Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21601 - 21615
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

Pemanfaatan Teknologi SLAM-LiDAR untuk Rekonstruksi Model Tiga Dimensi di Gua Barong Jawa Barat

Mughny Hendrawan[1], Gusti Ayu Jessy Kartini[1], Septriono Hari Nugroho[2]

[1]Departemen Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Bandung, Bandung, Indonesia
[2] Pusat Penelitian Bencana Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Bandung, Indonesia
***Koresponden email**: ayujessy@itenas.ac.id

Diterima: 22 Agustus 2026 Disetujui: 26 Agustus 2026

Abstract
Mapping complex subterranean environments like karst caves presents operational challenges for cultural heritage conservation. This study evaluates the application of SLAM-LiDAR technology (Hi-Target V700S) for three-dimensional (3D) reconstruction and spatial accuracy assessment in Barong Cave, West Java. Data acquisition was executed across two floor segments, while checkerboard target points were measured using an Electronic Total Station for georeferencing. Point cloud processing involved Iterative Closest Point (ICP) registration, Quadric normal estimation, and Poisson Surface Reconstruction combined with Laplacian smoothing. The survey generated 110,502,379 points with an acquisition time of 33–43 minutes. Georeferencing accuracy achieved Final Root Mean Square (RMS) errors of 0.0407 m (Floor 1) and 0.0257 m (Floor 2), while ICP inter-segment registration reached a Final RMS error of 0.0532 m. The resulting continuous 3D mesh preserved complex passage geometries and fine surface features, including anthropogenic vandalism. This study proves that SLAM-LiDAR provides an efficient, highly accurate, and non-destructive spatial solution for subterranean karst heritage monitoring.
Keywords: *slam-lidar, 3d modeling, point cloud, rmse, cultural heritage conservation*

Abstrak
Pemetaan lingkungan bawah tanah yang kompleks seperti gua karst menghadirkan tantangan operasional bagi konservasi cagar budaya. Penelitian ini mengevaluasi penerapan teknologi SLAM-LiDAR (Hi-Target V700S) untuk rekonstruksi tiga dimensi (3D) dan uji ketelitian spasial di Gua Barong, Jawa Barat. Akuisisi data dilakukan dalam dua segmen lantai, sementara titik target (*checkerboard*) diukur dengan *Total Station* untuk georeferensi. Pengolahan *point cloud* menerapkan registrasi *Iterative Closest Point* (ICP), estimasi normal metode *Quadric*, dan *Poisson Surface Reconstruction* dengan *Laplacian smoothing*. Survei ini menghasilkan 110.502.379 titik dengan waktu akuisisi 33–43 menit. Ketelitian georeferensi menghasilkan *Final Root Mean Square* (RMS) *error* sebesar 0,0407 m (Lantai 1) dan 0,0257 m (Lantai 2), sedangkan registrasi penggabungan ICP mencapai RMS *error* 0,0532 m. Model *mesh* 3D yang dihasilkan mampu merekam geometri lorong kompleks hingga detail vanda-lisme permukaan secara presisi. Penelitian ini membuktikan SLAM-LiDAR sebagai solusi spasial yang efisien, akurat, dan non-destruktif untuk pemantauan cagar budaya karst bawah tanah.
Kata Kunci: *slam-lidar, pemodelan 3d, point cloud, rmse, konservasi cagar budaya*

1. Pendahuluan

Survei gua merupakan hal penting dalam aktivitas penjelajah gua (*caver*) karena memungkinkan pemetaan gua untuk eksplorasi mereka [1]. Hal ini berguna sebagai panduan untuk pemanfaatan lebih lanjut atau sebagai dasar bagi kegiatan ilmiah yang dilakukan di dalam gua-gua tersebut. Salah satu Gua yang ada di Kawasan Karst Citatah adalah Gua Pawon [2]. Gua ini merupakan situs cagar budaya yang terletak di Desa Gunung Masigit, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat Jawa Barat, yang dikenal melalui situs hunian prasejarah [3]. Pada kawasan Gua Pawon ini terdapat Situs Gua lain yang berpotensi menyimpan warisan budaya yaitu Gua Barong [4]. Area Gua ini terdiri dari batu-batu besar yang membentuk salah satu jalur aliran air adalah alasan mengapa gua ini disebut Gua Barong oleh masyarakat lokal [4]. Gua ini berpotensi menjadi pemukiman manusia terdahulu berdasarkan temuan berupa tembikar, serpihan obsidian, sisa makanan, dan fragmen tulang yang ditemukan di sekitar Gua Barong [3]. Status sebagai cagar budaya mengharuskan adanya upaya pemeliharaan, pengembangan, dan pemanfaatan untuk mempertahankan keaslian bentuk arsitektur serta nilai-nilai budaya yang terkandung didalamnya.

Pemanfaatan model digital tiga dimensi (3D) pada lingkungan gua menawarkan efektivitas yang sangat tinggi dalam mendukung dua fokus kajian ilmiah mendasar. Secara spesifik, keberadaan model 3D

ini memfasilitasi analisis komprehensif terkait struktur geologi maupun bentuk lahan (geomorfologi) [5], integrasi basis data kadaster gua bawah tanah 3D [6], serta visualisasi dan navigasi terutama yang berkaitan dengan gua berakses rumit melalui teknik *virtual reality* dan *augmented reality* [7]. Dalam bidang geomatika, beberapa metode yang sudah established (teruji) tersedia untuk survei tiga dimensi pada berbagai lingkungan. Lingkungan tertutup (*indoor*) mewakili kasus yang cukup kritis, di mana teknik penentuan posisi GNSS gagal berfungsi [8].

Tyree dkk. [9] membandingkan tiga metode pengukuran gua, mulai dari penggunaan kompas dan pita ukur konvensional yang kurang akurat, hingga penggunaan EDM *Total Station*. Meskipun *Total Station* lebih presisi dalam mengukur sudut dan jarak melalui titik kontrol diskrit, penggunaannya tetap terbatas pada area lantai gua. Selain itu, karena sinyal GPS tidak dapat menembus area bawah tanah, koordinat dari luar harus ditransmisikan ke dalam gua menggunakan jaringan titik kontrol (*benchmarks*) yang rumit dari mulut gua hingga ke bagian terdalam. Kendati demikian, metode *Total Station* maupun alat konvensional lainnya masih memiliki keterbatasan mendasar, yaitu membutuhkan waktu akuisisi yang lama, jangkauan titik terbatas, serta sulit memetakan dinding dan langit-langit gua yang kompleks secara menyeluruh [10]. Keterbatasan tersebut memicu transisi menuju pemanfaatan teknologi pemindaian laser tiga dimensi (3D) berbasis *Light Detection and Ranging* (LiDAR).

Menurut Arrofiqoh dkk [11] *Light Detection and Ranging* (LiDAR) merupakan teknologi penginderaan aktif yang digunakan untuk memperoleh informasi posisi dan bentuk objek secara tiga dimensi berupa *point cloud* dengan memanfaatkan pantulan sinyal laser. LIDAR adalah sensor aktif yang dapat memancarkan laser infrared dan mengukur respon pantulan kembali ke sensor. Prinsip kerja utama teknologi ini didasarkan pada mekanisme *Time of Flight* (ToF), di mana sensor memancarkan pulsa laser dan merekam waktu tempuh yang dibutuhkan sinyal tersebut untuk memantul kembali ke reseptor setelah mengenai objek [12]. Keunggulan lain dari teknologi LiDAR adalah kemampuannya dalam bekerja pada lingkungan dengan kondisi pencahayaan yang terbatas karena sensor LiDAR merupakan sistem penginderaan aktif yang memanfaatkan energi laser yang dipancarkan sendiri oleh sensor [13]. Namun, penggunaan LiDAR masih menghadapi tantangan berupa besarnya jumlah data yang harus diproses dan kepadatan data citra jarak yang relatif jarang. Dalam implementasinya, LiDAR dapat digunakan pada berbagai platform seperti *airborne laser scanning* (ALS), *mobile laser scanning* (MLS), dan *terrestrial laser scanning* (TLS) sehingga memberikan fleksibilitas dalam proses akuisisi data sesuai kebutuhan survei dan kondisi lapangan [14].

