



PEMODELAN 3D CANDI BADUT MENGGUNAKAN UAV FOTOGRAMETRI

3D MODELING OF BADUT TEMPLE USING UAV PHOTOGRAMMETRY

Martince Novianti Bani¹, Anisah Nur Fajarwati², Helik Susilo³, Yehezkiel Septian Yoganata⁴
^{1,2,3,4}Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur, 65141, Indonesia

Email: anisah_nur_f@polinema.ac.id

Received: 01 Desember 2025 Revised: 18 Februari 2026 Accepted: 08 Maret 2026 Published: 08 Maret 2026

ABSTRAK

Pendokumentasian cagar budaya secara akurat merupakan langkah penting dalam upaya pelestarian dan analisis struktur bangunan bersejarah. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model tiga dimensi (3D) Candi Badut menggunakan teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dan metode Structure from Motion (SfM) serta mengevaluasi tingkat akurasi melalui perbandingan dengan pengukuran langsung di lapangan. Akuisisi data dilakukan menggunakan UAV dengan konfigurasi pemotretan oblique dan tingkat pertampalan tinggi untuk memperoleh citra yang optimal. Data citra kemudian diproses menggunakan perangkat lunak berbasis SfM untuk menghasilkan point cloud, mesh 3D, dan produk lainnya. Evaluasi akurasi dilakukan melalui analisis kesalahan geometrik dan uji statistik menggunakan uji t dua sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model 3D yang dihasilkan memiliki tingkat konsistensi tinggi, dengan nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,5629 meter. Selain itu, hasil uji t menunjukkan p-value sebesar 0,9844, yang menandakan tidak terdapat perbedaan signifikan antara pengukuran lapangan dan model 3D. Temuan ini mengonfirmasi bahwa UAV dengan teknik pengolahan data SfM mampu menyediakan representasi digital yang cukup akurat dan dapat diandalkan untuk dokumentasi, dengan harapan dapat digunakan untuk upaya konservasi cagar budaya Candi Badut. Pendekatan ini direkomendasikan sebagai teknik efektif dalam pemetaan dan pemodelan bangunan cagar budaya.

Kata kunci: Candi Badut, Model 3D, UAV

ABSTRACT

Accurate documentation of cultural heritage sites is an essential for support in conservation and structural assessment of historical building. This study presents a 3D Model of the Badut Temple using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology and the Structure from Motion (SfM) method, and to evaluate its accuracy by comparing it with the direct measurements. Data acquisition was carried out using UAV with an oblique angle configuration and high-overlap settings to ensure optimal image capture. The collected photo was then processed using SfM-based software to generate point cloud, 3D mesh model, and other photogrammetric products. Accuracy assessment was conducted through geometric error analysis and statistical testing using two-sample t-test. The results indicate that the generated 3D model demonstrates a high level of consistency, with a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.5629 meters. Furthermore, the t-test gave a p-value of 0.9844, indicating no significant difference between the field measurements and the 3D model. These findings confirm that UAV photogrammetry combined with the SfM technique can provide a sufficiently accurate and reliable digital representation for documentation purposes, with potential use in the conservation of the Badut Temple. This approach is recommended as an effective method for mapping and modeling heritage structures.

Keywords: Badut Temple, UAV, 3D Model

PENDAHULUAN

Cagar budaya merupakan warisan budaya yang memiliki nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan, dan pendidikan. Berdasarkan regulasi pemerintah Republik Indonesia dalam Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya, warisan budaya dapat bersifat kebendaan yaitu bangunan cagar budaya, salah satunya adalah candi (Pemerintah Indonesia, 2010). Salah satu bentuk perlindungan, perhatian dan pemeliharaan terhadap candi mengingat pentingnya bangunan candi untuk keperluan pemugaran sejarah, sarana pendidikan, keberlangsungan pariwisata, dan jati diri bangsa adalah melalui pendokumentasian secara komprehensif (Partama, 2025). Seiring dengan itu, perkembangan teknologi modern telah memberikan kontribusi besar dalam bidang pendokumentasian aset bersejarah, khususnya dokumentasi digital cagar budaya (Remondino dan Rizzi, 2010). Dokumentasi tersebut mencakup berbagai aspek pemetaan, pengukuran hingga pemodelan 3D (Suchocki dkk., 2023), yang kemudian hasilnya ditampilkan dalam bentuk model 3D sebagai representasi digital yang dapat menjadi landasan untuk keperluan konservasi, restorasi dan monitoring perubahan fisik jangka panjang.

Pemodelan berbasis gambar telah menjadi metode yang paling banyak digunakan untuk rekonstruksi permukaan objek, karena menawarkan biaya yang lebih murah dan portabel (Bagnolo dan Paba, 2019). Sejalan dengan meningkatnya kebutuhan dokumentasi yang efektif, penggunaan Kendaraan Udara Tanpa Awak (*Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) juga berkembang secara masif, mengukuhkan UAV sebagai wahana yang sangat efisien dan efektif dibandingkan pendekatan menggunakan sensor aktif lainnya (Marčiš dkk., 2024; Bani dkk., 2025). UAV memungkinkan akuisisi data dari berbagai sudut dan ketinggian dengan cepat, serta mencakup area luas dalam waktu singkat.

