

Akurasi Geometrik dan Visual *Gaussian Splatting* Pura Agung Wira Loka Natha: Perbandingan Smartphone dan DSLR

ATILLA AZMAREZA BRATANATA¹, GUSTI AYU JESSY KARTINI¹

¹Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. PHH Hasan Mustopa No.23, Neglasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40124, Indonesia
Email: ayujessy@itenas.ac.id

Article History: Submitted 30 July 2026 Revised 29 August 2026 Accepted 3 September 2026

ABSTRAK

Dokumentasi digital penting untuk mendukung pelestarian dan pengelolaan bangunan berarsitektur kompleks. Penelitian ini mengevaluasi kualitas visual dan akurasi geometri model Gaussian Splatting berdasarkan citra smartphone dan Digital Single-Lens Reflex (DSLR) pada objek Relief, Beji, dan Bale di Pura Agung Wira Loka Natha. Model direkonstruksi menggunakan Postshot, kualitas visual dievaluasi melalui SuperSplat, sedangkan akurasi geometri dianalisis menggunakan CloudCompare terhadap pengukuran lapangan melalui Mean Error (ME), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Standar Deviasi (SD), dan paired sample t-test. Hasil menunjukkan smartphone menghasilkan kualitas visual lebih baik dengan tekstur lebih tajam dan detail lebih lengkap, sedangkan DSLR menghasilkan akurasi geometri lebih tinggi pada sebagian besar objek dengan kesalahan lebih kecil serta terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$). Pemilihan perangkat berasosiasi dengan performa rekonstruksi sesuai tujuan penggunaannya.

Kata kunci: rekonstruksi tiga dimensi, Gaussian Splatting, berarsitektur kompleks, akurasi geometri, kualitas visual, kamera DSLR, kamera smartphone

ABSTRACT

Digital documentation is important for supporting the preservation and management of architecturally complex buildings. This study evaluates the visual quality and geometric accuracy of Gaussian Splatting models based on smartphone and Digital Single-Lens Reflex (DSLR) images of Relief, Beji, and Bale at Pura Agung Wira Loka Natha. Models were reconstructed in Postshot, visually evaluated through SuperSplat, and geometrically assessed in CloudCompare against field measurements using Mean Error (ME), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Standard Deviation (SD), and paired sample t-test. Results show that smartphone images produced better visual quality with sharper textures and more complete details, while DSLR images provided higher geometric accuracy for most objects with lower errors and a significant difference ($p < 0.05$). Device selection is associated with reconstruction performance according to the intended application.

Keywords: 3D reconstruction, Gaussian Splatting, architecturally complex structures, geometric accuracy, visual quality, DSLR camera, smartphone camera.

1. PENDAHULUAN

Pura Agung Wira Loka Natha merupakan tempat peribadatan umat Hindu yang memiliki karakteristik arsitektur tradisional dengan bentuk geometrik yang kompleks serta kaya akan relief, ukiran, dan ornamen. Dari kawasan pura tersebut dipilih tiga objek kajian, yaitu Relief, Beji, dan Bale, karena ketiganya mewakili karakteristik geometri dan tingkat kesulitan rekonstruksi yang berbeda. Relief merupakan bidang permukaan dengan ukiran rapat dan detail berukuran kecil sehingga dapat digunakan untuk menguji kemampuan metode dalam mempertahankan detail halus. Beji merupakan bangunan berukuran sedang dengan elemen patung, pancuran, dan pilar yang bervolume dengan batas permukaan relatif tegas. Sementara itu, Bale merupakan bangunan berbentuk besar dan bersifat terbuka dengan struktur serta ornamen pada bagian dalam atap sehingga menuntut kelengkapan cakupan pemotretan pada area yang lebih luas dan sulit dijangkau. Pemilihan ketiga objek tersebut dimaksudkan agar hasil evaluasi mencakup variasi karakteristik bangunan yang terdapat pada kompleks pura dan tidak terbatas pada satu jenis geometri saja. Kompleksitas tersebut menjadikan dokumentasi digital penting bagi kegiatan inventarisasi, pelestarian, penelitian, dan edukasi bangunan cagar budaya (Agustinova, 2022). dan fotogrametri menjadi salah satu metode yang banyak digunakan karena mampu membangun model tiga dimensi sekaligus menyimpan informasi spasial untuk analisis, konservasi, dan pemantauan objek. Perkembangan metode rekonstruksi tiga dimensi kemudian melahirkan 3D *Gaussian Splatting* sebagai pendekatan yang merepresentasikan objek melalui sekumpulan distribusi *Gaussian* tiga dimensi yang dioptimasi langsung dari citra, sehingga mampu menghasilkan visualisasi fotorealistik dengan proses rendering yang lebih efisien dibandingkan fotogrametri konvensional. Meskipun demikian, kedua metode ini tidak sepenuhnya setara untuk saling disubstitusikan: fotogrametri berbasis Structure from Motion dan Multi-View Stereo telah lama tervalidasi untuk pengukuran metrik, sedangkan *Gaussian Splatting* pada awalnya dikembangkan untuk rendering visual sehingga kelayakannya sebagai representasi metrik masih perlu diuji, dan mulai banyak diterapkan pada digitalisasi objek bersejarah, bangunan berarsitektur kompleks, dan pelestarian warisan budaya (Dahaghin dkk., 2024; Dalal dkk., 2024; Sonalitha dkk., 2024). Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya menampilkan model dengan cepat tanpa mengorbankan kualitas visual, karena bentuk dan warna objek langsung disimpan pada setiap *Gaussian*, sehingga sesuai untuk dokumentasi cagar budaya yang membutuhkan tampilan realistis sekaligus data yang dapat diolah lebih lanjut untuk analisis geometrik.

Meskipun demikian, kualitas visual yang tinggi tidak menjamin akurasi geometri yang baik, sehingga evaluasi model perlu disertai pengujian ketelitian geometri agar dapat digunakan sebagai dasar analisis dan konservasi (Nocerino dkk., 2014; Qoyimah dkk., 2024). Kualitas model turut dipengaruhi oleh karakteristik dasar kamera yang berbeda: DSLR umumnya memiliki sensor lebih besar dan lensa yang dapat diganti dengan parameter optik yang dikendalikan manual, sedangkan smartphone memiliki sensor lebih kecil, lensa tetap, dan pemrosesan citra otomatis. Perbedaan ini berpotensi menghasilkan kualitas visual dan akurasi geometri yang berbeda, sementara smartphone semakin banyak digunakan karena kepraktisan dan biayanya yang lebih rendah, sehingga perbandingan performa kedua perangkat menjadi penting untuk diketahui, khususnya dalam konteks metode rekonstruksi yang relatif baru seperti *Gaussian Splatting*. Penelitian Samosir & Riyadi, (2020) menunjukkan bahwa kamera smartphone memiliki potensi sebagai alternatif DSLR dalam proses fotogrametri, meskipun karakteristik model yang dihasilkan masih perlu dievaluasi. Penelitian mengenai *Gaussian Splatting* umumnya berfokus pada peningkatan kualitas visual dan efisiensi rendering, sedangkan kajian mengenai akurasi geometri masih terbatas. Clini dkk. (2024) dan Feng (2026) menyatakan bahwa meskipun *Gaussian Splatting* mampu menghasilkan visualisasi yang realistis, evaluasi geometri tetap diperlukan sebelum model dimanfaatkan untuk dokumentasi yang bersifat metrik. Perkembangan metode 3DGS-to-PC juga memungkinkan representasi *Gaussian* dikonversi menjadi *dense point cloud* sehingga analisis geometri dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti *CloudCompare* (Stuart & Pound, 2025).