Salah satu teknologi yang menjadi standar baru dalam pemetaan cagar alam dan cagar budaya adalah *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Melalui mekanisme pemindaian statis bertingkat, TLS mampu merekam ribuan hingga jutaan titik (*point cloud*) secara presisi tinggi untuk menghasilkan representasi bentuk fisik gua yang detail dan realistis seperti lorong, dinding, dan speleothem gua [15]. Dalam sistem koordinat tiga dimensi, titik-titik ini biasanya ditentukan oleh koordinat X, Y, dan Z, yang umumnya merepresentasikan permukaan objek [16].

Pemanfaatan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) Trimble X7 oleh Theodolita dkk [17] membuktikan keunggulan teknologi pemindaian 3D dalam mendokumentasikan dan menganalisis geometri lingkungan Gua Aul secara presisi tanpa merusak struktur fisik situs. Selain sebagai dokumentasi 3D non-destruktif, penggunaan nilai intensitas pantulan laser (*laser reflection intensity*) dalam penelitian ini terbukti efektif membedakan material alami gua dari intervensi material buatan manusia secara spasial. Dalam Penelitian Kartini dkk [4], teknologi TLS dimanfaatkan di Gua Barong untuk melakukan dokumentasi digital dan merekonstruksi model geomorfologi tiga dimensi (3D) gua secara presisi demi mendukung upaya pelestarian warisan budaya. Selain pemodelan spasial, analisis nilai intensitas gelombang *near-infrared* (NIR) dari perangkat TLS tersebut terbukti sangat potensial untuk mengidentifikasi coretan vandalisme modern yang telah memudar di dinding gua. Namun, dalam akuisisinya TLS memiliki kekurangan, speerti keterbatasan sudut pandang yang memicu penurunan kepadatan dan akurasi *point cloud*, Ukuran fisik dan bobot peralatan TLS (beserta tripod) menyulitkan mobilisasi tim saat menavigasi lorong-lorong gua, pengolahan data yang berat, dan biaya yang tidak ekonomis.

Lingkungan gua yang memiliki kondisi sempit, minim pencahayaan, dan tidak tersedianya sinyal *Global Navigation Satellite System* (GNSS) menyebabkan proses pemetaan memerlukan teknologi yang mampu bekerja secara mandiri tanpa ketergantungan terhadap sinyal satelit [18]. Oleh karena itu, teknologi pemodelan berbasis LiDAR dan metode *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) menjadi solusi yang efektif untuk pemetaan lingkungan bawah permukaan [19]. Menurut Lou dkk [20] teknologi SLAM pada dasarnya menggunakan sensor seperti kamera, LiDAR, dan *inertial measurement unit* (IMU) untuk melakukan estimasi posisi dan orientasi perangkat selama proses akuisisi data berlangsung, serta GPS untuk

Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21601 - 21615
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

menentukan posisi robot bergerak di lingkungan yang belum diketahui sekaligus membangun peta lingkungannya secara bersamaan.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Lozano dkk [18] menyatakan bahwa SLAM-LiDAR mampu menghasilkan *point cloud* dengan kepadatan tinggi dan tingkat akurasi memadai untuk analisis geomorfologi bawah permukaan. Dibandingkan metode *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) yang bersifat statis, SLAM-LiDAR menawarkan efisiensi waktu survei yang lebih tinggi serta fleksibilitas pergerakan operator di lorong gua yang sempit dan berkelok. Pembentukan model spasial dan estimasi lintasan dapat ditingkatkan akurasinya melalui integrasi algoritma SLAM yang mengoreksi posisi secara *real-time*. Metode ini menekan distorsi geometris akibat minimnya visibilitas dengan mengandalkan fitur *loop closure* sebuah proses mengenali ulang area yang telah dilewati untuk mengeliminasi penumpukan kesalahan (*drift*) posisi.

Penelitian Beltramone dkk [21] memanfaatkan SLAM-*based* LiDAR portabel (Emesent™ Hovermap ST) untuk memetakan seluruh interior Gua Paglicci secara cepat, presisi, dan bebas *blind spot* dalam waktu kurang dari satu jam tanpa bantuan sinyal GNSS. Alat tersebut diatur dalam mode *double-return* dengan kecepatan akuisisi hingga 600.000 titik/detik dengan data georeferensi diikat menggunakan *Ground Control Points* (GCP) yang diukur menggunakan *Robotic Total Station* (RTS) dan GNSS NRTK yang menghasilkan akurasi georeferensi data SLAM-LiDAR interior gua mencapai ~6 cm. Data *3D point cloud* dari SLAM-LiDAR kemudian digabungkan dengan fotogrametri UAS eksterior untuk mengekstrak jaringan kekar, perlapisan batuan, serta ketebalan atap gua. Hasil ekstraksi geometri tersebut digunakan sebagai input utama analisis stabilitas lereng dan pemodelan numerik 2D, yang berhasil mengidentifikasi zona konsentrasi tegangan serta potensi deformasi sebagai dasar perancangan mitigasi bencana situs.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan kajian yang berfokus pada pemanfaatan teknologi SLAM-LiDAR untuk menghasilkan rekonstruksi model tiga dimensi Gua Barong yang mampu merepresentasikan karakteristik geometrik interior gua secara spasial. Model tiga dimensi yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan dokumentasi digital yang lebih komprehensif mengenai kondisi fisik Gua Barong dan menjadi salah satu basis data spasial yang dapat dimanfaatkan dalam kegiatan dokumentasi serta mendukung upaya konservasi kawasan karst. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan teknologi SLAM-LiDAR dalam melakukan rekonstruksi model tiga dimensi Gua Barong serta mengevaluasi kualitas geometrik model yang dihasilkan sebagai dasar pemanfaatannya untuk dokumentasi dan konservasi kawasan karst.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini bertempat di Gua Barong yang terletak dalam kawasan Karst Citatah, Desa Gunung Masigit, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat (**Gambar 1**).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2 Data Penelitian

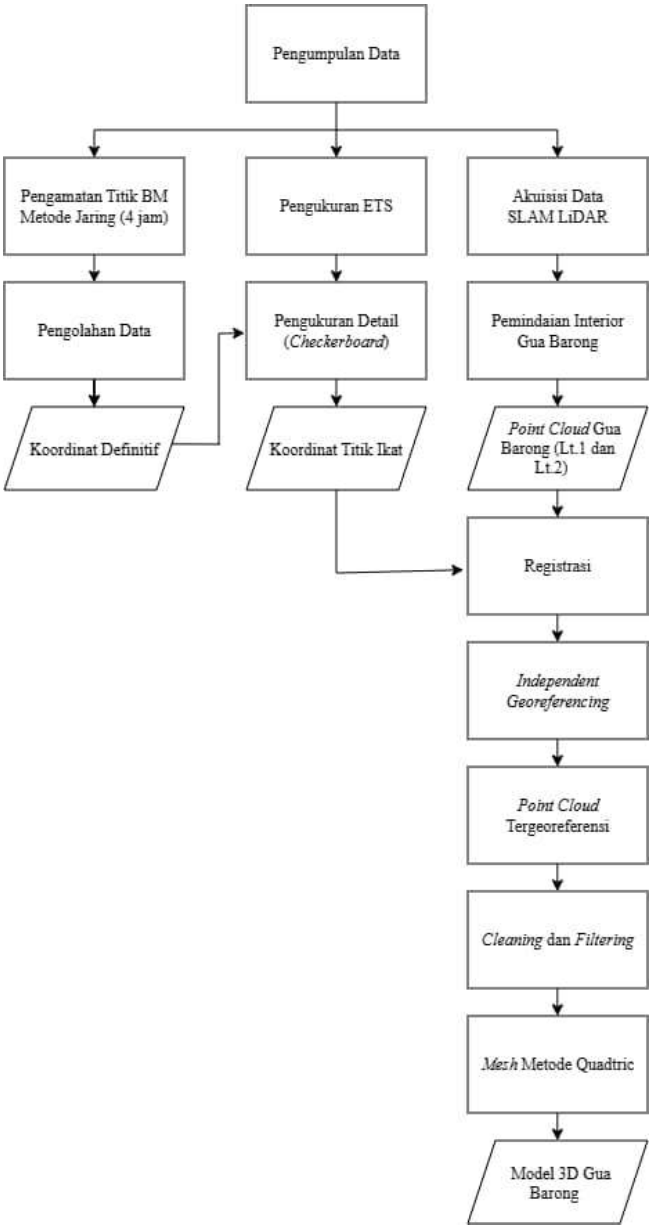
Sumber data dalam penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh melalui akuisisi langsung menggunakan dua metode pengukuran **Tabel 1**.