Lebih dari itu, UAV mengimplementasikan teknik fotogrametri sebagai alat penyedia data yang memiliki fleksibilitas, keandalan, dan keamanan dalam penggunaannya (Burdziakowski, 2018).

Adapun studi tentang pengimplementasian UAV berdasarkan pada teknik fotogrametri untuk dokumentasi arsitektur cagar budaya telah banyak dilakukan, diantaranya oleh Samadzadegan, dkk. (2023), yang mengkaji tentang pemodelan 3D menggunakan *multi-view image* dari UAV untuk arsitektur kawasan cagar budaya. Permasalahan utamanya yaitu kondisi kawasan konservasi yang besar dan setengah hancur, serta akses yang terhalang karena penggalian ilegal dan struktur yang sebagiannya nyaris hancur, membuat sulit untuk melakukan pemetaan lengkap dengan teknik tradisional dan terestrial. Sehingga dengan diintegrasikannya UAV dan GPS maka diperoleh akurasi Ground Control Point (GCP) hingga mencapai ± 1 cm. Selain itu, studi lainnya juga mengkaji tentang dokumentasi 3D pada kawasan cagar budaya menggunakan gabungan antara TLS dan UAV (Jo dan Hong, 2019). Hasilnya yaitu adanya rekonstruksi 3D Kuil Magoksa yang dihasilkan dari TLS yang menampilkan geometri tegak lurus dari bangunan situs dan UAV untuk representasi bidang planar di zona atas seperti atap bangunan situs. Hasilnya TLS memberikan akurasi posisi yang lebih tinggi, namun kombinasi kedua teknologi masih dalam batas yang cukup untuk penggabungan data secara konvergen. Tambahan lainnya yaitu studi tentang pengaplikasian UAV dan GNSS untuk merekonstruksi situs kuil Sardus Pater Babai menggunakan teknik pemotretan secara *oblique* dengan *orbit low altitude* (Bagnolo dan Paba, 2019). Hasilnya yaitu diperoleh model 3D, ketinggian dan penampang kuil tersebut serta ketelitian RMSE sebesar 2.92 cm.

Dari kajian-kajian di atas, maka tujuan penelitian ini yaitu untuk memberikan

informasi terkait model 3D Candi Badut dengan menerapkan metode *Structure from Motion* (SfM) untuk pengolahan datanya. Lebih dari itu penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan rujukan untuk tindakan pendokumentasian selanjutnya.

1. Teknik Pemodelan 3D

Teknik pemodelan 3 dimensi merupakan serangkaian proses untuk merepresentasikan objek secara digital dalam bentuk tiga dimensi, yang mencakup geometri, tekstur dan atribut spasial lainnya. Untuk merepresentasikan model 3D maka diperlukan *point cloud* atau titik awan. *Point cloud* merupakan sekumpulan titik yang merepresentasikan nilai koordinat 3D dan informasi tambahan lainnya yang bergantung pada metode akuisisi datanya (Xv dkk., 2022). *Point cloud* dicirikan oleh ketidakaturannya dan kerapatan yang tidak merata.

Dalam pendokumentasian cagar budaya Candi Badut ini, teknik pemodelan 3 dimensi yang berperan penting untuk tujuan konservasi, restorasi dan monitoring meliputi teknik fotogrametri untuk akuisisi data, *Structure from Motion* (SfM) untuk pemrosesan foto dan merekonstruksi 3D secara otomatis dan penggabungan antara fotogrametri dan pengukuran manual untuk proses evaluasi. Hasil model 3D ini kemudian digunakan untuk pembuatan replika digital.

2. Latar Belakang Sejarah

Candi Badut yang terletak di Kabupaten Malang, Jawa Timur merupakan salah satu peninggalan tertua abad 8 Masehi yang memiliki karakteristik arsitektur bergaya Klasik Tua. Nama Candi Badut sendiri erat kaitannya dengan Prasasti Dinoyo (628 Caka atau 780 Masehi) (Soviyani dkk., 1995). Saat ditemukan pada tahun 1921, Candi Badut menyisakan bagian kaki dengan bagian-bagian lain yang berserakan. Struktur Candi Badut dibuat dari bahan batu andesit yang memiliki porositas batu cukup tinggi,

sehingga tumbuhan organik cepat tumbuh pada bagian-bagian batu, diperparah lagi dengan keadaan cuaca di kota Malang yang cenderung lebih lembab dengan intensitas curah hujan yang tinggi.

Sejak ditemukan, Candi Badut telah dipugar sebanyak dua kali. Pemugaran I pada tahun 1923 – 1925 oleh pemerintah Belanda yang meliputi pemugaran candi hingga bagian setengah badan pemugaran ke-2 pada tahun 1990 – 1993 oleh Balai Pelestarian Cagar Budaya yaitu penyempurnaan bangunan candi dengan acuan batu-batu yang ada dan gambar kerja rekonstruksi yang telah dibuat Belanda (dengan berpedoman pada bentuk Candi Gedongsongo), dilakukan pula penggalian untuk menemukan candi-candi perwara atau pengiring dan ditemukan pondasi tiga candi pengiring.

