identifikasi komposisi material secara lebih akurat dalam struktur gua.



Gambar 10 Nilai Intensitas Material Paving Blok

Analisis Model 3D dan Geometri Gua Aul

Pemodelan 3D Gua Aul dilakukan menggunakan perangkat lunak Cyclone 3DR 2021. Data *point cloud* hasil pemindaian diekspor dalam format .e57, kemudian diimpor ke perangkat lunak CloudCompare untuk proses rekonstruksi permukaan (*surface reconstruction*) atau *meshing*. Proses ini menggunakan algoritma *Poisson Surface Reconstruction* (PSR), yaitu metode pemodelan berbasis segitiga (*triangular mesh*) yang mampu merekonstruksi bentuk permukaan objek kompleks secara detail.

Parameter utama dalam proses ini adalah nilai kedalaman *Octree*, yang berperan mengontrol *Level of Detail* (LoD) pada hasil mesh akhir. Penentuan nilai *Octree* disesuaikan dengan kebutuhan ketelitian visual dan spasial bentuk gua. Setelah proses analisis rekonstruksi selesai, dilakukan analisis terhadap beberapa area signifikan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11. Gambar tersebut menampilkan salah satu pintu keluar gua dengan lebar sekitar 1,928 meter. Lokasi ini merupakan jalur alami yang berpotensi terhubung langsung dengan permukiman masyarakat di sekitar kawasan



Gambar 11 Pintu Keluar Gua Aul

Gambar 12 menunjukkan struktur runtuhan stalaktit yang bagian bawahnya telah diperbaiki menggunakan material semen. Berdasarkan hasil pemodelan 3D, tinggi total stalaktit tersebut mencapai 2,193 meter, diukur dari dasar hingga ujung tertinggi struktur. Nilai dimensi ini memberikan gambaran yang jelas mengenai skala dan ukuran elemen morfologi gua serta memperkuat dugaan bahwa stalaktit tersebut merupakan bagian aktif gua yang terbentuk secara alami dalam jangka waktu geologis yang panjang. Hal ini mengindikasikan adanya proses runtuhan sebagian yang telah mengubah morfologi awalnya. Fragmen-fragmen yang tersebar di sekitarnya menunjukkan bentuk yang menyerupai pecahan dari struktur utama, dengan orientasi acak dan kemiringan yang bervariasi, yang diduga kuat merupakan hasil dari gaya gravitasi dan lemahnya ikatan struktural akibat pelapukan berkepanjangan.



Gambar 12 Runtuhan stalaktit yang telah dimodifikasi

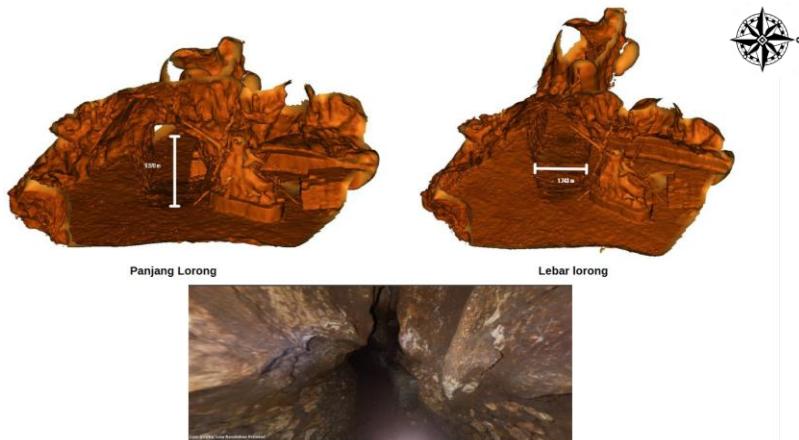
Gambar 13 menunjukkan bagian struktur gua. Segmen ini didominasi oleh material buatan yang merupakan hasil dari intervensi manusia, baik dalam bentuk penambalan, pemasangan konstruksi tambahan, maupun modifikasi akses masuk. Intervensi tersebut dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan aksesibilitas bagi kebutuhan pariwisata oleh pihak pengembang, sebelum Gua Aul ditetapkan sebagai Situs Cagar Budaya. Akan tetapi, hal ini bertentangan dengan UU No. 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya. Intervensi ini mengubah keaslian bentuk Gua Aul dan nilai-nilai arkeologis yang terkandung di dalamnya. Keberadaan material buatan ini dapat dengan mudah dikenali melalui hasil pemodelan 3D dan distribusi nilai intensitas TLS, yang menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan material alami seperti batu kapur.