Tabel 1. Data yang Digunakan

No.	Data	Sumber	Tahun
1.	*Point Cloud* SLAM-LiDAR Gua Barong	Akuisisi Data Lapangan	2026
2.	Koordinat Titik Ikat *(Checkerboard)*	Hasil Pengukuran Total Station	2026

2.3 Diagram Alir Penelitian

Tahapan akuisisi data dalam penelitian ini meliputi dua kegiatan utama, yaitu pengukuran koordinat titik ikat (*checkerboard*) sebagai acuan georeferensi dan pemindaian tiga dimensi Gua Barong menggunakan teknologi 3D *laser scanning* untuk memperoleh data *point cloud*. Diagram alir yang menggambarkan keseluruhan tahapan penelitian ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.4 Akuisisi Data SLAM-LiDAR

Akuisisi data tiga dimensi dalam penelitian ini memanfaatkan kombinasi teknologi SLAM-LiDAR dan pengukuran titik ikat menggunakan Total Station. Data *point cloud* Gua Barong diperoleh melalui pemindaian menggunakan SLAM-LiDAR V700S System (**Gambar 3**), yang mengombinasikan teknologi

LiDAR SLAM, Visual SLAM, serta *Inertial Measurement Unit* (IMU). Integrasi ketiga teknologi tersebut memungkinkan proses pemetaan pada lingkungan yang tidak mendukung penerimaan sinyal *Global Navigation Satellite System* (GNSS), seperti kawasan gua. Perangkat SLAM-LiDAR dilengkapi empat kamera beresolusi tinggi, yaitu tiga kamera beresolusi 2,3 MP yang digunakan untuk memberikan informasi warna pada *point cloud* dan satu kamera bawah (*bottom camera*) yang mendukung fitur AR *stakeout*. Sensor LiDAR pada perangkat memiliki laju akuisisi hingga 200.000 titik/detik, dengan jangkauan maksimum mencapai 80 m pada tingkat reflektivitas 80% dan sekitar 40 m pada reflektivitas 10%. Selain itu, sensor memiliki *Field of View* (FoV) 360°, sehingga memungkinkan perekaman objek secara menyeluruh pada kondisi lorong gua yang sempit dan memiliki geometri kompleks.



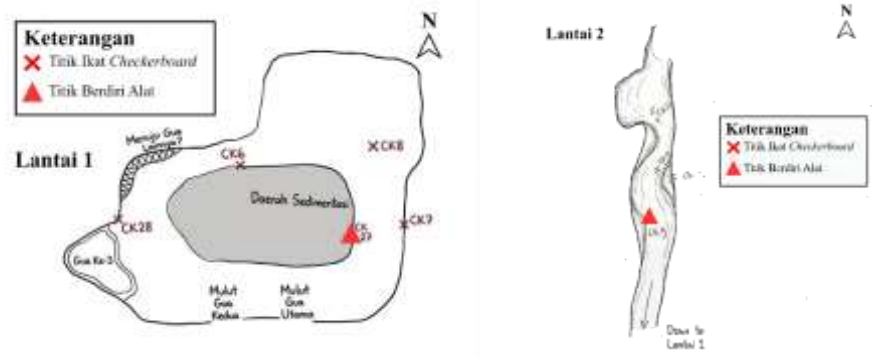
Gambar 3. SLAM Hi-LiDAR V700S System (Hi-Target.com)

Pemindaian Gua Barong dilakukan dalam dua tahapan akuisisi, yaitu pada Lantai 1 dan Lantai 2**.** Pembagian akuisisi menjadi dua segmen dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi akses menuju Lantai 2 yang memiliki lorong relatif curam dan sempit, sehingga pemindaian secara terpisah dapat memberikan fleksibilitas dalam mobilitas operator dan menjaga kualitas perekaman data. Akuisisi pada Lantai 1 mencakup area dari bagian mulut gua hingga koridor utama, sedangkan akuisisi Lantai 2 dilakukan pada area setelah tangga hingga Jendela Gua Barong. Saat dilakukannya *scanning*, penerapan *loop closure* digunakan pada SLAM di mana metode ini memanfaatkan pencocokan piksel berkecepatan tinggi menggunakan algoritma *Branch-and-Bound*, sedangkan pada LiDAR-IMU SLAM 3D, *loop closure* diterapkan melalui kriteria penggabungan bidang (*plane merging*) berdasarkan kesamaan normal dan tumpang tindih area (*overlap*). *Loop closure* diterapkan sebagai mekanisme koreksi otomatis yang mengoreksi *'drift'* trajektori saat sensor kembali ke lokasi lama atau awal, sehingga peta 2D/3D yang dihasilkan tetap akurat, presisi, dan terhubung dengan benar [22].

2.5 Akuisisi Data Titik Ikat Menggunakan Total Station

Untuk memperoleh keterikatan koordinat dan mendukung proses registrasi serta georeferensi model tiga dimensi, dilakukan pengukuran 8 titik ikat berupa *checkerboard* yang tersebar di dalam gua menggunakan Total Station [9] seperti pada **Gambar 4**. Pengukuran dilakukan dengan metode pengukuran detail melalui lima titik berdiri alat, yang terdiri atas tiga titik di luar dan dua titik di dalam Gua Barong. Konfigurasi titik berdiri alat disesuaikan dengan kondisi dan bentuk lorong gua untuk memastikan seluruh titik ikat dapat diamati dengan baik. Pengukuran tersebut menghasilkan koordinat tiga dimensi pada masing-masing titik ikat yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam proses transformasi koordinat *point cloud* hasil pemindaian SLAM-LiDAR. Dengan demikian, data koordinat hasil pengukuran Total Station memungkinkan *point cloud* yang semula berada dalam sistem koordinat lokal untuk ditransformasikan ke dalam sistem koordinat yang seragam, sehingga dapat digunakan dalam proses registrasi dan analisis perubahan geometri Gua Barong.

Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21601 - 21615
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934



(a) (b)

Gambar 4. (a) Persebaran Titik Ikat Lantai 1 (b) Persebaran Titik Ikat Lantai 2

2.6 Pengolahan Data

A. Georeferensi *Point Cloud* Menggunakan Titik Ikat

Point cloud hasil pemindaian menggunakan SLAM-LiDAR pada dasarnya direkam dalam sistem koordinat lokal yang terbentuk dari trajektori pergerakan sensor selama proses akuisisi. Agar data tersebut dapat digunakan untuk analisis spasial dan dibandingkan dengan data lain yang memiliki sistem referensi yang sama, diperlukan proses georeferensi ke dalam sistem koordinat global. Pada penelitian ini, georeferensi dilakukan menggunakan titik ikat berupa *checkerboard* yang koordinat tiga dimensinya telah diperoleh melalui pengukuran menggunakan Total Station. Titik ikat tersebut berfungsi sebagai titik kontrol yang menghubungkan posisi *checkerboard* yang teridentifikasi pada *point cloud* dengan koordinatnya pada sistem koordinat pengamatan. Dengan demikian, transformasi tidak hanya didasarkan pada bentuk atau geometri *point cloud*, tetapi menggunakan informasi koordinat titik yang memiliki posisi bersesuaian pada kedua sistem koordinat.

Proses georeferensi dilakukan menggunakan perangkat lunak CloudCompare melalui fitur *Align Point Picking* untuk mengidentifikasi posisi titik pusat *checkerboard* pada *point cloud* hasil SLAM-LiDAR. Setiap titik yang telah diidentifikasi kemudian dipasangkan dengan koordinat tiga dimensi *checkerboard* hasil pengukuran Total Station pada sistem koordinat global. Pasangan titik bersesuaian tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter transformasi yang diperlukan dalam mengubah posisi *point cloud* dari sistem koordinat lokal ke sistem koordinat global. Ketelitian hasil transformasi dievaluasi berdasarkan nilai *Root Mean Square* (RMS) dari residual titik-titik ikat yang digunakan. **Gambar 5(a)** merupakan proses dari *align picking* Lantai 1 dan **Gambar 5(b)** proses dari *align picking* Lantai 2.