Karakter lokasi Candi Badut, yaitu terletak di dataran tinggi Kabupaten Malang. Pola perancangan Candi Badut adalah berurutan, yaitu memiliki bentuk tatanan linier dengan bangunan utama di sebelah timur dan diikuti dengan anak-anak candi di belakangnya. Hal ini sejalan dengan pola perancangan candi yang dikategorikan oleh (Bouty dkk., 2019). Di sebelah barat bangunan utama Candi Badut terdapat sisa bangunan candi perwara atau candi pengiring (Gambar 1). Kondisi saat ini satu candi menyisakan bagian pondasi, yang kedua tidak nampak, dan yang ketiga hanya ditandai dengan batas pondasi saja.

METODE

1. Akuisisi Data

Pengumpulan data pada penelitian ini bertujuan untuk memberikan metode transparan serta menerapkan pendekatan yang efektif dalam merepresentasikan kondisi real di lapangan. Untuk memastikan ketelitian dan keandalan dalam proses akuisisi data, maka ditetapkan kriteria teknis spesifik, yaitu pemotretan dilakukan dengan

Pemodelan 3D Candi (Bani/ hal. 206-218)

sudut pengambilan gambar *oblique* sebesar 45° terhadap bidang horizontal dengan Menggunakan wahana pesawat tanpa awak DJI Phantom IV. Tambahannya, pengaturan pertampalan (*overlap*) sebesar 70 % dan 60% *sidelap*. Kombinasi ini dimaksudkan untuk memastikan adanya tumpang tindih

yang memadai antara foto sehingga memudahkan dalam proses identifikasi objek, pembuatan model tiga dimensi, serta meningkatkan kualitas dan akurasi pemrosesan rekonstruksi foto. Lokasi pemotretan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi Eksisting Candi Badut dan Candi Perwara

Detail alur penelitian ini juga disusun secara terstruktur sebagaimana

ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini sebagai berikut.

Akuisisi Data

- Persiapan
- Penentuan AoI
- Pengukuran Manual Candi
- Akuisisi Data Foto

Image Processing dan Pemodelan 3Dimensi

- Dense Point Cloud*
- Proyeksi Permukaan Model Candi
- Penggambaran 3D Candi Badut
- Ekstraksi Model 3D

Uji Ketelitian

- RMSE
- T-Test

Gambar 2. Alur Penelitian

Untuk memastikan bahwa tiap tahapan yang ada menghasilkan model yang teliti dan representatif, maka diperlukan pengaturan parameter yang tepat mulai dari proses akuisisi hingga pemrosesan data. Metode untuk mengoptimalkan *point cloud* disesuaikan dengan beberapa parameter akurasi yang diterapkan selama proses akuisisi data dan pemrosesan foto. Data yang

diperoleh melalui pemrosesan fotogrametri, khususnya perangkat lunak berbasis *Structure from Motion* (SfM), yang memungkinkan pemrosesan foto digital sehingga menghasilkan berbagai produk spasial seperti *point cloud*, model 3D, orthofoto, garis kontur, DEM dan sebagainya. Beberapa parameter yang digunakan meliputi parameter geometris

yang berhubungan dengan fase akuisisi seperti perpotongan antar sudut dan jumlah foto, serta parameter lainnya seperti parameter numerik yang diperoleh dari ekstraksi SfM.

Dalam pemodelan, *Structure from Motion* (SfM) merupakan salah satu pendekatan untuk menangkap struktur tiga dimensi keseluruhan dari suatu lokasi atau objek dari berbagai posisi. SfM bekerja untuk sekelompok gambar dengan tingkat pertampalan yang tinggi yang diperoleh dari sensor bergerak. Namun, algoritma ini hanya memulihkan bentuk suatu objek dan tidak dapat memulihkan skala absolut, posisi, orientasi suatu objek kecuali ada beberapa pengukuran kontrol (Bioresita dkk., 2023).

Dikarenakan keterbatasan SfM dalam menentukan posisi absolut maka diperlukan evaluasi ketelitian model 3D yang diperoleh dengan membandingkannya terhadap data pengukuran langsung di lapangan sebagai referensi. Ketelitian model dihitung menggunakan RMSE yang ditunjukkan pada Persamaan (1), yang merepresentasikan dua

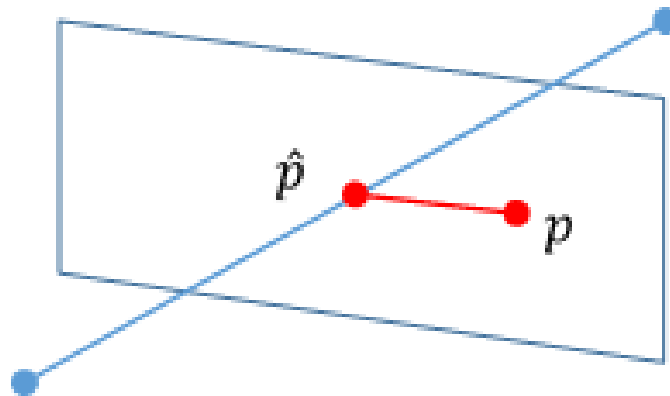
buah kelompok data hasil pengukuran langsung di lapangan (X1) dan hasil pengukuran melalui model 3D (X2) terhadap jumlah sampel pengamatan (n).