Gambar 13 Material paving blok yang disimpan di dalam Gua Aul

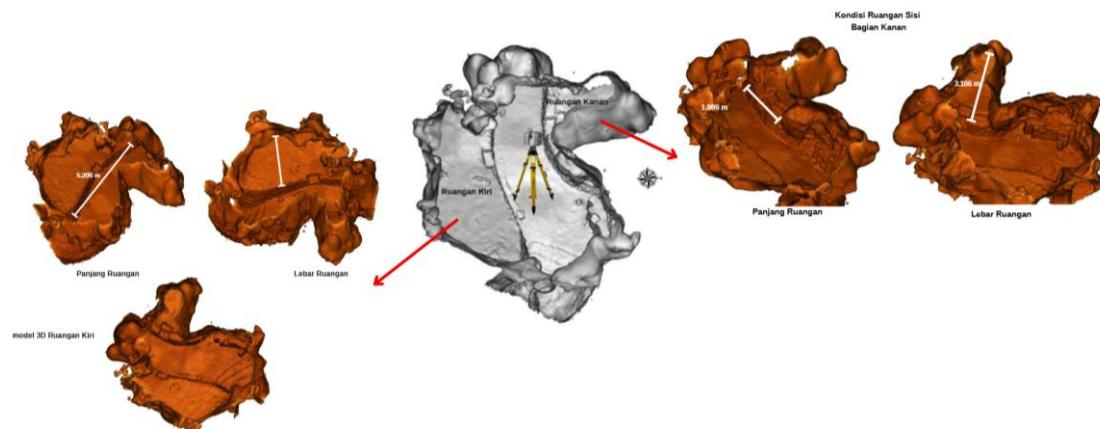
Gambar 14 menampilkan salah satu lorong utama di dalam Gua Aul, dengan panjang mencapai 9,570 meter dan lebar sekitar 1,743 meter. Dimensi ini mencerminkan geometri

alami jalur utama gua yang terbentuk secara endogen akibat proses pelarutan batuan kapur. Struktur lorong tersebut juga berperan sebagai koridor alami yang menghubungkan beberapa ruang di dalam gua. Karakteristik geometri ini juga menjadi indikator penting dalam analisis morfologi serta potensi aksesibilitas manusia maupun fungsi ruang dalam konteks arkeologi dan konservasi.