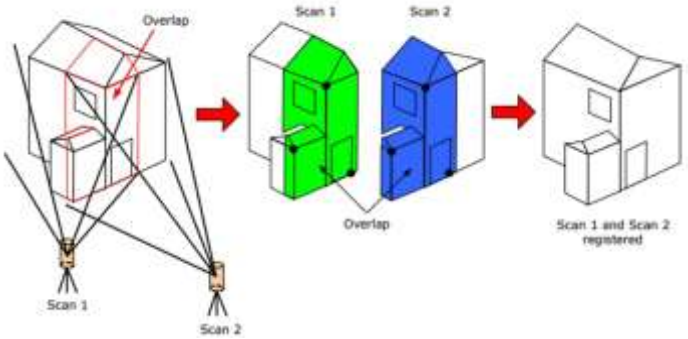


(a) (b)

Gambar 5. Proses *Align Point Picking* (a) Lantai 1 dan (b) Lantai 2

B. Registrasi *Point Cloud*

Registrasi merupakan proses penggabungan data hasil akuisisi dengan cara melakukan transformasi koordinat yang dihasilkan dari *scan world* menjadi sistem koordinat yang sama [23]. Registrasi *point cloud* dilakukan untuk menggabungkan hasil pemindaian Lantai 1 dan Lantai 2 yang diperoleh melalui akuisisi secara terpisah. Proses registrasi menggunakan metode *Cloud-to-Cloud* dengan algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) seperti pada **Gambar 6**, yang menyelaraskan dua *point cloud* berdasarkan kesesuaian geometri pada area yang saling bertampalan (*overlap*) [24].

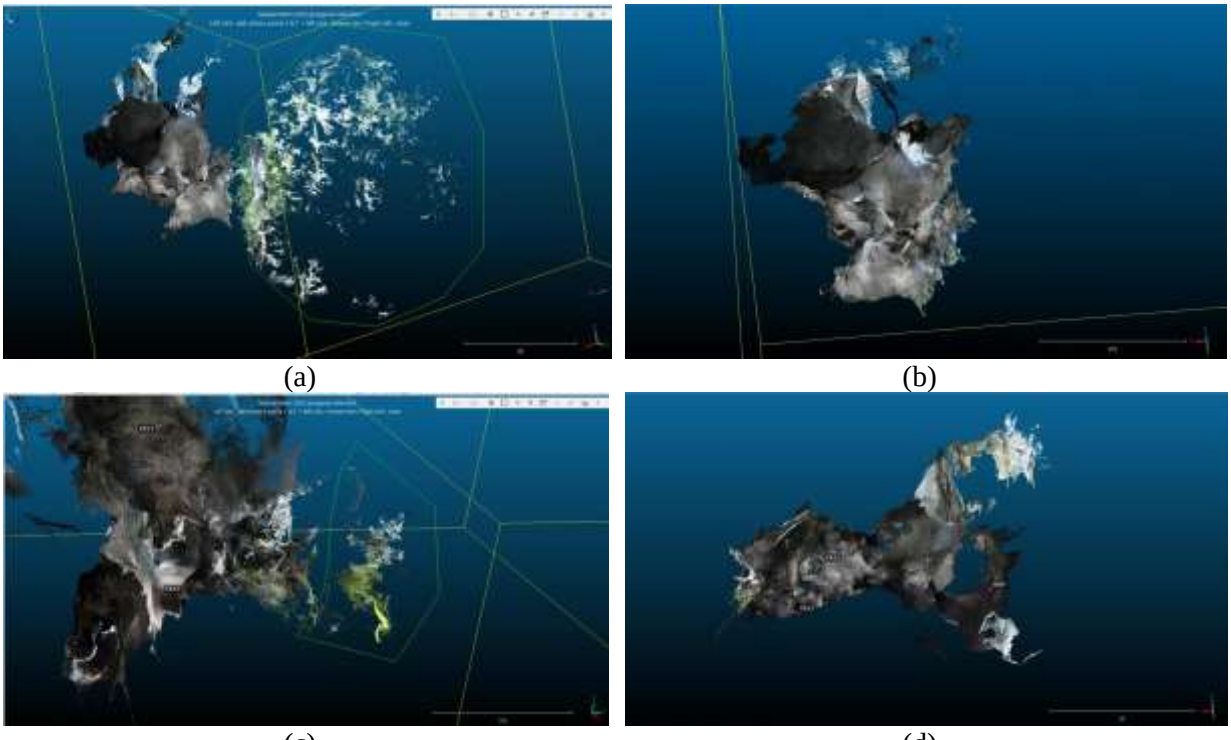


Gambar 6. Metode Registrasi *Cloud to Cloud*

Pada penelitian ini, proses registrasi dilakukan dengan mempertahankan pertampalan sebesar 30–40% antar-*scan* sebagai area yang digunakan dalam proses pencocokan dan penyelarasan data [25]. Besarnya pertampalan tersebut memungkinkan informasi geometrik yang sama pada kedua *point cloud* dapat dikenali sehingga posisi relatif antar-*scan* dapat dioptimalkan. Hasil proses registrasi berupa *point cloud* Lantai 1 dan Lantai 2 yang telah terintegrasi menjadi satu kesatuan model tiga dimensi Gua Barong, yang selanjutnya digunakan pada tahapan georeferensi dan analisis data.

C. Cleaning

Data *point cloud* yang diperoleh dari proses pemindaian SLAM-LiDAR masih dapat mengandung *noise*, *outlier*, dan objek yang tidak termasuk dalam area penelitian. Kemunculan titik-titik tersebut dapat disebabkan oleh pantulan sinyal LiDAR terhadap permukaan dengan karakteristik reflektivitas tertentu serta perekaman objek di sekitar area pemindaian [26]. Oleh karena itu, dilakukan tahapan *cleaning* dan *filtering* untuk meningkatkan kualitas dan relevansi data sebelum digunakan pada proses pengolahan selanjutnya. Proses *cleaning* dilakukan dengan menghapus bagian *point cloud* yang berada di luar objek penelitian atau tidak merepresentasikan kondisi interior Gua Barong, seperti vegetasi, manusia, area di luar mulut gua, serta bagian Gua Pawon yang ikut terekam selama proses akuisisi seperti pada **Gambar 7**. Sementara itu, *filtering* dilakukan untuk mengurangi titik-titik yang bersifat *noise* dan *outlier* sehingga diperoleh representasi permukaan gua yang lebih bersih dan sesuai dengan kondisi sebenarnya [27].



Gambar 7. Visualisasi Lantai 1 dan Lantai 2 sebelum serta setelah proses *cleaning*: (a) Lantai 1 sebelum; (b) Lantai 1 setelah; (c) Lantai 2 sebelum; (d) Lantai 2 setelah

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan penelitian ini mencakup hasil pemodelan tiga dimensi Gua Barong menggunakan teknologi SLAM-LiDAR dan evaluasi visual data dari hasil pemindaian. Hasil pemodelan tiga dimensi terlebih dahulu dievaluasi melalui proses registrasi, georeferensi, dan evaluasi visual untuk memastikan kualitas data yang digunakan dalam analisis.

3.1 Hasil Pengukuran Titik Ikat Menggunakan Total Station

Pengukuran titik ikat menggunakan Total Station menghasilkan koordinat tiga dimensi (X, Y, Z) yang terdiri atas titik referensi, titik berdiri alat, dan target *checkerboard*. Titik BM1 digunakan sebagai titik acuan awal pengukuran, sedangkan titik GCP1 berfungsi sebagai titik kontrol yang menghubungkan hasil pengukuran detail dengan sistem koordinat pengamatan. Selanjutnya, pengukuran dilakukan melalui dua titik berdiri alat yang ditempatkan secara bertahap mengikuti konfigurasi lorong Gua Barong untuk memastikan keterlihatan antar titik pengamatan tetap terjaga.

Penyebaran *checkerboard* dilakukan pada beberapa lokasi yang mewakili area lantai 1 dan lantai 2 Gua Barong sehingga dapat diamati baik oleh Total Station maupun sensor SLAM-LiDAR. Distribusi target yang tersebar pada berbagai sudut dan posisi lorong bertujuan untuk meningkatkan kestabilan proses registrasi serta meminimalkan potensi distorsi spasial pada model tiga dimensi yang dihasilkan. Berdasarkan **Tabel 2** yang merupakan koordinat *checkerboard* hasil penembakkan Total Station, elevasi titik pengamatan berada pada rentang 582,957 m hingga 589,887 m. Variasi elevasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan topografi yang cukup signifikan di dalam sistem lorong Gua Barong. Kondisi ini menjadi salah satu pertimbangan dalam penempatan titik berdiri alat dan *checkerboard* agar seluruh area pengamatan dapat terjangkau secara optimal selama proses akuisisi data.