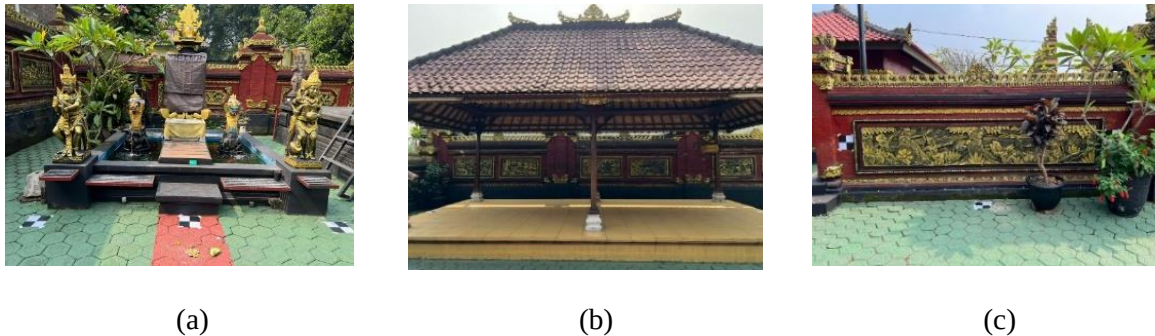
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas visual dan akurasi geometri model tiga dimensi Pura Agung Wira Loka Natha yang direkonstruksi menggunakan metode 3D *Gaussian Splatting* berdasarkan citra yang diperoleh dari kamera smartphone dan kamera DSLR (*Digital Single Lens Reflex*). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi pemilihan perangkat akuisisi citra yang optimal untuk dokumentasi digital bangunan berarsitektur kompleks,

sekaligus mendukung pengembangan penerapan 3D *Gaussian Splatting* pada bidang dokumentasi digital.

2. METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

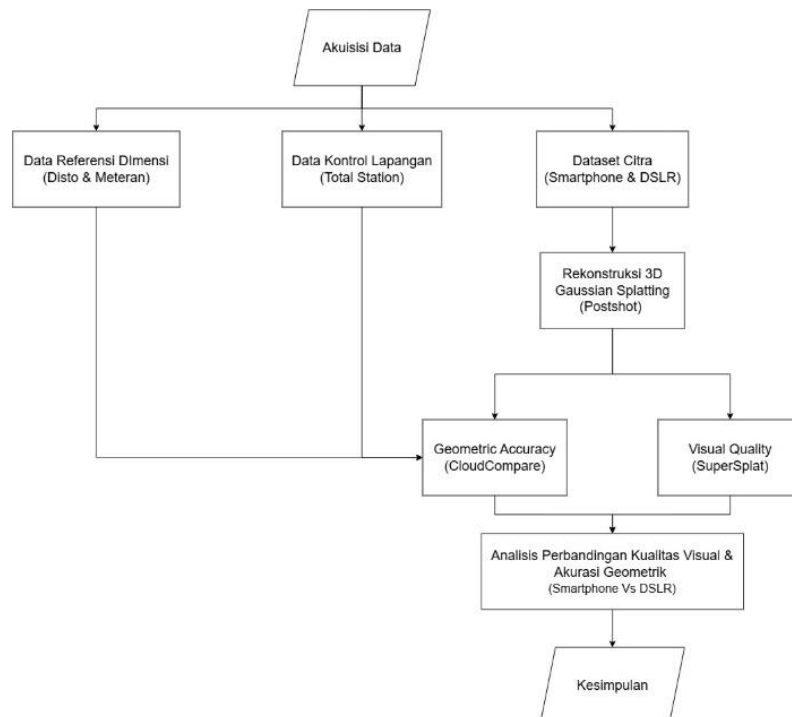
Penelitian dilaksanakan di Pura Agung Wira Loka Natha, Jl. Sriwijaya Raya, Karangmekar, Kec. Cimahi Tengah, Kota Cimahi, Jawa Barat. Objek penelitian terdiri atas Beji, Bale, dan Relief. Objek penelitian yang dijadikan studi kasus penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Pura Agung Wira Loka Natha, Jalan Sriwijaya Raya, Karangmekar, Kecamatan Cimahi Tengah, Kota Cimahi, Jawa Barat, beserta objek penelitian: (a) Beji, (b) Bale, dan (c) Relief.

2.2 Alur Penelitian

Alur penelitian ini disusun untuk menggambarkan tahapan yang dilakukan mulai dari akuisisi data, rekonstruksi model tiga dimensi menggunakan metode *Gaussian Splatting*, hingga evaluasi kualitas visual dan akurasi geometri. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir metodologi penelitian rekonstruksi 3D objek cagar budaya menggunakan *Gaussian Splatting* serta evaluasi kualitas visual dan akurasi geometri.

2.3 Akuisisi Data

Akuisisi data dilakukan pada tiga objek penelitian, yaitu Beji, Bale, dan Relief di kawasan Pura Agung Wira Loka Natha, meliputi koordinat titik kontrol menggunakan Total Station, data referensi dimensi menggunakan distometer dan meteran, serta foto objek menggunakan kamera DSLR dan kamera smartphone. Titik kontrol digunakan pada proses georeferensi, data referensi dimensi sebagai pembanding evaluasi akurasi geometri, dan data foto sebagai masukan utama proses rekonstruksi menggunakan metode 3D *Gaussian Splatting*. Pengambilan citra dilakukan menggunakan metode 360° *circular acquisition* dengan kondisi pencahayaan alami, di mana kamera diarahkan mengelilingi objek sehingga seluruh permukaan terdokumentasi dari berbagai sudut pandang dengan *overlap* antar citra yang memadai. Seluruh foto kemudian diseleksi untuk menghilangkan gambar bermasalah (*blur*, *motion blur*, *over/underexposure*) sehingga hanya citra berkualitas baik yang digunakan pada rekonstruksi. Spesifikasi perangkat akuisisi citra dan jumlah foto yang digunakan pada setiap objek disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Akuisisi Citra

Parameter	Kamera DSLR	Kamera Smartphone
Perangkat	Canon EOS 700D	Apple iPhone 13 Pro
<i>Focal Length</i>	18 mm	26 mm
<i>Aperture</i>	f/3.5	f/1.5
ISO	100	Auto
<i>Shutter Speed</i>	1/640	Auto
Mode Pengambilan	Manual	Auto
Format Citra	JPEG	JPEG
Metode Akuisisi	360° <i>Circular Acquisition</i>	360° <i>Circular Acquisition</i>

Berdasarkan Tabel 1, penelitian menggunakan dua perangkat akuisisi citra, yaitu kamera DSLR Canon EOS 700D dan kamera smartphone Apple iPhone 13 Pro. Kedua perangkat memiliki karakteristik sensor, resolusi, dan lensa yang berbeda sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh jenis kamera terhadap kualitas visual dan akurasi geometrik model tiga dimensi yang dihasilkan.