$$RMSE = \sqrt{(X1 - X2)^2/n} \dots\dots\dots (1)$$

2. Parameter Akurasi
a. Kesalahan Proyeksi

Kesalahan proyeksi biasanya digunakan untuk mengevaluasi seberapa akuratnya titik 3 dimensi yang merupakan replika proyeksi sebenarnya. Kesalahan proyeksi biasanya terjadi ketika posisi titik hasil rekonstruksi tidak sepenuhnya sejajar dengan posisi titik sebenarnya pada citra, sehingga menimbulkan deviasi pada model 3D dan kondisi nyata.

Semakin kecil nilai kesalahan proyeksi, maka semakin baik dan valid koordinat 3D yang dihasilkan. Untuk menghitung koordinat 3D titik ikat, parameter orientasi internal dan eksternal kamera serta koordinat foto digunakan. Estimasi kesalahan proyeksi direpresentasikan dan dapat dilihat pada Gambar 3.

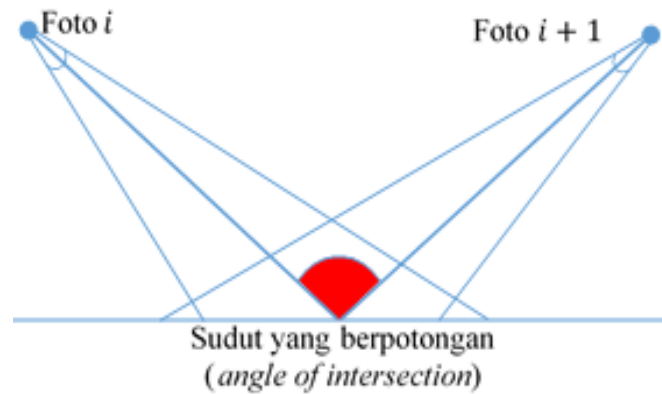


Gambar 3. Ilustrasi Kesalahan Proyeksi

b. Sudut Antar Titik yang Bersinggungan

Rasio tinggi dianalisis dengan memperkirakan sudut antara dua garis (Gambar 3) yang menghasilkan 3D point

yang disebut dengan sudut perpotongan ke depan (*angle of intersection*) dengan titik ikat ke-n yang terlihat dari dua buah foto *i* dan *i + 1* (Gambar 4).

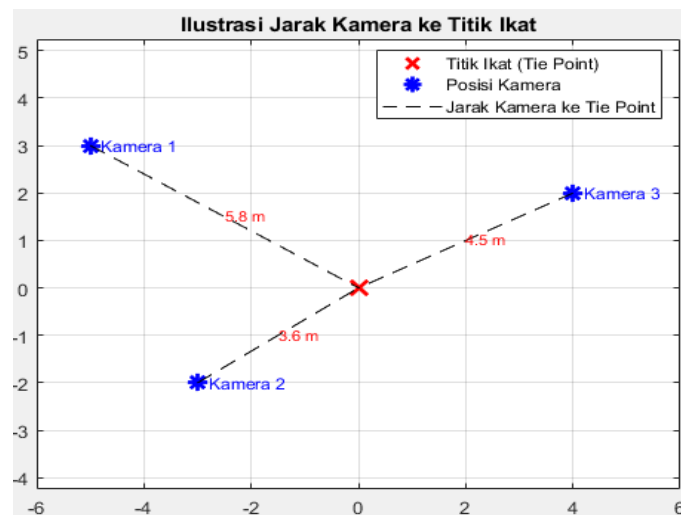


Gambar 4. Ilustrasi Sudut yang Berpotongan ke Depan

c. Jarak kamera

Perhitungan jarak kamera, titik ikat (*tie point*) yang direpresentasikan oleh Gambar

5, yang mengacu pada jarak antar pusat titik fokus kamera ke-i dan titik ikat ke-j, yang terletak di dalam foto ke-i.



Gambar 5. Ilustrasi Jarak Kamera ke *Tie Point*

Selain kesalahan proyeksi, akurasi jarak kamera dan titik ikat dipengaruhi dan sangat bergantung pada fase akuisisi gambar, sehingga nilainya dapat bervariasi secara signifikan antara tiap proyeksi.