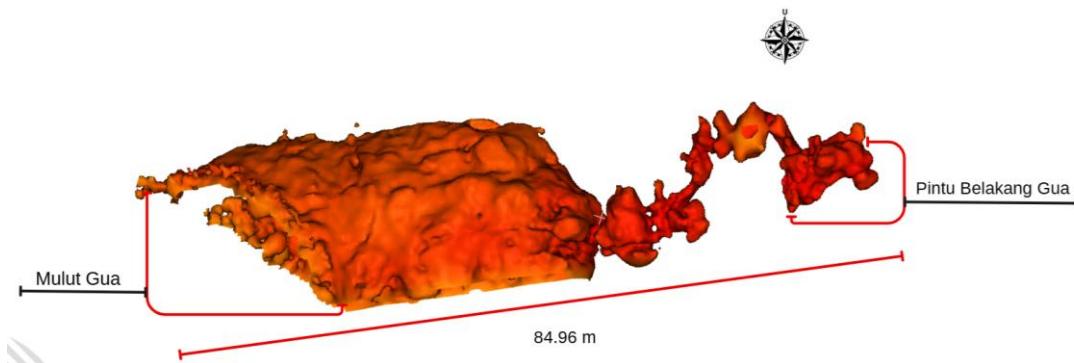
Gambar 14 Bagian Lorong Gua Aul

Gambar 15 memperlihatkan dua ruangan gua di sisi kiri dan kanan secara geometris. Ruang-ruang ini tergolong sebagai ruang berukuran kecil hingga sedang dengan bentuk membulat tidak beraturan (*irregular*). Hal ini menunjukkan pembentukan ruang tersebut didominasi oleh proses pelarutan dan runtuhannya alami. Dinding-dinding ruang memperlihatkan banyak cekungan dan tonjolan serta tidak menunjukkan bukaan besar yang memungkinkan pencahayaan alami dari luar. Hal ini menjadi salah satu kendala potensial bagi aktivitas manusia, terutama dalam konteks hunian. Meskipun secara bentuk dan kedalaman kedua ruang ini memiliki karakteristik yang secara teoretis berpotensi digunakan sebagai ruang hunian manusia prasejarah, hasil analisis arkeologis terbaru oleh Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah IX, menunjukkan indikasi penggunaan ruang-ruang ini sebagai hunian masih sangat minim. Tidak ditemukan konsentrasi artefak atau lapisan tanah yang mengindikasikan aktivitas domestik intensif. Sebaliknya, potensi hunian justru lebih kuat teridentifikasi pada bagian depan gua, khususnya di area ekskavasi dekat mulut gua, yang memperlihatkan lapisan tanah yang relatif stabil serta sebaran artefak batu yang signifikan. Hal tersebut terjadi karena faktor pencahayaan alami yang sangat terbatas, Tingkat kelembapan yang lebih tinggi serta kontur ruangan yang menurun dan tidak rata serta menyulitkan pergerakan atau aktivitas harian dengan pencahayaan alami diyakini faktor dalam pemilihan lokasi hunian pada masa prasejarah adalah faktor pertahanan, suhu dan akses terhadap sumber air.



Gambar 15 Ukuran salah satu ruang Gua Aul

Model 3D Gua Aul berhasil merepresentasikan geometri gua secara detail, mencakup fitur geologi seperti stalaktit dan lorong, serta infrastruktur wisata seperti tangga dan jalan akses. Panjang gua tercatat sekitar 84,96 m, dengan volume dan bentuk yang mendukung analisis geometrik, baik secara menyeluruh maupun pada bagian-bagian tertentu seperti pada Gambar 16.



Gambar 16 Dimensi panjang Gua Aul

Analisis Validasi Jarak Model 3D

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran jarak dari model 3D hasil TLS terhadap pengukuran langsung di lapangan menggunakan alat ukur konvensional seperti distometer, mikrometer, dan pita ukur. Total terdapat 10 titik uji pada berbagai objek representatif di dalam gua, meliputi dimensi pintu, paving blok, batu, lorong, dan ruangan. Hasil pengukuran menunjukkan secara umum terdapat selisih atau deviasi antara hasil model 3D dan pengukuran acuan lapangan. Selisih rata-rata (Δ) antara kedua metode adalah 0,316 meter disebabkan oleh sejumlah faktor teknis dan lingkungan dengan morfologi gua yang sempit, rendah, dan tidak beraturan membatasi sudut pandang alat terhadap objek sehingga memengaruhi kepadatan dan akurasi *point cloud* pada area tertentu. kondisi permukaan yang tidak rata, sifat material dengan reflektansi rendah (seperti batuan lembap atau berwarna gelap), serta keberadaan air atau tingkat kelembapan tinggi dapat menurunkan kualitas pantulan sinyal laser dan mengganggu ketepatan akuisisi titik.