Tabel 2. Jumlah Citra Pada Setiap Objek Penelitian

Objek	Kamera DSLR	Kamera Smartphone
Relief	44 gambar	177 gambar
Beji	48 gambar	219 gambar
Bale	84 gambar	301 gambar
Total	176 gambar	697 gambar

Berdasarkan Tabel 2, jumlah citra yang digunakan berbeda pada setiap objek penelitian. Total citra yang diproses sebanyak 176 citra dari kamera DSLR dan 697 citra dari kamera smartphone. Perbedaan jumlah citra tersebut dipengaruhi oleh perbedaan panjang fokus kedua kamera (18 mm pada DSLR dan 26 mm pada smartphone) yang menghasilkan cakupan bidang pandang lebih sempit pada smartphone. Meskipun demikian, perbedaan jumlah citra bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi hasil rekonstruksi, karena kedua kamera juga memiliki perbedaan resolusi sensor dan bukaan lensa (Tabel 1) yang tetap memengaruhi kualitas citra masukan meskipun jumlah citra yang diambil disamakan. Seluruh citra tersebut digunakan sebagai masukan pada proses rekonstruksi model tiga dimensi menggunakan metode *Gaussian Splatting*.

2.4 Rekonstruksi Model 3D Menggunakan Metode *Gaussian Splatting*

Rekonstruksi model tiga dimensi dilakukan menggunakan perangkat lunak Postshot yang mengimplementasikan metode 3D *Gaussian Splatting*. Seluruh dataset citra dari kamera DSLR dan kamera smartphone diproses secara terpisah menggunakan konfigurasi yang sama sehingga perbedaan hasil rekonstruksi dipengaruhi oleh karakteristik data citra, bukan oleh perbedaan parameter pemrosesan. Hasil rekonstruksi kemudian diekspor dalam format .ply untuk proses evaluasi kualitas visual dan akurasi geometri. Parameter penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Rekontruksi Menggunakan Potshot

Parameter	Nilai
<i>Reconstruction Method</i>	<i>Gaussian Splatting (Splat3)</i>
<i>Image Selection</i>	<i>Use All Images</i>
<i>Camera Poses</i>	<i>Compute From Images</i>
<i>Limit Image Size</i>	3840 px
<i>Radiance Field Profile</i>	Splat3
<i>Maximum Splat Count</i>	3000
<i>Anti-Aliasing</i>	ON
<i>Start Training</i>	ON
<i>Stop Training After</i>	30 kSteps
<i>Output Format</i>	.ply

Berdasarkan Tabel 3, seluruh parameter rekonstruksi diterapkan secara konsisten pada setiap dataset. Pendekatan ini bertujuan untuk mencerminkan pengaruh perbedaan perangkat akuisisi citra daripada variasi konfigurasi perangkat lunak.

2.5 Evaluasi Kualitas Visual Menggunakan SuperSplat

Evaluasi kualitas visual dilakukan untuk menilai hasil rekonstruksi model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SuperSplat. Penilaian dilakukan melalui visual *inspection* dengan membandingkan model hasil rekonstruksi dari kamera DSLR dan kamera. Aspek yang diamati meliputi kelengkapan objek, ketajaman tekstur, *noise*, *artifacts*, dan distorsi geometri yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Indikator Evaluasi Kualitas Visual

Indikator	Deskripsi
<i>Completeness</i> (Qoyimah dkk., 2024; Billi dkk., 2025)	Menilai kelengkapan hasil rekonstruksi tanpa bagian objek yang hilang.
<i>Texture Sharpness</i> (Billi dkk., 2025; Wan dkk., 2026)	Menilai ketajaman tekstur dan detail permukaan objek.
<i>Noise</i> (Billi dkk., 2025; Wan dkk., 2026)	Menilai keberadaan titik atau permukaan yang tidak semestinya muncul pada model.
<i>Artifacts</i> (Clini dkk., 2024; Billi dkk., 2025)	Menilai adanya bentuk atau struktur abnormal akibat proses rekonstruksi.
<i>Geometric Distortion</i> (Qoyimah dkk., 2024; Clini dkk., 2024)	Menilai perubahan bentuk objek secara visual dibandingkan objek sebenarnya.

Penilaian terhadap kelima indikator dilakukan secara kualitatif berdasarkan hasil render model. Kategori "Baik", "Cukup", dan "Kurang" pada *completeness* dan *texture sharpness* menggambarkan proporsi bagian objek yang berhasil direkonstruksi secara utuh serta tingkat kejelasan detail permukaan yang teramati. Sementara itu, kategori "Ada" pada indikator *noise* dan *artifacts* diberikan apabila ditemukan titik, permukaan, atau bentuk yang menyimpang dari objek sebenarnya secara konsisten pada lebih dari satu sudut pandang, bukan sekadar variasi tekstur akibat pencahayaan.

2.6 Evaluasi Akurasi Geometri

Evaluasi akurasi geometri dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian dimensi model tiga dimensi terhadap kondisi objek sebenarnya. Pengukuran dilakukan dengan membandingkan dimensi hasil rekonstruksi dengan data referensi yang diperoleh melalui pengukuran lapangan menggunakan distometer dan meteran. Pengukuran pada model dilakukan menggunakan perangkat lunak *CloudCompare* setelah proses registrasi menggunakan titik kontrol hasil pengukuran *Total Station*. Nilai selisih pengukuran model dan data referensi dihitung menggunakan parameter *Mean Error* (ME), *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan Standar Deviasi (SD). Parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi dan konsistensi hasil rekonstruksi dari masing-masing perangkat akuisisi citra yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Selisih pengukuran dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$e_i = X_i - R_i \quad (1)$$

Nilai Mean Error (ME) dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$ME = \frac{\sum e_i}{n} \quad (2)$$

Nilai Mean Absolute Error (MAE) dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$MAE = \frac{\sum |e_i|}{n} \quad (3)$$

Nilai Root Mean Square Error (RMSE) dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}} \quad (4)$$

Standar deviasi dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (e_i - ME)^2}{n-1}} \quad (5)$$

Tabel 5. Notasi Perhitungan Akurasi Geometri

Notasi	Keterangan
X_i	Hasil pengukuran pada model 3D
R_i	Data referensi hasil pengukuran lapangan
e_i	Selisih pengukuran ($X_i - R_i$)
n	Jumlah sampel pengukuran

2.7 Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan akurasi geometri yang signifikan antara model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR dan kamera smartphone. Perbedaan kedua kelompok dianalisis menggunakan paired sample t-test dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

H_0 : Tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara akurasi geometri model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR dan kamera smartphone.