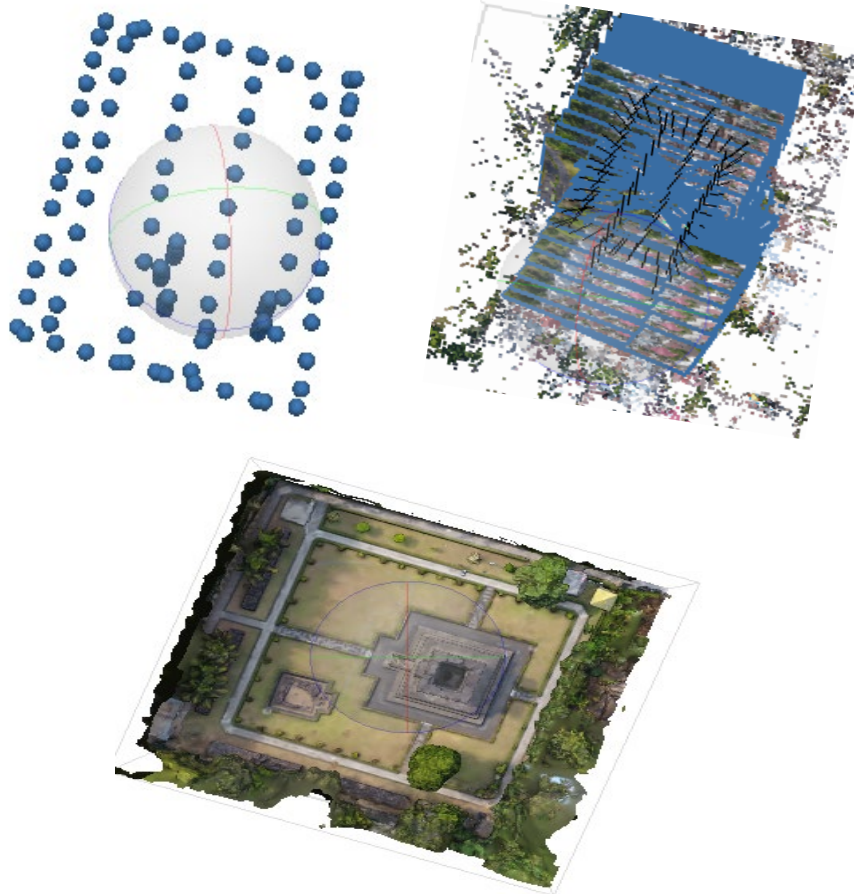
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan 3D dengan metode *Structure from Motion* (SfM) merupakan teknik

rekonstruksi tiga dimensi yang memanfaatkan foto dua dimensi dari berbagai sudut pengambilan. Melalui deteksi fitur, pencocokan titik antar-citra, serta estimasi posisi kamera dan titik-titik objek secara simultan, maka SfM ini dapat menghasilkan *point cloud* yang merepresentasikan bentuk dan struktur objek secara detail. Metode ini dipandang efisien, fleksibel, dan banyak digunakan dalam pemetaan hingga dokumentasi bangunan bersejarah karena mampu menghasilkan

model 3D yang akurat tanpa memerlukan peralatan survei yang kompleks. Dalam pengimplementasiannya, proses pemodelan 3D dengan metode SfM sangat bergantung pada jenis data yang digunakan dan kedua

tipe data ini diperuntukan untuk membangun visualisasi 3D yang memperkuat interpretasi geometrik objek. Visualisasi 3D Hasil Ekstraksi *Point cloud* dari hasil akuisisi data UAV dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kamera Model dan Hasil Ekstraksi *Point Cloud*

Untuk memberikan pemahaman yang lebih sistematis mengenai klasifikasi data yang digunakan dalam penelitian ini, kategori data yang diperoleh dan diolah dapat diidentifikasi berdasarkan jenis observasi, bentuk model tiga dimensi (3D)

yang dihasilkan, serta bentuk visualisasi akhirnya. Pengelompokan tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 1 berikut, yang memperlihatkan hubungan antara metode akuisisi data, hasil pemodelan 3D, dan bentuk visualisasi yang dihasilkan

Tabel 1. Kategori data

Observasi	3D Model	Visualisasi 3D
Foto dari UAV	UAV <i>Point Model</i>	3D <i>Point Model</i>
Pengukuran langsung	UAV Imagery	Model Segmentasi