Objek dengan deviasi terbesar ditemukan pada pengukuran panjang ruangan kiri, dengan selisih sebesar 1,505 meter diikuti oleh tinggi batu dan panjang ruangan kanan yang masing-masing memiliki selisih 0,607 meter dan 0,546 meter. Hal ini menunjukkan objek dengan bentuk kompleks atau permukaan tidak beraturan cenderung memiliki deviasi lebih besar akibat keterbatasan deteksi geometri oleh TLS, terutama pada sudut sempit atau permukaan tidak rata. Sementara itu, beberapa objek menunjukkan deviasi yang sangat kecil dan mendekati nol, seperti panjang paving blok 0,004 m, lebar lorong 0,007 m, dan lebar ruangan kanan 0,026 m. Hal ini menunjukkan TLS mampu merepresentasikan dalam pemetaan dan rekonstruksi Gua Aul secara akurat.

Uji-t (*T-Student*) merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata antara dua kelompok data. Penentuan signifikansi hasil pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai p (p -value) terhadap tingkat signifikansi (α) yang telah ditetapkan. Pada umumnya, tingkat signifikansi yang digunakan dalam kajian adalah 5% (0,05) atau 1% (0,01) menurut Boediono dan Koster (2001). Tingkat signifikansi (α) merepresentasikan probabilitas terjadinya kesalahan tipe I, yaitu menolak hipotesis nol (H_0) padahal H_0 benar. Kajian ini menggunakan tingkat signifikansi sebesar 5%, yang mengindikasikan adanya risiko sebesar 5% bahwa perbedaan yang diamati pada data sampel hanya terjadi variasi acak (*random error*) dan tidak mencerminkan perbedaan yang nyata pada populasi. Sebaliknya, hal ini juga berarti terhadap tingkat kepercayaan sebesar 95% bahwa kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil uji adalah benar dan dapat mewakili kondisi populasi secara umum.

Tabel 1 Perbandingan Jarak Model 3D dan Jarak Meteran

No	Keterangan	Model 3D (m)	Jarak Meteran (m)	Δ (m)
1	Lebar Pintu Exit Gua	1,928	2,148	0,220
2	Panjang Paving Blok	2,246	2,25	0,004
3	Tinggi Batu	2,193	2,8	0,607
4	Tinggi Paving Blok	0,716	0,81	0,094
5	Panjang Lorong	9,570	9,476	0,094
6	Lebar Lorong	1,743	1,750	0,007
7	Panjang Ruangan Kiri	5,206	6,711	1,505
8	Lebar Ruangan Kiri	2,548	2,605	0,057
9	Panjang Ruangan Kanan	3,106	3,652	0,546
10	Lebar Ruangan Kanan	1,999	2,025	0,026

Berdasarkan hasil uji statistik menggunakan *T-Student* terhadap 10 sampel,

diperoleh rata-rata selisih antara pengukuran model 3D TLS dan pengukuran langsung di lapangan sebesar 0,297 meter dengan standar deviasi 0,485 meter. Jika dilihat dari hasil perhitungan uji statistik *T-Student* menunjukkan nilai t_{hitung} sebesar 1,939 dengan derajat kebebasan (df) sebanyak 9 sampel. Nilai ini lebih kecil dari pada t_{tabel} pada taraf signifikansi 5% $\alpha = 0,05$ $t_{0,025;9}$ yaitu sebesar 2,262. Berdasarkan perhitungan, batas rata-rata selisih yang masih dapat dinyatakan tidak signifikan secara statistik adalah 0,347 meter. Karena rata-rata selisih pengukuran 0,297 meter berada di bawah ambang batas tersebut, nilai t_{hitung} berada di dalam daerah penerimaan hipotesis nol (H_0) diterima. Oleh karena itu, dikatakan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara hasil pengukuran model 3D dan pengukuran lapangan.