H_1 : Terdapat perbedaan yang signifikan antara akurasi geometri model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR dan kamera smartphone.

Keputusan pengujian didasarkan pada nilai p -value. Apabila p -value $< 0,05$, maka H_0 ditolak sehingga terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode akuisisi citra. Sebaliknya, apabila p -value $\geq 0,05$, maka H_0 diterima.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Rekonstruksi Model 3D Menggunakan Gaussian Splatting

Tahap pertama pada penelitian ini menghasilkan model tiga dimensi setiap objek penelitian menggunakan metode 3D *Gaussian Splatting* melalui perangkat lunak *Postshot*. Proses rekonstruksi dilakukan terhadap seluruh dataset citra yang diperoleh menggunakan kamera DSLR dan kamera telepon pintar (HP) dengan menerapkan parameter rekonstruksi yang sama pada seluruh dataset sebagaimana dijelaskan pada metode penelitian. Dengan demikian, setiap perbedaan model yang dihasilkan diasumsikan berasal dari karakteristik citra hasil akuisisi, bukan akibat perbedaan konfigurasi proses rekonstruksi. Ringkasan jumlah citra yang digunakan serta hasil rekonstruksi untuk masing-masing objek penelitian disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Ringkasan dataset dan hasil rekonstruksi model 3D

Objek	Kamera	Jumlah Citra	Status Rekonstruksi	Format Output
Relief	DSLR	44	Berhasil	.ply
Relief	HP	177	Berhasil	.ply
Beji	DSLR	48	Berhasil	.ply
Beji	HP	219	Berhasil	.ply
Bale	DSLR	84	Berhasil	.ply
Bale	HP	301	Berhasil	.ply

Berdasarkan Tabel 6, seluruh dataset citra berhasil direkonstruksi menjadi model tiga dimensi tanpa mengalami kegagalan proses (*failed reconstruction*), dan diekspor dalam format *.ply* untuk tahapan evaluasi kualitas visual menggunakan SuperSplat dan akurasi geometri menggunakan CloudCompare. Hasil rekonstruksi masing-masing objek menggunakan kamera DSLR dan kamera smartphone ditunjukkan pada Gambar 3. Secara umum, seluruh model berhasil merepresentasikan bentuk utama objek penelitian (Relief, Beji, dan Bale) sekaligus mempertahankan karakteristik visual berupa warna permukaan, tekstur material, dan detail ornamen pada masing-masing objek.



Gambar 3. Hasil rekonstruksi model tiga dimensi menggunakan metode *Gaussian Splatting* pada perangkat lunak Postshot. (a) Relief DSLR, (b) Relief HP, (c) Beji DSLR, (d) Beji HP, (e) Bale DSLR, dan (f) Bale HP.

Secara visual pada Gambar 3, model hasil rekonstruksi dari kedua perangkat mampu merepresentasikan objek penelitian dengan baik dan menyerupai kondisi sebenarnya. Meskipun demikian, masih terdapat perbedaan kualitas pada beberapa model, seperti ketajaman tekstur, kelengkapan permukaan objek,

keberadaan *noise*, dan artefak rekonstruksi. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh karakteristik citra yang dihasilkan masing-masing perangkat, meliputi kualitas sensor, resolusi citra, kualitas lensa, serta kemampuan kamera dalam menangkap detail permukaan objek selama proses akuisisi terlepas dari jumlah citra yang digunakan. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Dalal dkk., 2024) yang menyatakan bahwa kualitas model 3D *Gaussian Splatting* dipengaruhi oleh kualitas citra masukan dan akurasi estimasi posisi kamera. Penelitian (Clini dkk., 2024) juga menunjukkan bahwa kualitas visual model pada objek cagar budaya dipengaruhi oleh kompleksitas geometri, tekstur permukaan, dan kualitas dataset citra. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh model pada penelitian ini berhasil direkonstruksi menggunakan citra dari kamera DSLR maupun kamera *smartphone*. Namun, keberhasilan rekonstruksi belum sepenuhnya mencerminkan kualitas visual model sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut menggunakan SuperSplat untuk menilai kelengkapan objek, ketajaman tekstur, *noise*, artefak, dan distorsi geometri.

3.2 Hasil Evaluasi Kualitas Visual Model 3D Menggunakan SuperSplat

Selain dilakukan evaluasi kuantitatif menggunakan parameter akurasi geometri, kualitas model tiga dimensi juga dievaluasi secara kualitatif melalui pengamatan visual terhadap hasil rekonstruksi menggunakan perangkat lunak SuperSplat. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai kemampuan metode 3D *Gaussian Splatting* dalam merepresentasikan bentuk, tekstur, dan detail permukaan objek Pura Agung Wira Loka Natha berdasarkan citra yang diperoleh menggunakan kamera DSLR dan *smartphone*. Penilaian dilakukan menggunakan metode visual *inspection* terhadap model hasil rekonstruksi dari berbagai sudut pandang dengan memperhatikan lima indikator utama, yaitu *completeness*, *texture sharpness*, *noise*, *artifacts*, dan *geometric distortion* sebagaimana telah dijelaskan pada bagian metode penelitian. Pendekatan ini banyak digunakan pada penelitian berbasis *Gaussian Splatting* karena mampu memberikan gambaran kualitas visual model secara komprehensif sebelum dilakukan evaluasi geometrik secara kuantitatif (Billi dkk., 2025; Wan dkk., 2026). Hasil pengamatan visual terhadap seluruh model kemudian dirangkum berdasarkan lima indikator evaluasi untuk masing-masing objek dan jenis kamera sebagaimana disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan hasil evaluasi model 3D

Objek	Kamera	Kelengkapan Visual	Ketajaman Tekstur	Noise	Artifacts	Distorsi Geometrik
Relief	DSLR	Baik	Baik	Tidak ada	Ada (minor)	Tidak ada
Relief	HP	Baik	Sangat Baik	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada
Beji	DSLR	Cukup	Sedang	Ada	Ada	Tidak ada
Beji	HP	Baik	Sangat Baik	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada
Bale	DSLR	Kurang	Sedang	Ada	Ada	Tidak ada
Bale	HP	Baik	Baik	Ada	Tidak ada	Tidak ada