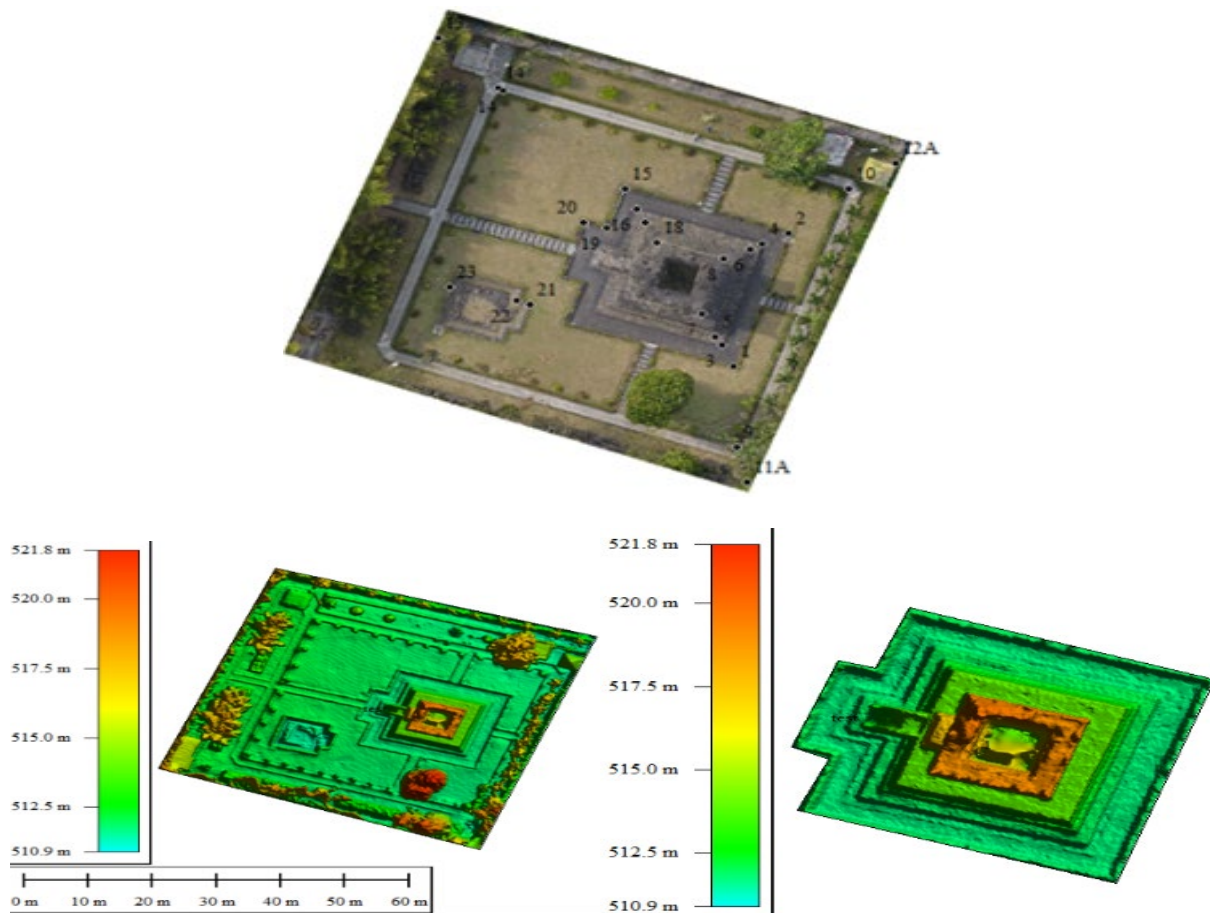
Berdasarkan Tabel 2, terdapat beberapa kesalahan dalam estimasi parameter seperti panjang fokus (*focal*

length), koordinat titik utama (C_x, C_y), koefisien distorsi radial (K_1, K_2, K_3), serta koefisien distorsi tangensial (P_1, P_2).

Pemodelan 3D Candi (Bani/ hal. 206-218)

Data dari tampak atas digunakan sebagai dasar evaluasi akurasi model serta validasi kesesuaian bentuk objek terhadap kondisi sebenarnya. Lebih dari itu, hasil perbandingan antara nilai dimensi objek yang diperoleh melalui pengukuran manual di lapangan dengan hasil ekstraksi dari model 3D yang dihasilkan menggunakan

metode fotogrametri ini menunjukkan bahwa model 3D yang dihasilkan mampu merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Reperesentasi model 3D juga dikembangkan dalam bentuk *Digital Elevation Model* (DEM) sehingga dapat juga digunakan untuk analisis spasial seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Representasi DEM Candi Badut

Untuk memastikan kualitas model yang dihasilkan maka dilakukan perbandingan antara dua metode dengan menghitung selisih nilainya guna menilai deviasi dan

akurasi model. Tabel 3 menjadi dasar dalam mengevaluasi kualitas rekonstruksi 3D dan validitas data yang digunakan dalam analisis.

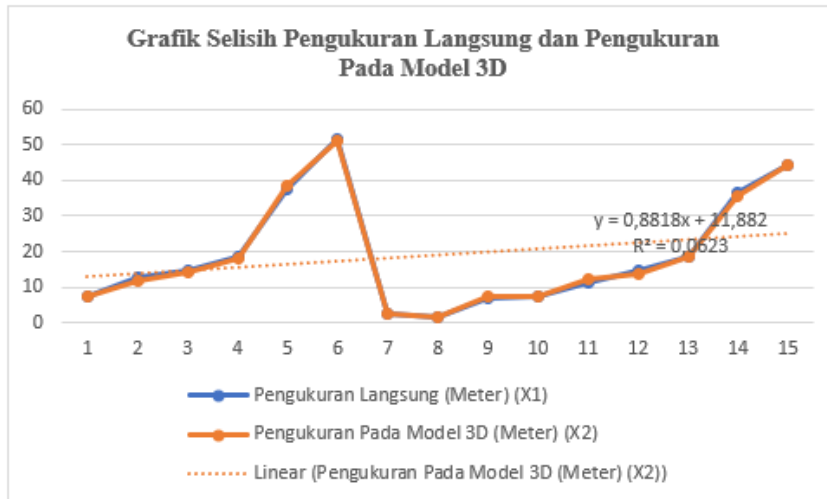
Pemodelan 3D Candi (Bani/ hal. 206-218)