Tabel 2 Uji Statistik *T-Student*

No	Keterangan	Selang Kepercayaan 95%				
		Jarak Model 3D	Jarak Meteran	Selisih Δ (m)	σ (m)	Keterangan
1	Lebar Pintu Exit Gua	1,928	2,148	0,220	0,0060	DITERIMA
2	Panjang Paving Blok	2,246	2,25	0,004	0,0860	DITERIMA
3	Tinggi Batu	2,193	2,8	0,607	0,0960	DITERIMA
4	Tinggi Paving Blok	0,716	0,81	0,094	0,0413	DITERIMA
5	Panjang lorong	9,570	9,476	0,094	0,1530	DITERIMA
6	Lebar lorong	1,743	1,750	0,007	0,0842	DITERIMA
7	Panjang Ruangan Kiri	5,206	6,711	1,505	1,4588	DITERIMA
8	Lebar Ruangan Kiri	2,548	2,605	0,057	0,0577	DITERIMA
9	Panjang Ruangan Kanan	3,106	3,652	0,546	0,0619	DITERIMA
10	Lebar Ruangan Kanan	1,999	2,025	0,026	0,0735	DITERIMA

Berdasarkan Tabel 2, seluruh sampel perbandingan antara jarak model tiga dimensi dan jarak meteran masuk dalam rentang kepercayaan 95% sehingga dapat dikatakan bahwa model tiga dimensi Gua Aul dapat digunakan.

SIMPULAN

Kajian ini menunjukkan teknologi *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) efektif dalam mendokumentasikan dan memetakan Gua Aul menjadi model tiga dimensi yang akurat dan informatif. Model 3D yang dihasilkan tidak hanya merepresentasikan geometri ruang gua yang kompleks dan sempit, tetapi juga memungkinkan identifikasi karakteristik material berdasarkan nilai intensitas pantulan laser. Perbedaan intensitas antara material alami dan material buatan dapat diidentifikasi secara visual maupun kuantitatif. Validasi akurasi model dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran jarak dari model 3D terhadap pengukuran konvensional. Hasilnya menunjukkan rata-rata selisih sebesar 0,297 meter dengan standar deviasi 0,485 meter, yang tidak signifikan secara statistik berdasarkan uji *T-Student* dengan tingkat kepercayaan 95%. Hal ini menunjukkan model 3D yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang layak digunakan. Dalam konteks kajian arkeologi, penerapan TLS memberikan kontribusi penting dalam analisis spasial situs

gua. Model 3D berfungsi sebagai dasar untuk merekonstruksi tata ruang hunian, mengidentifikasi area aktivitas berdasarkan distribusi artefak, serta menilai perubahan morfologi akibat aktivitas manusia maupun proses alam. Temuan ini menegaskan fakta bahwa teknologi TLS tidak hanya berperan sebagai alat dokumentasi, tetapi juga sebagai instrumen analitis yang memperkuat interpretasi kehidupan prasejarah di Gua Aul. Pada kajian selanjutnya, pengembangan analisis nilai intensitas diharapkan dapat memperkaya kajian arkeologi dan geologi serta mendukung pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika budaya dan pemanfaatan ruang gua oleh manusia prasejarah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kajian ini didukung oleh Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah IX dan Dinas Kebudayaan, Kepemudaan, dan Olahraga Kabupaten Ciamis. Terima kasih kepada PT GPS Lands Indosolutions, khususnya Bapak Aditya Indra Gumarang, S.T., yang telah mendampingi proses akuisisi data. Terima kasih kepada PT Jade Karya Trinusa yang telah memfasilitasi *workstation* untuk pengolahan data tiga dimensi. Terima kasih kepada PT Datem Indonesia yang telah memfasilitasi alat GPS Geodetik.