Tabel 2. Koordinat *Checkerboard* Hasil Pengukuran Total Station

No.	ID	Northing (m)	Easting (m)	Z (*Elevation*) (m)	Keterangan
1.	BM1	9245088.27	769275.752	570.563	Berdiri Target
2.	GCP1	9245084.643	769281.539	570.4	Berdiri Alat
3.	TB1	9245070.208	769331.841	566.316	Berdiri Alat
4.	TB2	9245053.179	769329.429	583.049	Berdiri Alat
5.	TB3	9245050.654	769331.720	584.614	Berdiri Alat
6.	CK06	9245052.135	769333.995	583.381	*Checkerboard*
7.	CK07	9245048.237	769330.086	586.648	*Checkerboard*
8.	CK08	9245048.753	769333.981	585.303	*Checkerboard*
9.	CK09	9245050.691	769339.641	588.221	Berdiri Alat
10.	CK11	9245050.027	769335.387	587.548	*Checkerboard*
11.	CK12	9245049.148	769343.654	586.397	*Checkerboard*
12.	CK13	9245055.596	769333.441	582.957	*Checkerboard*
13.	CK21	9245048.739	769341.598	589.887	*Checkerboard*
14.	CK27	9245050.654	769331.720	584.614	Berdiri Alat
15.	CK28	9245055.596	769333.441	582.957	*Checkerboard*

3.2 Hasil Registrasi dan Georeferensi *Point Cloud*

Persebaran titik ikat (*checkerboard)* pada setiap lantai dirancang dengan mempertimbangkan jumlah dan keterlihatan titik selama proses pengukuran. Proses registrasi dan transformasi koordinat 3D pada tiap lantai membutuhkan minimal tiga titik ikat bersesuaian yang tidak segaris (*non-collinear*). Jumlah ini secara geometris memenuhi syarat batas minimal untuk menyelesaikan tujuh parameter Transformasi Helmert 3D, yaitu tiga parameter translasi, tiga parameter rotasi, dan satu parameter skala [28].

Setiap lantai menggunakan minimal tiga titik ikat yang diperlukan sebagai pasangan titik bersesuaian dalam proses transformasi koordinat tiga dimensi, sehingga parameter translasi, rotasi, dan skala dapat ditentukan secara geometris. Selain jumlah titik, penempatannya juga mempertimbangkan *intervisibility* antar-*checkerboard* dan posisi berdiri alat, yaitu setiap target harus dapat terlihat dengan baik dari posisi pengamatan Total Station. Persebaran titik yang tidak terkonsentrasi pada satu lokasi dan memiliki cakupan spasial yang memadai membantu memberikan kontrol geometrik terhadap *point cloud*,

sehingga transformasi koordinat dapat dilakukan secara lebih stabil dan representatif terhadap keseluruhan area pemindaian.

Pada **Tabel 3** yang merupakan hasil georeferensi setiap lantai gua, menyatakan bahwa, lantai 1 diproses georeferensi dilakukan menggunakan tiga titik *checkerboard*, yaitu CK06, CK07, dan CK08. Hasil transformasi menghasilkan nilai Final RMS sebesar 0,0407 m atau sekitar 4,07 cm. Sementara itu, georeferensi pada lantai 2 dilakukan menggunakan titik *checkerboard* CK07, CK12, dan CK21. Hasil transformasi menunjukkan nilai Final RMS sebesar 0,0257 m atau sekitar 2,57 cm, yang lebih kecil dibandingkan lantai 1. Nilai tersebut mengindikasikan tingkat kesesuaian yang baik antara koordinat *checkerboard* hasil pengukuran Total Station dengan posisi target pada *point cloud* SLAM-LiDAR.

Tabel 3. Residual Titik *Checkerboard* Hasil Georeferensi Lantai 1 dan Lantai 2

Lantai 1				
Checkerboard	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	*Error* (m)
CK07	0.0345	-0.0376	0.0119	0.0534
CK08	-0.0328	0.0053	0.0360	0.0482
CK06	-0.0017	0.0329	-0.0156	0.0365
Final RMS				0.0407
Lantai 2				
Checkerboard	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	*Error* (m)
CK07	0.0218	-0.0343	0.0186	0.0439
CK12	-0.0177	0.0009	-0.0276	0.0327
CK21	-0.0218	0.0335	0.0186	0.0448
Final RMS				0.0257

3.3 Hasil *Point Cloud* SLAM-LiDAR

Rekonstruksi model tiga dimensi dilakukan untuk memperoleh representasi spasial Gua Barong yang dapat menggambarkan kondisi geometris dan karakteristik permukaan gua secara lebih komprehensif. Data *point cloud* hasil pemindaian SLAM-LiDAR menjadi dasar dalam pembentukan model tiga dimensi, karena mampu merepresentasikan permukaan gua dalam bentuk kumpulan titik dengan informasi spasial yang detail. Pada Lantai 1, *point cloud* berjumlah 62.707.597 titik dengan durasi akuisisi 18 hingga 23 menit, sedangkan pada Lantai 2 berjumlah 47.794.782 titik dengan durasi 15 hingga 20 menit yang dapat merepresentasikan bentuk morfologi Gua Barong.

Visualisasi *point cloud* hasil akuisisi SLAM-LiDAR ditunjukkan pada **Gambar 8** untuk melihat kemampuan data dalam merepresentasikan kondisi tiga dimensi interior Gua Barong. Visualisasi dilakukan pada beberapa sudut pandang untuk mengamati cakupan ruang, kontinuitas distribusi titik, serta keterbacaan detail permukaan. Pada **Gambar 8(a)** dan **8(b)**, *point cloud* Lantai 1 memperlihatkan bentuk ruang dan konfigurasi lorong gua secara menyeluruh, termasuk mulut gua utama, permukaan lantai, dinding, dan bagian atap gua. Representasi tersebut menunjukkan bahwa proses akuisisi mampu mencakup ruang gua dengan geometri yang tidak beraturan. Sementara itu, **Gambar 8(c)** memperlihatkan tampilan dengan cakupan yang lebih dekat terhadap permukaan dinding, sehingga detail permukaan seperti tekstur batuan dan tulisan vandalisme pada dinding masih dapat dikenali. Hal tersebut menunjukkan bahwa distribusi titik yang dihasilkan tidak hanya merepresentasikan bentuk ruang secara makro, tetapi juga mampu merekam fitur permukaan pada skala yang lebih detail.

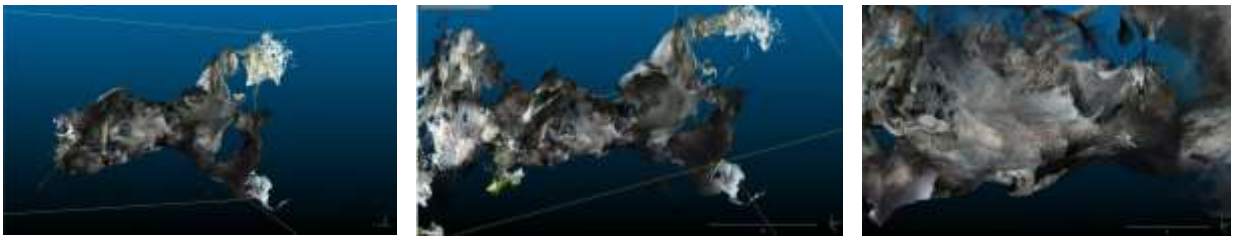


(a) (b) (c)

Gambar 8. Visualisasi *Point Cloud* Lantai 1 Gua Barong

Pada **Gambar 9(a)** *point cloud* Lantai 2 memperlihatkan representasi ruang dengan konfigurasi lorong yang lebih sempit dan kompleks. Distribusi titik tetap mengikuti bentuk utama dinding dan permukaan gua, meskipun pada beberapa bagian terlihat adanya area dengan kepadatan titik yang berbeda (**Gambar 9(b)**). Selain itu, walaupun lantai 2 jauh lebih gelap, cahaya tambahan yang digunakan berguna

untuk visual SLAM dalam merepresentasikan vandalism tulisan china yang terdapat di lantai 2 (**Gambar 9(c)**). Vandalisme tulisan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya dan merupakan nama dari salah satu klub bola dunia dari Negara China pada Tahun 1950 [4]. Variasi tersebut dapat berkaitan dengan kondisi geometris ruang, jarak sensor terhadap permukaan, serta keterbatasan visibilitas pada bagian gua yang sempit.