a. Objek Relief

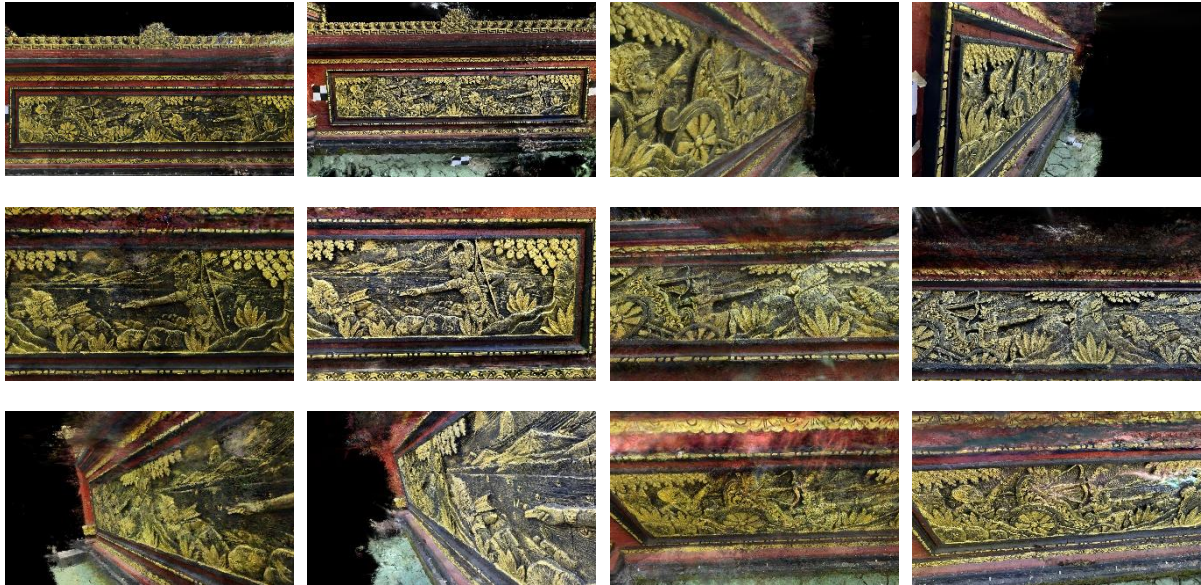
Berdasarkan pengamatan visual terhadap 17 sudut pandang, model hasil rekonstruksi kamera HP menunjukkan kualitas visual yang lebih baik dibandingkan DSLR, dengan tekstur lebih tajam, warna lebih kontras, dan detail ornamen serta lekukan relief yang lebih jelas terlihat dari berbagai arah, sedangkan model DSLR meski tetap mampu menggambarkan bentuk objek secara keseluruhan, beberapa detail permukaannya tampak lebih halus dengan ketajaman tekstur yang berkurang. Perbedaan ini diduga dipengaruhi oleh jumlah citra yang digunakan 177 citra pada kamera HP berbanding 44 citra pada DSLR sehingga cakupan sudut pandang yang lebih lengkap memungkinkan metode *Gaussian Splatting* membangun representasi permukaan secara lebih rinci. Perbandingan hasil rekonstruksi objek Relief menggunakan kamera DSLR dan kamera HP pada 17 sudut pandang ditunjukkan pada Gambar 4.

Relief DSLR

Relief HP

Relief DSLR

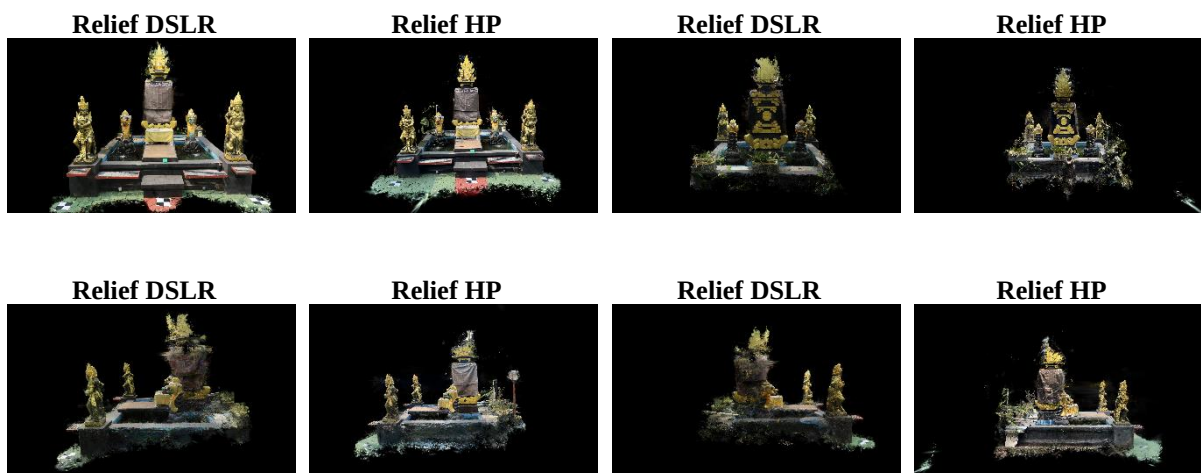
Relief HP



Gambar 4. Perbandingan hasil visual model tiga dimensi objek Relief menggunakan kamera DSLR dan kamera HP pada beberapa sudut pandang hasil rekonstruksi SuperSplat.

b. Objek Beji

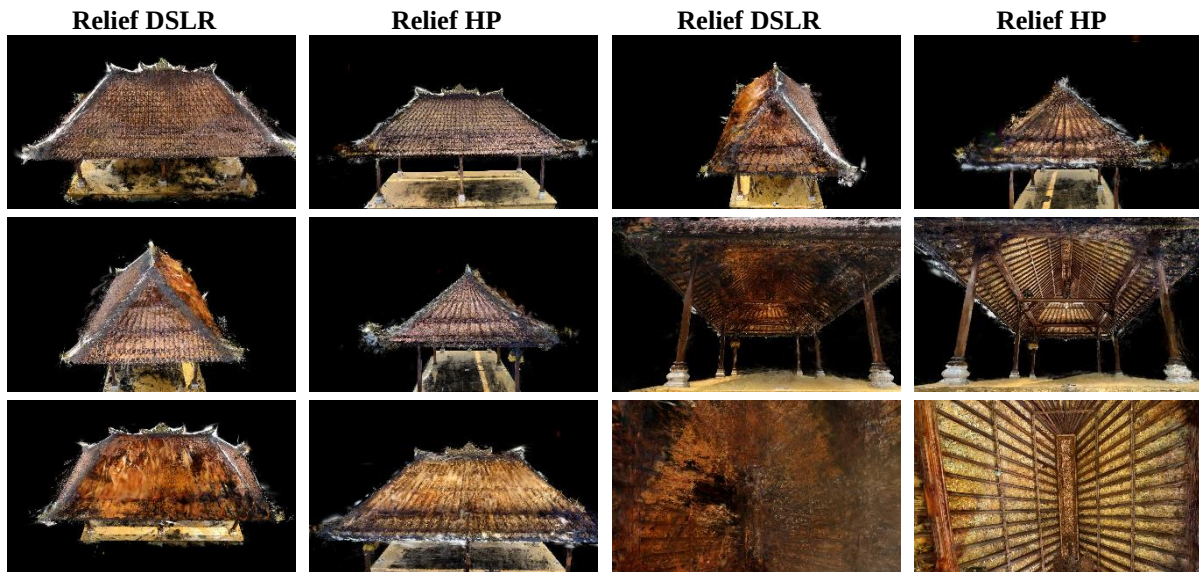
Hasil evaluasi visual pada objek Beji menunjukkan kecenderungan yang sama dengan objek Relief, di mana model kamera HP memiliki kualitas visual lebih baik dibandingkan DSLR terutama pada representasi dua patung utama, ornamen pancuran (*water spout*), dan pilar tengah bangunan, dengan bentuk objek, kontur ornamen, dan detail permukaan batu yang tampak lebih jelas, sedangkan model DSLR masih menunjukkan kehilangan detail pada pilar tengah sehingga tampilannya kurang utuh. Perbedaan ini diduga dipengaruhi oleh jumlah citra yang digunakan 219 citra pada kamera HP berbanding 48 citra pada DSLR sehingga cakupan sudut pandang yang lebih lengkap memungkinkan metode *Gaussian Splatting* merepresentasikan geometri dan detail permukaan objek dengan lebih baik. Perbandingan hasil rekonstruksi objek Beji menggunakan kamera DSLR dan kamera HP ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan hasil visual model tiga dimensi objek Beji menggunakan kamera DSLR dan kamera HP pada beberapa sudut pandang hasil rekonstruksi SuperSplat.