DAFTAR PUSTAKA

- Büyüksalih, G., Kan, T., Özkan, G. E., Meriç, M., Isın, L., & Kersten, T. P. (2020). Preserving the knowledge of the past through virtual visits: From 3D laser scanning to virtual reality visualisation at the Istanbul Çatalca İnceğiz caves. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
- Boediono, B., & Koster, W. (2001). *Teori dan aplikasi statistika dan probabilitas* (D. L. Suryani, Ed.). Bandung: PT Remaja Rosdakarya. ISBN 979-692-125-1
- Domazetović, F., Lončar, N., & Marić, I. (2025). 3D mapping of karst caves of varied morphological complexity, using mobile LiDAR scanning. *Cave and Karst Science*, 52(1), 7–18.
- Kartini, G. A. J., Gumilar, I., Abidin, H. Z., Yondri, L., Nugany, M. R. N., & Saputri, N. D. (2023). Exploring the potential of terrestrial laser scanning for cultural heritage preservation: A study at Barong Cave in West Java, Indonesia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII-M-2-2023
- Konsolaki, A., Vassilakis, E., Gouliotis, L., Kontostavlos, G., and Giannopoulos, V, 2020. High resolution digital 3D modelling of subsurface morphological structures of Koutouki Cave, Greece. *Acta Carsologica*, Vol.49(2–3), 163–177. [<https://doi.org/10.3986/ac.v49i2-3.7708>]
- Istita, S., & Suroyo, H. (2021). Pengembangan aplikasi Virtual Tour (wisata virtual) objek wisata dengan konten image kamera 360. *Journal of Advances in Information and Industrial Technology*, 3(2), 45.

Undang-undang (UU) Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya

- Hoffmeister, D., Curdt, C., Tilly, N., & Bendig, J. (2011). In V. Lenz-Wiedemann & G. Bareth (Eds.), 3D Terrestrial Laser Scanner for field crop modelling Institute of Geography, University of Cologne.
- Haddad, N., & Ishakat, F. (n.d.). 3D laser scanner and reflectorless total station: A comparative study of the slots of ElKhazneh at Petra in Jordan. Department of Conservation Science, Queen Rania Institute of Tourism and Heritage, the Hashemite University.
- Jalandoni, A., Winans, W. R., & Willis, M. D., 2021. Intensity Values of Terrestrial Laser Scans Reveal Hidden Black Rock Art Pigment. *Remote Sensing* 2021, Vol. 13, Page 1357, 13(7), 1357. <https://doi.org/10.3390/RS13071357>
- KEMENTERIAN PENDIDIKAN KEBUDAYAAN RISET DAN TEKNOLOGI. (2024). *Laporan Kegiatan Ekskavasi Penyelamatan Gua Aul Kabupaten Ciamis Tahun 2024*. Direktorat Jenderal Kebudayaan, Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah IX.
- Youndri, L. (2025, 21 Februari). Wawancara tentang kehidupan prasejarah situs Gua Aul.
- Ma'mur, dkk. 2023. Geomorphological Site As A Home And Land Of The Human Live In Prehistoric Era At Segara Anakan, Ciamis Regency, West Java. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Republik Indonesia.
- Yondri, Lutfi. 2023. Laporan Peninjauan Arkeologi. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Republik Indonesia.
- Quintero, M. S., Genechten, B. V., Bruyne, M. D., Ronald, P., Hankar, M., Barnes, S. (2008). Theory and Practice on Terrestrial LaserScanning. The Learning Tools for Advanced Three-dimensional Surveying in Risk Awareness Project (3D RiskMapping).
- 3D VISUALIZATION OF CULTURAL HERITAGE USING TERRESTRIAL LASER SCANNER (A Case Study : Monument of Heroes, Surabaya, East Java).* Available from: https://www.researchgate.net/publication/304455312_3D_VISUALIZATION_OF_CULTURAL_HERITAGE_USING_TERRESTRIAL_LASER_SCANNER_A_Case_Study_Monument_of_Heroes_Surabaya_East_Java [accessed May 31 2025].
- Pisoni, I N, Cina, A, Grasso, N, and Maschio, P, 2022. Techniques and Survey for 3D Modeling of Touristic Caves: Valdemino Case. 317– 328 in Borgogno-Mondino, E and Zamperlin, P (editors), Geomatics for Green and Digital Transition. ASITA 2022. Communications in Computer and Information Science, Vol 1651. [Cham: Springer International Publishing.]
- Pavelka, K., Jr., & Pacina, J. (2023). Using of modern technologies for visualization of cultural heritage. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, 32(4), 549-563. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2023.04.0041>