Tabel 3. Hasil Pengukuran Secara Langsung di Lapangan dan Pengukuran Pada Model 3D

No.	Pengukuran Langsung (Meter) (X1)	Pengukuran Pada Model 3D (Meter) (X2)	Deviasi
1	7,5	7,41	0,090
2	12,63	11,692	0,938
3	14,5	14,001	0,499
4	18,7	18,19	0,510
5	37,404	38,64	-1,236
6	51,7	51,095	0,605
7	2,3	2,242	0,058
8	1,32	1,325	-0,005
9	7	7,344	-0,344
10	7,5	7,541	-0,041
11	11,22	12,03	-0,810
12	14,45	13,897	0,553
13	18,65	18,323	0,327
14	36,35	35,832	0,518
15	44,517	44,474	0,043
$RMSE = \sqrt{(X1 - X2)^2/n}$ $= \sqrt{0,3169/15} = 0,5629$			

Evaluasi akurasi dilakukan dengan melihat nilai RMSE (dihitung berdasarkan pada persamaan 1) data sampel yang dihitung untuk setiap pasang data dengan membandingkan hasil pengukuran langsung (X1) dan pengukuran pada model 3D yang diproses dengan prinsip dasar fotogrametri (X2). Dari hasil pada Tabel 3 maka diperoleh RMSE sebesar 0,5629. Nilai ini menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan antara pengukuran model 3D dan pengukuran langsung pada objek bangunan Candi Badut berada pada kisaran $\pm 0,5629$ meter.

Nilai tersebut mengindikasikan bahwa model 3D yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dan konsisten. Besarnya kesalahan masih berada dalam rentang toleransi untuk pemodelan bentuk objek berskala besar, meskipun tetap menunjukkan adanya beberapa deviasi yang perlu diperhatikan, terutama pada nilai pengukuran yang memiliki nilai selisih relatif besar. Selisih pengukuran tersebut juga dapat dilihat pada representasi pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Selisih Pengukuran Langsung dan Pengukuran Pada Model 3D

Pada pengukuran sampel diperoleh hasil ukuran dengan nilai linearisasi sebesar $0,8818x + 11,882$ pada arah y dan R^2 sebesar 0,00623. Nilai koefisien regresi linear negatif pada arah Y ini menunjukkan adanya hubungan yang sangat lemah atau bahkan tidak signifikan antara variabel yang diukur. Selain itu, nilai R^2 yang sangat kecil menandakan bahwa variabilitas data yang diukur hampir tidak dijelaskan oleh model linier tersebut. Dalam konteks pengukuran spasial atau pemodelan 3D ini maka dapat diketahui bahwa data yang dihasilkan dari pengukuran masih tidak cocok dengan model linier yang digunakan untuk representasi data. Hal ini juga dapat dilihat dari hasil pengukuran yang terdapat kesalahan pada sampel nomor 5 sebesar $\pm 1,236$ meter.

Hal tersebut diakibatkan oleh sudut pengambilan gambar secara oblique dan masih memiliki kesalahan serta distorsi pada citra yang dihasilkan dari sudut pengambilan foto 45° . Selain itu tingginya nilai R^2 ini merupakan indikator kuat bahwa model yang digunakan sangat efektif dan relevan dalam menggambarkan sebagian besar variabilitas data pada sampel pengukuran. Sehingga hal ini berarti sekitar 89,43% dari variasi dalam data dapat merepresentasikan model dengan baik. Maka dapat pula disimpulkan bahwa hasil pengukuran cukup baik dilihat dari selisih pengukuran pada foto dan pengukuran langsung di lapangan. Hal ini juga dapat dibuktikan dengan uji ketelitian melalui uji statistik T-Test pada Tabel 4.

Tabel 4. T-Test Pengukuran Langsung di Lapangan dan Pengukuran Pada Model 3D

<i>t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances</i>		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
<i>Mean</i>	19,0494	18,93573
<i>Variance</i>	250,1674	249,7761
<i>Observations</i>	15	15
<i>Pooled Variance</i>	249,9717	
<i>Hypothesized Mean Difference</i>	0	
<i>df</i>	28	
<i>t Stat</i>	0,019689	

<i>t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances</i>		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
<i>P(T<=t) one-tail</i>	0,492216	
<i>t Critical one-tail</i>	1,701131	
<i>P(T<=t) two-tail</i>	0,984431	
<i>t Critical two-tail</i>	2,048407	

Berdasarkan hasil uji t dua sampel Pada Tabel 4, dapat diasumsikan bahwa kedua varians sama, sehingga diperoleh nilai t hitung = 0,0197 dan p -value two-tail = 0,9844, yang berada jauh di atas taraf signifikansi 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara rata-rata variabel 1 dan variabel 2. Sehingga baik hasil pengukuran langsung di lapangan maupun pengukuran yang diterapkan pada model 3D memiliki nilai rata-rata yang hampir sama. Perbedaan nilai yang terlihat secara numerik hanya merefleksikan variasi acak pada sampel pengukuran dan bukanlah perbedaan yang signifikan secara statistik. Dengan demikian maka hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa kedua kelompok memiliki rata-rata yang sama dapat diterima.

SIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk menghasilkan model tiga dimensi (3D) Candi Badut menggunakan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan metode *Structure from Motion* (SfM), serta mengevaluasi tingkat akurasi model tersebut melalui perbandingan dengan data pengukuran langsung di lapangan. Proses akuisisi data menggunakan UAV dengan konfigurasi pemotretan *oblique* dan tingkat pertampalan tinggi terbukti mampu menghasilkan citra yang kaya informasi dan mendukung proses rekonstruksi 3D secara optimal. Penggunaan perangkat lunak berbasis SfM dapat menghasilkan *point cloud* yang cukup padat, serta produk turunan lain yang memberikan gambaran menyeluruh mengenai struktur Candi Badut. Evaluasi menunjukkan bahwa pemodelan

3D yang dihasilkan memiliki tingkat konsistensi yang tinggi dengan data pengukuran lapangan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,5629 meter, yang mengindikasikan bahwa penyimpangan geometrik berada dalam tingkat yang dapat diterima untuk tujuan dokumentasi dan kajian arsitektural. Selain itu, hasil uji statistik menggunakan uji t dua sampel menghasilkan p -value sebesar 0,9844, jauh di atas ambang signifikansi 0,05. Temuan tersebut menegaskan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara pengukuran lapangan dan data hasil pemodelan 3D. Dengan demikian, model 3D yang terbentuk dapat dianggap representatif terhadap kondisi fisik bangunan sebenarnya.

Keberhasilan model 3D ini selain dapat digunakan untuk dokumentasi digital, dapat juga digunakan dalam pemantauan kondisi struktur, analisis deformasi, rekonstruksi sejarah dan kebutuhan lainnya. Ke depan, metode ini dapat dikembangkan lebih lanjut melalui integrasi dengan teknik lain seperti penambahan dengan GNSS untuk meningkatkan akurasi atau dikombinasikan dengan TLS untuk memantau perubahan kondisi struktur dari waktu ke waktu. Pendekatan ini diharapkan dapat mendukung upaya pelestarian cagar budaya lebih optimal, akurat, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bagnolo, V. dan Paba, N. (2019). UAV-Based Photogrammetry for Archaeological Heritage Site Survey and 3D Modeling of the Sardus Pater

- Temple (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42-2(W17), 45–51.
- Bani, M. N., Susilo, H., dan Fajarwati, A. N. (2025). Analisis Penggunaan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) untuk Inspeksi dan Pemodelan 3D Gedung. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 39–47.
- Bioresita, F., Hidayat, H., Kurniawan, J. R., Purnomo, S., dan Grussenmeyer, P. (2023). 3D Modelling of Sangrahan Temple using UAV Imagery and Terrestrial Photogrammetry Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1276(1), 012043.
- Bouty, R. F., Sholihah, A. B., dan Agustiananda, P. A. P. (2019). Preservation of Conclusion Temple with “Historic Urban Landscape” Technique in the Islamic Indonesia University Environment. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 3(1), 1–8.
- Burdziakowski, P. (2018). UAV in Today's Photogrammetry? Application Areas and Challenges. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*, 18(2.3), 241-248.
- Jo, Y. H. dan Hong, S. (2019). Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 53.
- Marčiš, M., Fraštia, M., dan Vošková, K. T. (2024). Potential of Low-cost UAV Photogrammetry for Documenting
- Pemodelan 3D Candi (Bani/ hal. 206-218)**
- Hard-to-access Interior Spaces Through Building Openings. *Heritage*, 7(11), 6173–6191.
- Partama, I. G. Y. (2025). 3D Modeling using UAV-Photogrammetry Technique for Digital Documentation of Cultural Heritage Buildings. *International Journal of GEOMATE*, 28(126), 61-70.
- Pemerintah Indonesia. *Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya*. Jakarta.
- Remondino, F. dan Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D Documentation of Natural and Cultural Heritage Sites—Techniques, Problems, and Examples. *Applied Geomatics*, 2(3), 85–100.
- Samadzadegan, F., Javan, F. D., dan Asl, M. Z. (2023). Architectural Heritage 3D Modelling using Unmanned Aerial Vehicles Multi-view Imaging. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48(M2), 1395–1402.
- Suchocki, C., Okrój, S., dan Błaszczak-Bąk, W. (2023). Methodology for the Measurement and 3D Modelling of Cultural Heritage: A Case Study of the Monument to the Polish Diaspora Bond with the Homeland. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 116(1), 1-8
- Soviyani, A., Kumoro, S. T., Saifulloh, Sumariyanto, Nurali, Sutomo, E. (1995). *Candi Badut dan Pemugarannya*. Jakarta: Direktorat Jenderal Kebudayaan.
- Xv, J., Deng, F., dan Liu, H. (2022). Point Cloud Convolution Network Based on Spatial Location Correspondence. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(12), 591.