c. Objek Bale

Pada objek Bale, kedua model menunjukkan kualitas visual yang relatif serupa di bagian luar bangunan, dengan bentuk atap utama, enam pilar penyangga, dan geometri bangunan berhasil direpresentasikan dengan baik. Perbedaan paling menonjol terlihat pada interior atap, di mana model kamera HP mampu menampilkan ukiran kayu, balok penyangga, patung, dan ornamen bagian dalam dengan lebih jelas dan realistis, sedangkan model DSLR masih menunjukkan beberapa detail interior yang kurang jelas atau belum terbentuk secara utuh. Perbedaan ini diduga dipengaruhi oleh jumlah citra yang digunakan 301 citra pada kamera HP berbanding 84 citra pada DSLR sehingga cakupan sudut pandang yang lebih lengkap memungkinkan metode *Gaussian Splatting* merepresentasikan detail pada area dengan geometri kompleks secara lebih baik. Perbandingan hasil rekonstruksi objek Bale menggunakan kamera DSLR dan kamera HP ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan hasil visual model tiga dimensi objek Bale menggunakan kamera DSLR dan kamera HP pada beberapa sudut pandang hasil rekonstruksi *SuperSplat*.

3.3 Pembahasan Evaluasi Kualitas Visual Relief, Beji, dan Bale

Secara umum, evaluasi visual menunjukkan bahwa model hasil rekonstruksi menggunakan kamera smartphone memiliki kualitas visual yang lebih baik dibandingkan DSLR pada ketiga objek penelitian, terlihat dari tekstur yang lebih tajam, warna yang lebih jelas, serta kemampuan merepresentasikan ornamen dan detail pada area dengan geometri kompleks. Namun, hasil ini tidak sejalan dengan evaluasi akurasi geometri, di mana model kamera DSLR memperoleh nilai ME, MAE, RMSE, dan hasil paired sample t-test yang lebih baik, menunjukkan bahwa kualitas visual yang tinggi tidak selalu mencerminkan akurasi geometri yang lebih baik. Perbedaan kualitas visual ini diduga dipengaruhi oleh jumlah citra yang digunakan, di mana kamera smartphone memanfaatkan jumlah citra sekitar tiga hingga empat kali lebih banyak sehingga menghasilkan cakupan sudut pandang yang lebih luas dan representasi tekstur serta detail permukaan yang lebih optimal, khususnya pada objek dengan geometri kompleks meskipun demikian, jumlah citra yang lebih banyak belum tentu meningkatkan akurasi geometri. Oleh sebab itu, evaluasi model tiga dimensi sebaiknya mempertimbangkan aspek visual dan geometrik secara bersamaan agar performa metode rekonstruksi dapat dinilai secara lebih komprehensif (Atik, 2025; Qoyimah dkk., 2024).

3.4 Evaluasi Akurasi Geometri Model 3D

Evaluasi akurasi geometri dilakukan untuk mengetahui kesesuaian model tiga dimensi hasil rekonstruksi *Gaussian Splatting* terhadap objek sebenarnya. Evaluasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *CloudCompare* dengan membandingkan hasil pengukuran dimensi pada model tiga dimensi terhadap data referensi hasil pengukuran langsung menggunakan *laser distance meter* (Disto) dan meteran. Tahapan evaluasi meliputi proses registrasi (*alignment*), pengukuran dimensi menggunakan Point Picking Tool, perhitungan nilai error, serta analisis statistik menggunakan *Mean Error* (ME), *Mean*

Absolute Error (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Standard Deviation* (SD), serta analisis statistik menggunakan *paired t-test*.

a. Georeferensi Model

Sebelum dilakukan evaluasi akurasi geometri, seluruh model tiga dimensi hasil rekonstruksi digeoreferensi menggunakan fitur *Alignment* pada perangkat lunak *CloudCompare*. Georeferensi dilakukan dengan memanfaatkan tiga titik kontrol (*checkboard*) hasil pengukuran *Total Station* sehingga model berada pada sistem koordinat yang sama dengan kondisi lapangan. Karena georeferensi hanya menggunakan tiga titik kontrol yang jumlahnya terbatas, bagian objek yang jauh dari posisi titik kontrol berpotensi memiliki kesalahan georeferensi yang lebih besar, terutama pada objek dengan bentang yang luas seperti Bale. Keberhasilan proses georeferensi dievaluasi berdasarkan nilai *Root Mean Square* (RMS) yang menunjukkan tingkat kecocokan antara titik kontrol pada model dengan koordinat referensi. Ringkasan hasil registrasi model tiga dimensi menggunakan *CloudCompare* disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil georeferensi model tiga dimensi menggunakan CloudCompare (Adjust Scale OFF)

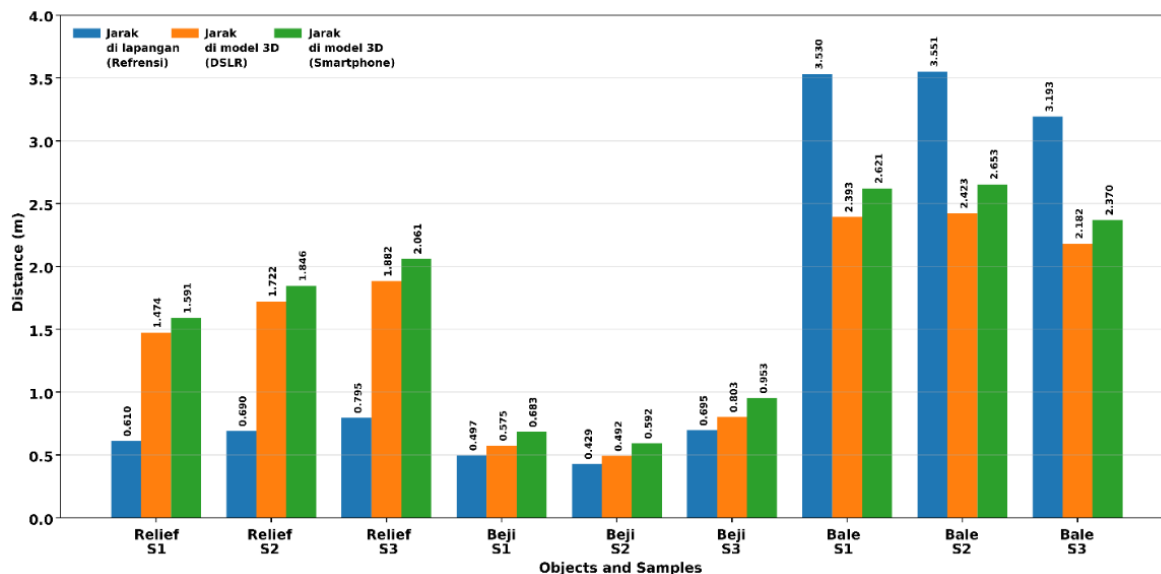
Objek	Kamera	Jumlah Checkboard	RMS (cm)	Scale
Relief	DSLR	3	2,463	1
Relief	HP	3	2,769	1
Beji	DSLR	3	0,207	1
Beji	HP	3	0,476	1
Bale	DSLR	3	1,047	1
Bale	HP	3	0,855	1

