

Analisis Pemodelan Tiga Dimensi Candi Gunung Gangsir Menggunakan *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner*

Digital Terrain Model LiDAR for Volume Calculation and Flood Hazard Analysis in Sidoarjo Mudflow Area

Alfi Syahril Ramadhan, Agung Budi Cahyono*, dan Teguh Hariyanto

Departemen Teknik Geomatika, FTSPK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

*Korespondensi penulis: agungbc@geodesy.its.ac.id

Diterima: 20072024; Diperbaiki: 16122024; Disetujui: 16122024; Dipublikasi: 16122024

Abstrak: Candi Gunung Gangsir, salah satu warisan bangunan cagar budaya yang memiliki nilai budaya dan ilmu pengetahuan yang penting. Candi ini perlu dilestarikan dengan cara pendokumentasian secara digital. Perkembangan teknologi memungkinkan dalam bentuk pemodelan 3D menggunakan sensor berupa LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Telah ada teknologi terkini berupa smartphone Phone 12 Pro Max dengan tambahan *built-in sensor* LiDAR. Sensor LiDAR pada iPhone tersebut lebih terjangkau jika dibandingkan dengan alat TLS (*Terrestrial Laser Scanner*). Akuisisi data dengan iPhone 12 Pro Max sebagai *Low-Cost LiDAR* dan Leica RTC360 sebagai TLS. *Low-Cost LiDAR* melakukan pemindaian secara bergerak sehingga menghasilkan 8.234.112 *point cloud*, sementara TLS menggunakan pemindaian statik menghasilkan 1.359.463.159 *point cloud*. Secara visual model 3D yang dihasilkan oleh TLS menampilkan detail yang lebih baik daripada hasil dari *Low-Cost LiDAR*. Diperoleh *RMS Error* untuk *Low-Cost LiDAR* sebesar 19,3 cm dan TLS sebesar 0,5 cm, sehingga hanya TLS yang memenuhi batas toleransi yang telah ditetapkan. Pengujian akurasi *point cloud* menggunakan 3 parameter *eigen value based* yaitu *planarity*, *linearity*, dan *sphericity* menunjukkan data yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan data yang dihasilkan oleh TLS secara uji statistik.

Copyright © 2024 Geoid. All rights reserved.

Abstract: Gunung Gangsir Temple is one of the cultural heritage buildings that have important cultural and scientific values. This temple needs to be preserved by digital documentation. The development of technology allows for 3D modeling using sensors such as LiDAR (*Light Detection and Ranging*). There has been the latest technology in the form of the Phone 12 Pro Max smartphone with an additional built-in LiDAR sensor. The LiDAR sensor on the iPhone is more affordable than the TLS (*Terrestrial Laser Scanner*). Data acquisition was done with the iPhone 12 Pro Max as low-cost LiDAR and the Leica RTC360 as TLS. The low-cost LiDAR performed a mobile scan, resulting in 8,234,112 point clouds, while the TLS used a static scan, resulting in 1,359,463,159 point clouds. Visually, the 3D model produced by TLS displays better details than the results from low-cost LiDAR. The RMS error for low-cost LiDAR is 19.3 cm and TLS is 0.5 cm, so only TLS meets the predetermined tolerance limit. Testing the accuracy of the point cloud using 3 eigenvalue-based parameters, namely planarity, linearity, and sphericity, shows that the data generated by low-cost LiDAR has no significant difference with the data generated by TLS in statistical tests.

Kata kunci: 3D Model, Candi Gunung Gangsir, *Low-Cost LiDAR*, *Terrestrial Laser Scanner*.

Cara untuk sitasi: Ramadhan, A. S., Cahyono, A. B. dan Hariyanto, T. (2024). Analisis Pemodelan Tiga Dimensi Candi Gunung Gangsir Menggunakan *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner*. *Geoid*, 19(3), 519 - 528

Pendahuluan

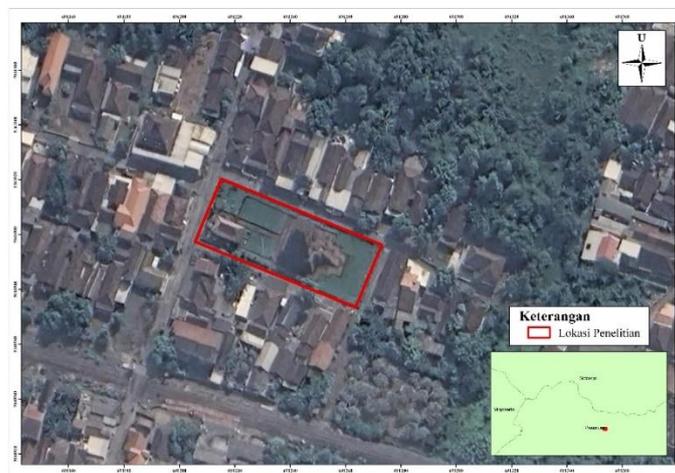
Indonesia adalah negara kaya akan warisan budaya yang beragam menjadikan pendokumentasian sangat penting. Peraturan Pemerintah (PP) No 1 Tahun 2022 tentang Register Nasional dan Pelestarian Cagar Budaya bersama dengan Undang-Undang (UU) No.11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya memberikan dasar hukum yang kuat untuk mengelola dan melestarikan cagar budaya di Indonesia. (Safira et al., 2020). Kehadiran dokumentasi mengenai cagar budaya memiliki keterkaitan yang sangat penting dengan situasi geografis

Indonesia yang sering menghadapi risiko gempa bumi, baik dengan skala kecil maupun besar. (Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2017). Bangunan bersejarah seperti candi-candi kuno termasuk dalam kategori cagar budaya yang perlu dijaga dan terus dikembangkan untuk memperkuat ketahanan budaya (Syiaifulloh & Wibowo, 2020).