(a) (b) (c)

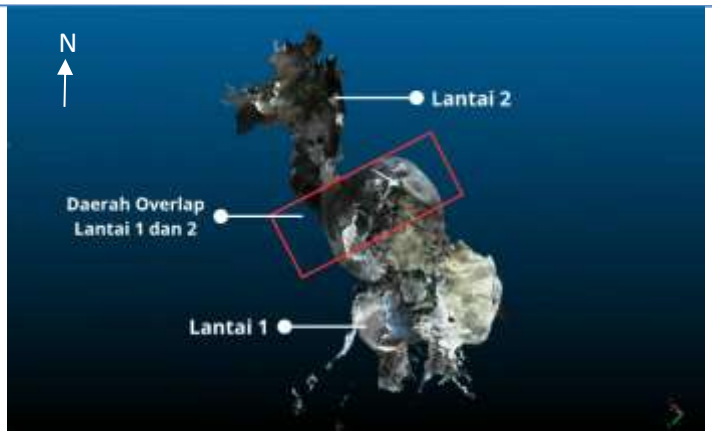
Gambar 9. Visualisasi *Point CLoud* Lantai 2 Gua Barong

Hasil visualisasi menunjukkan bahwa distribusi *point cloud* pada beberapa bagian Gua Barong tidak sepenuhnya seragam. Ditemukan beberapa area dengan kepadatan titik yang relatif rendah, bagian permukaan yang tidak terisi (*hole*), serta sejumlah titik yang menyimpang dari permukaan objek (*noise/outlier*). Keberadaan *hole* terutama dapat disebabkan oleh adanya *occlusion*, yaitu permukaan tertentu tidak dapat terlihat langsung oleh sensor karena terhalang oleh dinding, tonjolan batuan, atau bentuk lorong yang tidak beraturan. Selain itu, orientasi permukaan terhadap sensor juga memengaruhi penerimaan kembali sinyal LiDAR, sehingga permukaan yang berada pada sudut tertentu atau sulit dijangkau dari posisi sensor dapat memiliki jumlah titik yang lebih sedikit. Kepadatan titik yang lebih rendah juga terlihat pada beberapa bagian atap gua yang memiliki jarak relatif jauh dari sensor. Kondisi ini berkaitan dengan karakteristik jangkauan sensor LiDAR pada SLAM-LiDAR V700S, yang memiliki jangkauan maksimum sekitar 80 m pada reflektivitas 80% dan menurun hingga sekitar 40 m pada reflektivitas 10%. Dengan demikian, kemampuan sensor dalam memperoleh titik tidak hanya dipengaruhi oleh jarak, tetapi juga oleh kemampuan permukaan dalam menghasilkan pantulan kembali (*return*) sinyal laser. Pada permukaan yang memiliki reflektivitas rendah, sinyal yang diterima sensor dapat menjadi lebih lemah sehingga peluang terbentuknya titik menjadi lebih rendah, terutama ketika permukaan tersebut juga berada pada jarak yang jauh dari sensor. Selain itu, kondisi permukaan batuan yang kasar, sudut pantulan yang kurang optimal, serta keberadaan objek bergerak seperti manusia dan vegetasi dapat menimbulkan *noise* dan *hole* pada *point cloud*.

Jika dilihat dari penelitian Kartini dkk [4] menggunakan TLS menghasilkan sekitar 129 juta titik, sedangkan penelitian ini menggunakan SLAM-LiDAR menghasilkan 110.5 juta titik yang mana jumlah titik SLAM-LiDAR sekitar 18,5 juta titik lebih sedikit, atau sekitar 14,3% lebih rendah dibandingkan TLS. Selain itu, jumlah point cloud yang dihasilkan SLAM-LiDAR V700S pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan Kaarta Stencil-2 pada Gua Bossea yang menghasilkan sekitar 258 juta titik [19] atau berbeda 57,17% dari SLAM-LiDAR. Namun, perbedaan jumlah *point cloud* tidak dapat dijadikan indikator tunggal untuk menentukan kualitas maupun akurasi *point cloud*, karena dipengaruhi oleh spesifikasi sensor, laju akuisisi titik, durasi dan cakupan pemindaian, *trajectory*, jarak sensor terhadap objek, serta karakteristik lingkungan gua. Oleh karena itu, evaluasi kinerja SLAM-LiDAR V700S dalam penelitian ini tidak hanya didasarkan pada jumlah titik, tetapi juga pada kemampuan *point cloud* dalam merepresentasikan geometri gua serta hasil pengujian ketelitian.

3.4 Hasil Rekonstruksi Model 3D

Pada tahap rekonstruksi model 3D, *point cloud* Lantai 1 dan Lantai 2 terlebih dahulu digabungkan karena kedua dataset telah berada pada sistem koordinat global yang sama. Dengan kondisi tersebut, kedua *point cloud* secara umum sudah memiliki posisi relatif yang sesuai sehingga dapat saling bertampalan (*overlap*) secara otomatis (**Gambar 10**). Meskipun demikian, tingkat *overlap* awal yang diperoleh berada pada kisaran 30–40% [25], di mana daerah *overlap* menggunakan daerah transisi dari Lantai 1 dan Lantai 2 sehingga masih diperlukan proses penyelarasan lebih lanjut untuk memastikan kesesuaian posisi dan geometri kedua *point cloud*. Proses ini dilakukan menggunakan metode *Iterative Closest Point* (ICP) pada CloudCompare.



Gambar 10. Lantai 1 dan 2 Gua Barong

Pada proses ICP, Lantai 2 digunakan sebagai data referensi karena memiliki cakupan dan keterjangkauan *point cloud* yang lebih luas dibandingkan Lantai 1, yang mana posisi scanning di lantai 2 dapat mencakup daerah lantai 1 dengan luas, sedangkan posisi *scanning* di lantai 1 tidak terlalu menjangkau objek pada lantai 2, sehingga dapat menyediakan lebih banyak informasi geometrik sebagai acuan penyelarasan. Tingkat *overlap* kemudian diatur menjadi 80% untuk memberikan area yang lebih besar bagi ICP dalam mencari pasangan titik yang bersesuaian, sehingga proses registrasi dapat berlangsung lebih stabil dan mengurangi kemungkinan penyelarasan yang dipengaruhi oleh area yang terlalu sedikit atau *noise*. Hasil penyelarasan menghasilkan Final RMS sebesar 0,0532 m atau sekitar 5,32 cm, yang menunjukkan bahwa kedua *point cloud* telah memiliki kesesuaian posisi yang cukup baik setelah proses registrasi.

Setelah dilakukan ICP, terdapat tahapan *Normal Compute* di mana tahapan ini adalah syarat utama sebelum menjalankan algoritma *mesh* seperti *poisson surface reconstruction*. *Normal Compute* merupakan proses untuk menentukan arah normal permukaan pada setiap titik *point cloud* [29]. CloudCompare menyediakan beberapa pendekatan untuk menghitung normal, di antaranya Plane, Triangulation, dan Quadric. Pada penelitian ini digunakan metode Quadric karena objek yang direkonstruksi berupa Gua Barong yang memiliki geometri tidak beraturan, permukaan batuan yang kasar, serta banyak bagian yang melengkung, sehingga pendekatan kuadratik lebih sesuai untuk merepresentasikan orientasi permukaan lokal sebelum dilakukan rekonstruksi model 3D. Perhitungan normal menggunakan Octree radius 0,2 m dengan *Minimum Spanning Tree* (MST) KNN = 6, di mana radius digunakan sebagai ukuran lingkungan titik yang dipertimbangkan dalam perhitungan normal, sedangkan KNN = 6 digunakan untuk menentukan enam titik tetangga dalam membangun keterhubungan lokal antar titik.