Berdasarkan Tabel 8, seluruh model tiga dimensi berhasil digeoreferensi ke sistem koordinat lapangan menggunakan tiga titik kontrol. Nilai RMS menunjukkan tingkat kecocokan antara model dan koordinat referensi, di mana nilai yang lebih kecil mengindikasikan hasil georeferensi yang lebih baik. Nilai RMS terendah diperoleh pada objek Beji menggunakan kamera DSLR (0,2069), sedangkan nilai tertinggi terdapat pada objek Relief menggunakan kamera HP (2,7694). Perbedaan nilai RMS antar objek menunjukkan bahwa kualitas georeferensi tidak hanya dipengaruhi oleh jenis kamera, tetapi juga oleh karakteristik geometri objek, distribusi titik kontrol, dan kualitas model hasil rekonstruksi, sebagaimana dikemukakan oleh (Corradetti dkk., 2022).

b. Pengukuran Dimensi

Setelah proses registrasi selesai dilakukan, pengukuran dimensi dilakukan pada tiga bagian (*sample*) untuk setiap objek penelitian, yaitu Relief, Beji, dan Bale. Nilai jarak di lapangan diperoleh dari rata-rata hasil pengukuran menggunakan distometer dan meteran yang masing-masing dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap sampel. Nilai rata-rata tersebut digunakan sebagai referensi lapangan (*ground truth*), kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran pada model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak *CloudCompare* melalui fitur *Point Picking Tool*. Hasil Pengukuran dimensi tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7, hasil pengukuran menggunakan Disto dan meteran menunjukkan konsistensi yang tinggi sehingga nilai rata-ratanya digunakan sebagai *ground truth* untuk evaluasi akurasi geometri. Perbandingan dengan hasil pengukuran pada *CloudCompare* menunjukkan bahwa seluruh model masih memiliki penyimpangan terhadap dimensi referensi. Model pada objek Relief dan Beji cenderung mengalami *overestimation*, sedangkan objek Bale menunjukkan *underestimation*. Selain itu, kamera DSLR menghasilkan dimensi yang lebih mendekati nilai referensi pada objek Relief dan Beji, sementara kamera HP memberikan hasil yang lebih baik pada objek Bale. Temuan ini menunjukkan bahwa akurasi geometri dipengaruhi tidak hanya oleh jenis kamera, tetapi juga oleh karakteristik objek dan kualitas proses rekonstruksi *Gaussian Splatting*.



Gambar 7. Diagram Hasil Pengukuran dimensi objek Relief, Beji, dan Bale

Nilai error dihitung dari selisih antara hasil pengukuran dimensi pada model tiga dimensi menggunakan *CloudCompare* terhadap nilai referensi hasil pengukuran lapangan. Berdasarkan nilai error tersebut kemudian dihitung parameter *Mean Error* (ME), *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Standard Deviation* (SD) untuk menggambarkan tingkat akurasi dan konsistensi geometri model hasil rekonstruksi. Nilai ME digunakan untuk mengetahui kecenderungan penyimpangan pengukuran (*overestimation* atau *underestimation*), sedangkan MAE dan RMSE digunakan untuk mengevaluasi besarnya kesalahan pengukuran. Parameter SD menunjukkan tingkat konsistensi atau penyebaran nilai error. Hasil perhitungan parameter akurasi geometri untuk setiap objek penelitian disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi Parameter Akurasi Geometri

Objek	Kamera	ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)	SD (m)
Relief	DSLR	0,994	0,994	0,999	0,116
Beji	DSLR	0,083	0,083	0,085	0,023
Bale	DSLR	-1,092	1,092	1,093	0,070
Relief	HP	1,134	1,134	1,140	0,143
Beji	HP	0,202	0,202	0,206	0,050
Bale	HP	-0,876	0,876	0,877	0,046

Berdasarkan Tabel 9, objek Beji menghasilkan akurasi geometri terbaik pada kedua perangkat akuisisi citra, ditunjukkan oleh nilai MAE, RMSE, dan SD yang paling kecil. Sebaliknya, objek Relief dan Bale menunjukkan penyimpangan yang lebih besar. Objek Relief memiliki nilai ME positif yang mengindikasikan *overestimation*, sedangkan objek Bale memiliki nilai ME negatif yang menunjukkan *underestimation*. Meskipun demikian, pada objek Bale kamera HP menghasilkan nilai MAE dan RMSE yang lebih rendah dibandingkan kamera DSLR sehingga memiliki akurasi geometri yang lebih baik. Secara umum, nilai standar deviasi seluruh objek tergolong rendah sehingga hasil pengukuran dapat dianggap konsisten. Temuan ini menunjukkan bahwa akurasi geometri model hasil rekonstruksi *Gaussian Splatting* tidak hanya dipengaruhi oleh perangkat akuisisi citra, tetapi juga oleh karakteristik dan kompleksitas objek. Analisis selanjutnya dilakukan menggunakan *paired sample t-test* untuk menguji perbedaan akurasi geometri antara model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR dan kamera HP.