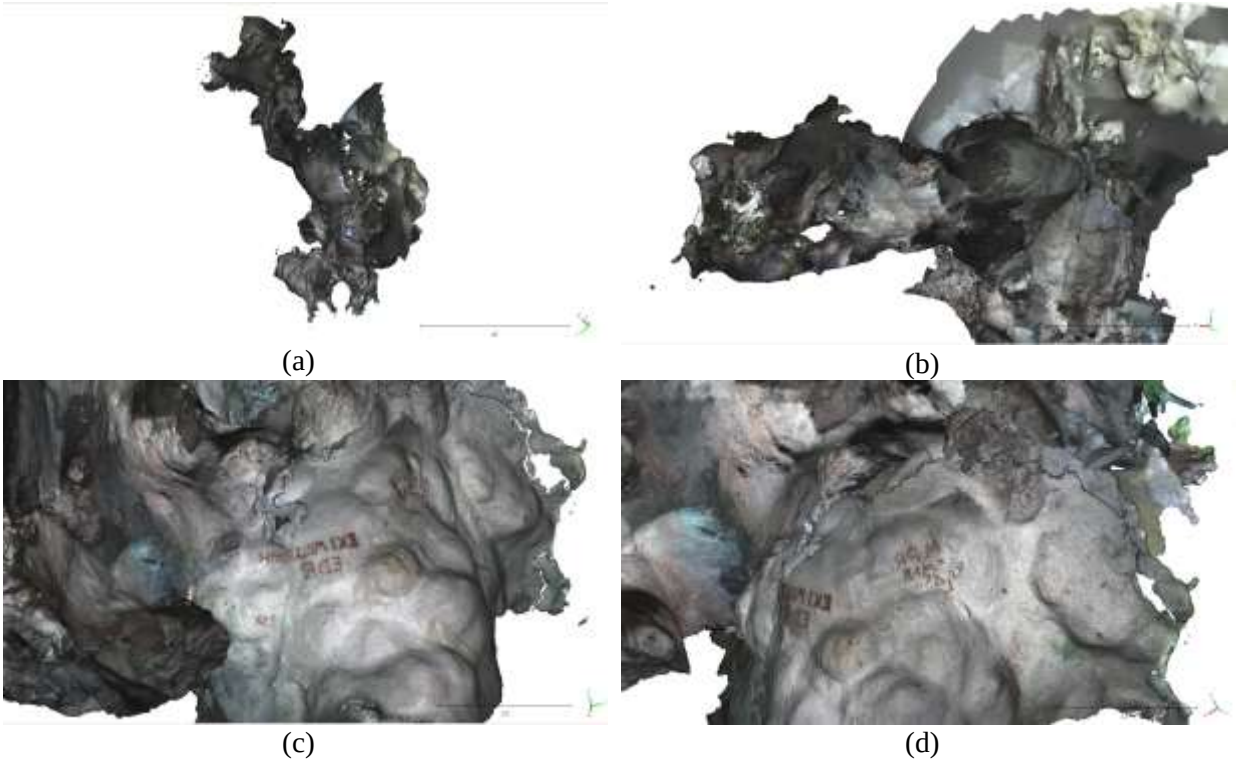
Setelah normal permukaan diperoleh, dilakukan rekonstruksi 3D menggunakan Poisson Surface Reconstruction untuk membentuk *mesh* kontinu dari *point cloud*. Metode ini dipilih karena mampu merekonstruksi permukaan gua yang kompleks dan tidak beraturan, dengan Octree Depth = 12 sebagai kompromi antara detail geometrik dan efisiensi komputasi. Hasil awal masih menunjukkan permukaan bergelombang atau *bumpy surface* akibat distribusi titik yang tidak merata, *noise*, dan *hole* (**Gambar 11(a)**). Untuk mengatasinya, dilakukan Laplacian Smoothing sebanyak 3 iterasi dengan *smoothing factor* 0,1, yang menghaluskan permukaan berdasarkan posisi *vertex* di sekitarnya. Hasilnya, permukaan *mesh* menjadi lebih halus dan kontinu sekaligus tetap mempertahankan bentuk serta detail utama Gua Barong (**Gambar 11(b)**).



(a) (b)

Gambar 11. (a) Hasil Poisson Surface Reconstruction; (b) Hasil Smooth (Liplace)

Pada **Gambar 12(a) dan 12(b)** terlihat hasil rekonstruksi secara keseluruhan dari sudut pandang yang berbeda. Model 3D mampu merepresentasikan konfigurasi utama lorong Gua Barong, termasuk bentuk memanjang, percabangan, serta perubahan bentuk pada dinding dan atap gua. Permukaan hasil rekonstruksi juga sudah relatif kontinu setelah proses *Laplacian smoothing*, sehingga bentuk umum gua dapat divisualisasikan dengan lebih jelas dibandingkan *point cloud* yang masih berupa kumpulan titik. Sementara itu, **Gambar 12(c) dan 12(d)** menunjukkan detail permukaan gua dengan lebih dekat. Terlihat bahwa model mampu mempertahankan karakteristik permukaan batuan berupa lekukan, tonjolan, dan relief permukaan, serta keberadaan objek antropogenik berupa tulisan atau vandalisme berwarna merah pada dinding gua. Tulisan tersebut masih dapat terlihat pada permukaan hasil rekonstruksi dan mengikuti bentuk geometrik dinding, seperti tulisan "EKY MULKYASIH EDR" dan "MPR" yang menunjukkan bahwa model mampu mempertahankan detail permukaan sekaligus informasi visual yang terdapat pada objek. Hasil penelitian ini juga menunjukkan adanya indikasi vandalisme di Gua Barong yang sejalan dengan temuan Kartini dkk [4]. Meskipun demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi keberadaan vandalisme tersebut, tetapi juga memberikan gambaran kondisi dan persebarannya melalui hasil rekonstruksi 3D. Namun, pada beberapa bagian masih terlihat permukaan yang tidak sepenuhnya halus, batas model yang tidak beraturan, serta bagian yang tampak terputus atau berlubang. Kondisi tersebut berkaitan dengan keterbatasan *point cloud* awal, terutama pada area dengan kepadatan titik rendah, *noise*, *occlusion*, dan permukaan yang sulit dijangkau sensor. Dengan demikian, hasil rekonstruksi 3D dapat dinilai berhasil merepresentasikan geometri utama Gua Barong, tetapi tidak seluruh detail permukaan dapat direkonstruksi secara sempurna. Hal ini juga menunjukkan bahwa kualitas model 3D sangat bergantung pada kualitas dan distribusi *point cloud* yang menjadi data masukan.



(a) (b)

(c) (d)

4. Kesimpulan

Teknologi SLAM-LiDAR berhasil dimanfaatkan untuk merekonstruksi model tiga dimensi (3D) interior Gua Barong secara efisien pada lingkungan bawah permukaan tanpa sinyal GNSS. Akuisisi data menghasilkan total *point cloud* sebanyak 110.502.379 titik yang mencakup area Lantai 1 dan Lantai 2. Pembentukan model mesh 3D melalui metode Poisson Surface Reconstruction dan Laplacian Smoothing terbukti mampu merepresentasikan bentuk lorong, geometri ruang, serta tekstur relief permukaan gua secara kontinu. Evaluasi kualitas geometrik menunjukkan bahwa integrasi pemindaian SLAM-LiDAR dengan titik ikat *checkerboard* hasil pengukuran Total Station memiliki tingkat ketelitian yang memadai. Proses georeferensi menghasilkan nilai Final RMS *Error* sebesar 0,0407 m (4,07 cm) pada Lantai 1 dan 0,0257 m (2,57 cm) pada Lantai 2, sedangkan registrasi *cloud-to-cloud* gabungan antar-segmen lantai

menggunakan algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) menghasilkan Final RMS Error sebesar 0,0532 m (5,32 cm). Meskipun demikian, kepadatan titik yang tidak seragam serta kemunculan celah (*hole*) pada area occlusion atau area ber-reflektivitas rendah menunjukkan bahwa ketelitian dan kelengkapan model 3D masih dipengaruhi oleh jarak sensor, orientasi objek, dan kondisi fisik lorong gua. Pencapaian ketelitian geometrik dan tingkat detail model 3D tersebut mengindikasikan bahwa hasil rekonstruksi SLAM-LiDAR memenuhi syarat sebagai basis data spasial tergeoreferensi untuk dokumentasi digital Gua Barong. Ketersediaan model spasial ini memberikan implikasi penting dalam mendukung upaya konservasi cagar budaya dan pemantauan kawasan Karst Citatah secara non-destruktif, khususnya dalam mengidentifikasi serta memetakan persebaran kerusakan fisik maupun aksi vandalisme di dinding gua.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi penggunaan kamera digital (DSLR/*Mirrorless*) maupun kamera *smartphone* berbasis teknik *Close-Range Photogrammetry* (SFM-*Structure from Motion*) sebagai metode alternatif dalam merekonstruksi model 3D interior gua. Penggunaan perangkat ini dapat menjadi opsi pemetaan yang lebih hemat biaya (*cost-effective*), mudah dioperasikan di ruang sempit, serta mampu menghasilkan visualisasi tekstur (*photorealistic texture*) yang lebih detail pada dinding gua dibandingkan data point cloud radiometrik standar.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Survei dan Pemetaan, Program Studi Teknik Geodesi ITENAS Bandung, atas dukungan fasilitas dan peralatan survei lapangan, khususnya Total Station, yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada Laboratorium Fotogrametri dan Penginderaan Jauh, Program Studi Teknik Geodesi ITENAS Bandung, atas fasilitas SLAM-LiDAR serta sarana pengolahan data yang mendukung pelaksanaan penelitian. Penulis juga menyampaikan penghargaan kepada M. Abdul Basyid dan Sumarno atas arahan, kritik, saran, dan masukan konstruktif selama proses penelitian hingga penyusunan artikel. Terakhir, penulis mengapresiasi seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam kegiatan akuisisi data lapangan, pengolahan data, analisis, serta penyusunan artikel ini sehingga penelitian dapat terlaksana dan diselesaikan dengan baik.

6. Singkatan

3D	3 Dimensi
EDM	*Electronic Distance Measurement.*
LiDAR	*Light Detection and Ranging*
ToF	*Time of Flight*
ALS	*Airbone Laser Scanning*
MLS	*Mobile Laser Scanning*
TLS	*Terrestrial Laser Scanning*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
IMU	*Inertial Measurement Unit*
SLAM	*Simulteneous Localization and Mapping*
GCP	*Ground Control Point*
RTS	*Robotic Total Station*
FoV	*Field of View*
ICP	*Iterative Closest Point*
CK	*Checkerboard*
MST	*Minimum Spanning Tree*
SFM	*Structure from Motion*
RMS	*Root Mean Square*
RMSE	*Root Mean Square Error*

7. Referensi

[1] Mattes, J. Underground fieldwork–A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century. Int. J. Speleol. 2015, 44, 5. .
[2] Brahmantyo, B., 2012. Temuan Baru Alat Batu di Daerah Gua Pawon; Adakah Lingkungan Lantai Kehidupan Manusia Gua di Sebelah Barat Bandung? In Geologi Cekungan Bandung (pp. 124–129).
[3] Yondri, L., 2019. Manusia dan Budaya Prasejarah di Gunung Pawon. Balai Arkeologi Jawa Barat.
[4] 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, 48, 821-826.

[5] DeWaele, J.; Fabbri, S.; Santagata, T.; Chiarini, V.; Columbu, A.; Pisani, L. Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy). Geomorphology 2018, 319, 47–61.

[6] Jouves, J.; Viseur, S.; Arfib, B.; Baudement, C.; Camus, H.; Collon, P.; Guglielmi, Y. Speleogenesis, geometry, and topology of caves: A quantitative study of 3D karst conduits. Geomorphology 2017, 298, 86–106.

[7] Büyüksalih, G.; Kan, T.; Özkan, G.E.; Meriç, M.; Isın, L.; Kersten, T.P. Preserving the knowledge of the past through virtual visits: From 3D laser scanning to virtual reality visualisation at the Istanbul Çatalca ˙ Inceˇgiz Caves. PFG J. Photogramm. Remote Sens. Geoinf. Sci. 2020, 88, 133–146.

[8] Kang, Z.; Yang, J.; Yang, Z.; Cheng, S. A review of techniques for 3d reconstruction of indoor environments. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020, 9, 330.

[9] Tyree, L., McCoy, F., Frey, J., & Stamos, A. (2014). 3D imaging of Skoteino Cave, Crete, Greece: successes and difficulties. *Journal of field archaeology*, *39*(2), 180-192.

[10] Trimmis, K. P. (2018). Paperless mapping and cave archaeology: A review on the application of DistoX survey method in archaeological cave sites. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *18*, 399-407

[11] Arrofiqoh, E. N., Muryamto, R., Afiyanti, D., Azizah, S. C., Kresnawan, D. S., & Fabiola, A. N. (2022). Pemanfaatan UAV dengan sensor kamera dan LiDAR untuk pemetaan situs cagar budaya kawasan Candi Prambanan. Geoid, 17(2), 176-184.

[12] Vinci, G., Vanzani, F., Fontana, A., & Campana, S. (2025). LiDAR applications in archaeology: A systematic review. Archaeological Prospection, 32(1), 81 101.

[13] Rianaris, A., Siregar, N. R., Pratomo, H., Kartolo, S., Humaidi, S., & Hanto, D. (2024). Distance Measurement of Low Reflectance Objects Using Indirect Time of Flight LiDAR. Journal of Technomaterial Physics, 6(2), 105-109.

[14] Rahmawati, N. (2020). Pemodelan Model 3D Menggunakan Metode TLS (Terrestrial Laser Scanner)(Studi Kasus: Candi Plaosan Lor, Kabupaten Klaten). Jurnal Geodesi Undip.

[15] Šupinský, J., Kaňuk, J., Nováková, M., & Hochmuth, Z. (2022). LiDAR point clouds processing for large-scale cave mapping: a case study of the Majko dome in the Domica cave. *Journal of Maps*, *18*(2), 268-275.

[16] Lichti, D.D., Gordon, S.J., Stewart, M.P., 2002. Ground-Based Laser Scanners: Operation, Systems and Applications. Geomatica 21 33.

[17] Theodolita, A. J. A., Kartini, G. A. J., & Yondri, L. (2025). Pemetaan Tiga Dimensi Gua Aul Di Desa Cikupa-Ciamis, Jawa Barat Menggunakan Terrestrial Laser Scanner (TLS). *PURBAWIDYA*, *14*(2), 283-298.

[18] Lozano Bravo, H., Lo, E., Moyes, H., Rissolo, D., Montgomery, S., & Kuester, F. (2023). A Methodology for Cave Floor Basemap Synthesis from Point Cloud Data: A Case Study of Slam-Based LIDAR at Las Cuevas, Belize. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 179-186.

[19] Grasso, N., Dabove, P., & Piras, M. (2023). The use of SLAM and UAV technology in geological field for monitoring: The case study of the Bossea cave. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 73-79.

[20] Lou, L., Li, Y., Zhang, Q., & Wei, H. (2023). Slam and 3d semantic reconstruction based on the fusion of lidar and monocular vision. Sensors, 23(3), 1502.

[21] Beltramone, L., De Lucia, V., Ermini, A., Innocenti, M., Silvestri, D., Rindinella, A., ... & Salvini, R. (2024). Applying SLAM-based LiDAR and UAS technologies to evaluate the rock slope stability of the Grotta Paglicci Paleolithic site (Italy). *GeoHazards*, *5*(2), 457-484.

[22] Hess, W., Kohler, D., Rapp, H., & Andor, D. (2016, May). Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. In *2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 1271-1278). IEEE.

[23] Hutagalung, A. P., Prasetyo, Y., & Sasmito, B. (2017). Analisis Ketelitian Data Pemodelan 3 Dimensi Dengan Metode Traversedan Metode Cloud To Cloudmenggunakan Terrestrial Laser Scanner. Jurnal Geodesi Undip, 485 495.

[24] Reshetyuk , Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH).

[25] Simbolon, A. B., Yuwono, B. D., & Amarrohman, F. J. (2017). Analisis Perbandingan Ketelitian Metode Registrasi Antara Metode Kombinasi Dan Metode Traverse Dengan Menggunakan Terrestrial Laser Scanner Dalam Pemodelan Objek 3 Dimensi. Jurnal Geodesi Undip, 285-294.
[26] R. Gao, J. Park, X. Hu, S. Yang and K. Cho, "Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data," Remote Sensing, vol. 13, p. 16, 2021.
[27] G. B. . J. Aji and H. Ilmawan, "Pembuatan Model 3 Dimensi Metode Manual Pada Gedung Juang 45 Bekasi Menggunakan Integrasi Point Cloud Hasil Pengolahan Data Foto Terestris Dan Aerial Dengan Menggunakan Metode Structure From Motion (SFM) Dan Multi-View Stereo (MVS)," Ellipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika, vol. 08, 2025.
[28] DeWitt, B. A., & Wolf, P. R. (2000). *Elements of Photogrammetry (with Applications in GIS)*. McGraw-Hill Higher Education.
[29] CloudCompare. (2024). *CloudCompare* (Version 2.13.1) [Computer software]. CloudCompare Open Source Project. https://www.cloudcompare.org/

.