3.5 Uji Statistik Menggunakan Paired Sample t-Test

Setelah seluruh kelompok data memenuhi asumsi normalitas berdasarkan uji *Shapiro-Wilk*, analisis perbedaan akurasi geometri antara model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR dan kamera

HP pada kondisi *Adjust Scale OFF* dilakukan menggunakan *Paired Sample t-Test*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik terhadap nilai *error* dimensi yang dihasilkan oleh kedua perangkat akuisisi citra. Statistik deskriptif pasangan data yang digunakan dalam pengujian disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Statistik deskriptif pasangan data sebelum uji t

Parameter	DSLR (Variabel 1)	HP (Variabel 2)
Mean	-0,005	0,153
Variance	0,825	0,769
Observations	9	9

Berdasarkan Tabel 10, rata-rata *error* model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR sebesar $-0,005$ m, sedangkan kamera HP sebesar $0,153$ m. Nilai rata-rata *error* kamera DSLR yang sangat mendekati nol menunjukkan bahwa hasil rekonstruksi memiliki penyimpangan dimensi yang relatif kecil terhadap dimensi referensi. Sebaliknya, kamera HP menghasilkan rata-rata *error* yang lebih besar sehingga menunjukkan kecenderungan penyimpangan dimensi yang lebih tinggi dibandingkan kamera DSLR. Selanjutnya dilakukan pengujian *Paired Sample t-Test*, hasilnya yang disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil Uji Paired Sample t-Test untuk Perbandingan Akurasi Geometrik

Parameter	Nilai
Pearson Correlation	0,999
Hypothesized Mean Difference	0
Degrees of Freedom (df)	8
t Statistic	-9,456
p-value (Two-tail)	$1,287 \times 10^{-5}$
t Critical (Two-tail)	2,306

Berdasarkan Tabel 11, nilai *t statistic* sebesar $-9,456$ dengan *p-value (two-tail)* sebesar $1,287 \times 10^{-5}$ menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara akurasi geometri model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR dan kamera HP pada kondisi *Adjust Scale OFF*. Hasil ini menunjukkan bahwa jenis perangkat akuisisi citra berpengaruh terhadap akurasi geometri model tiga dimensi. Temuan tersebut juga sejalan dengan hasil evaluasi geometri pada Tabel 9, di mana model hasil rekonstruksi menggunakan kamera DSLR umumnya memiliki nilai MAE, RMSE, dan standar deviasi yang lebih kecil sehingga menghasilkan dimensi yang lebih mendekati nilai referensi. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh kualitas citra yang dihasilkan masing-masing perangkat. Kamera DSLR dengan sensor dan sistem optik yang lebih baik mampu menghasilkan estimasi geometri yang lebih akurat, sejalan dengan temuan (Atik, 2025; Samosir & Riyadi, 2020). Meskipun demikian, kamera HP tetap menghasilkan akurasi yang cukup baik sehingga masih layak digunakan untuk dokumentasi objek tiga dimensi, terutama pada aplikasi yang mengutamakan efisiensi biaya dan kemudahan penggunaan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merekonstruksi model 3D objek Beji, Relief, dan Bale di Pura Agung Wira Loka Natha menggunakan metode 3D *Gaussian Splatting* dengan kamera DSLR dan kamera HP. Kedua perangkat mampu menghasilkan model tiga dimensi yang baik tetapi memiliki karakteristik yang berbeda. Berdasarkan evaluasi visual menggunakan *SuperSplat*, kamera HP menghasilkan kualitas visual yang lebih baik terutama dalam merepresentasikan tekstur warna dan detail pada objek yang memiliki geometri kompleks. Sebaliknya, hasil evaluasi kuantitatif menunjukkan bahwa kamera DSLR memiliki akurasi geometri yang lebih tinggi berdasarkan nilai ME, MAE, RMSE, dan SD. Hasil *paired sample t-test* juga menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kedua perangkat ($p < 0,05$). Secara keseluruhan, kamera HP lebih sesuai untuk kebutuhan visualisasi dan dokumentasi digital. Sementara itu, kamera DSLR lebih direkomendasikan untuk aplikasi yang memerlukan ketelitian geometri tinggi seperti dokumentasi bangunan peribadatan, pemodelan arsitektur, dan pengukuran spasial. Penelitian selanjutnya dapat mengkaji pengaruh jumlah citra resolusi kamera dan parameter *Gaussian Splatting* terhadap kualitas model.

DAFTAR RUJUKAN

- Agustinova, D. E. (2022). Strategi Pelestarian Benda Cagar Budaya Melalui Digitalisasi. *ISTORIA: Jurnal Pendidikan dan Sejarah*, 18(2). <https://doi.org/10.21831/istoria.v18i2.52991>
- Atik, M. E. (2025). Comparative Assessment Of Neural Radiance Fields And 3d Gaussian Splatting For Point Cloud Generation From UAV Imagery. *Sensors*, 25(10), 2995. <https://doi.org/10.3390/s25102995>
- Billi, D., Croce, V., Piemonte, A., & Caroti, G. (2025). 3D Reconstruction of Underwater Shipwrecks: 3D Gaussian Splatting and Structure from Motion for the Melania shipwreck. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 19–25. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-19-2025>
- Clini, P., Nespeca, R., Angeloni, R., & Coppetta, L. (2024). 3D representation of Architectural Heritage: a comparative analysis of NeRF, Gaussian Splatting, and SfM-MVS reconstructions using low-cost sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 93–99. <https://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-2-w8-2024-93-2024>
- Corradetti, A., Seers, T., Mercuri, M., Calligaris, C., Busetti, A., & Zini, L. (2022). Benchmarking different SfM-MVS photogrammetric and iOS LiDAR acquisition methods for the digital preservation of a short-lived excavation: a case study from an area of sinkhole related subsidence. *Remote Sensing*, 14(20), 5187. <https://doi.org/10.3390/rs14205187>
- Dahaghin, M., Castillo, M., Riahidehkordi, K., Toso, M., & Del Bue, A. (2024). Gaussian Heritage: 3d Digitization Of Cultural Heritage With Integrated Object Segmentation [Preprint]. ArXiv:2409.19039. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.19039>
- Dalal, A., Hagen, D., Robbersmyr, K. G., & Knausgård, K. M. (2024). Gaussian splatting: 3D reconstruction and novel view synthesis: A review. *IEEE Access*, 12, 96797–96820. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3408318>
- Feng, Y. (2026). Gaussian Splatting For Cultural Heritage Digitization: Technical Positioning, Application Scenarios, and Future Prospects. *Trends in Social Sciences and Humanities Research*, 4(5), 1–9. <https://doi.org/10.61784/tsshr3241>
- Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL–5, 465–472. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-465-2014>
- Qoyimah, S., Firdaus, H. S., & Aldila Syariz, M. (2024). Studi Awal Visualisasi Dan Akurasi Geometri Model 3 Dimensi Pada Textureless-Object. *Elipsoida : Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 7(2), 93–103.
- Samosir, F. S., & Riyadi, S. (2020). Comparison of smartphone and DSLR use in photogrammetry. *International Conference on Aesthetics and the Sciences of Art*. Bandung Institute of Technology.
- Sonalitha, E., Setyawati, D., & Arifuddin, R. (2024). Fotogrametri Dalam Pendokumentasian Cagar Budaya. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan (No. 1)*.
- Stuart, L. A. G., & Pound, M. P. (2025). 3dgs-to-pc: Convert A 3d Gaussian Splatting Scene Into A Dense Point Cloud Or Mesh [Preprint]. ArXiv:2501.07478. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.07478>
- Wan, Z., Diao, Y., Xu, J., Wang, H., Li, Z., Fan, X., Zuo, W., & Zhao, D. (2026). Perceptual quality assessment of 3d Gaussian splatting: A subjective dataset and prediction metric. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 40(12), 9657–9665. <https://doi.org/10.1609/aaai.v40i12.37928>