Candi Gunung Gangsir merupakan salah satu bangunan bersejarah. Candi dengan ketinggian 17,50 meter ini cukup strategis yakni berbatasan dengan Kabupaten Sidoarjo di sisi barat, Kabupaten Probolinggo di sisi timur, dan Kabupaten Malang di sisi selatan. Menilik dari segi arsitekturalnya, Candi ini merupakan candi berbahan bata dengan denah bujur sangkar berukuran tiap sisi 14 meter. Fenomena menarik lainnya yakni kondisi seluruh permukaan Candi Gunung Gangsir semula dilapisi plesteran stuko (*wajralepa*) seperti yang diterapkan di Candi Kalasan Prambanan (Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2017).

Kegiatan pendokumentasian yang dapat dilakukan untuk melihat secara detail bentuk bangunan adalah dengan melakukan pemodelan 3 dimensi. Kegiatan ini tidak hanya merekam bentuk suatu objek namun juga sekaligus membentuk struktur objek tersebut. Beberapa metode yang digunakan untuk pembuatan pemodelan 3D adalah dengan teknologi LiDAR. Metode ini merupakan metode yang banyak digunakan dan berkembang pesat pada saat ini. Teknologi LiDAR merupakan bagian dari sebuah sistem penginderaan jauh aktif yang bekerja dengan menghitung selisih antara waktu pemancaran dan pemantulan gelombang pulsa laser terhadap objek yang diamati (Soetaat, 2009). Pada dasarnya, untuk melakukan pengambilan data menggunakan LiDAR membutuhkan biaya yang tinggi untuk penyewaan alat dan juga membutuhkan operator alat yang terlatih agar mendapatkan hasil yang akurat dan sesuai. penggunaan LiDAR juga kurang baik digunakan untuk wilayah dengan skala besar terutama dalam pembuatan 3D model yang wilayahnya umumnya kecil (Tambunan, 2022). Penggunaan LiDAR di darat menggunakan alat yang dinamakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Alat ini sering kali digunakan untuk keperluan pemodelan dan analisis data dari sebuah objek. Kekurangan dari alat TLS yaitu keterbatasan tempat untuk melakukan proses pemindaian data. Kekurangan dari alat tersebut dapat diatasi dengan menggunakan teknologi *Hand-held Mobile Laser Scanner* (HMLS). Alat ini merupakan pengembangan LiDAR yang memungkinkan akuisisi data dalam keadaan dinamis atau bergerak. Dalam teknologi terkini, terdapat perangkat canggih seperti *smartphone* iPhone 12 Pro Max yang dilengkapi dengan sensor LiDAR dan memanfaatkan prinsip dari teknologi HMLS (Gillihan, 2008). Teknologi *Low-Cost* LiDAR merupakan fitur yang ada pada *smartphone* seperti iPhone 12 Pro Max sehingga memungkinkan penggunaan LiDAR dengan biaya yang lebih rendah serta ketersediaan melalui perangkat *smartphone* yang umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Sensor LiDAR yang terdapat pada iPhone tersebut perlu menjalani serangkaian pengujian teknis dan pengukuran akurasi guna menilai kemampuan dan kelayakannya dalam konteks pemodelan 3D (Wang et al., 2022).

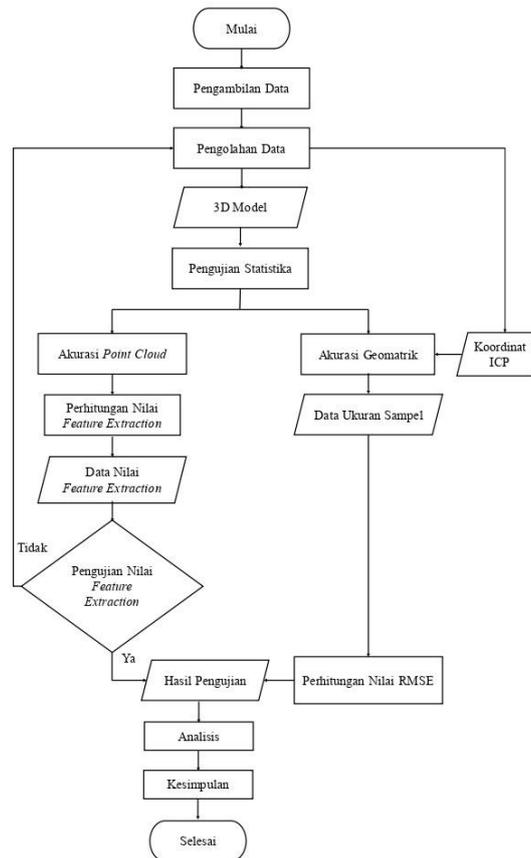
Data dan Metode



Gambar 1. Lokasi penelitian

Lokasi yang digunakan dalam penelitian ini berada pada Candi Gunung Gangsir yang terletak di Desa Gununggangsir, Kecamatan Beji, Kabupaten Pasuruan, pada koordinat $7^{\circ}35'12.45''\text{LS}$ dan $112^{\circ}44'0.54''\text{BT}$.

Dalam penelitian ini terdapat beberapa data yang diperlukan untuk digunakan sebagai penunjang pelaksanaan penelitian pemodelan rekonstruksi 3D bangunan Candi Gunung Gangsir. Data yang diperlukan adalah koordinat benchmark, koordinat *Ground Control Point* (GCP), koordinat *Independent Check Point* (ICP), raw data *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) bangunan Candi Gunung Gangsir. Berikut merupakan tahapan pengolahan data yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 2. Diagram Alir Pengolahan

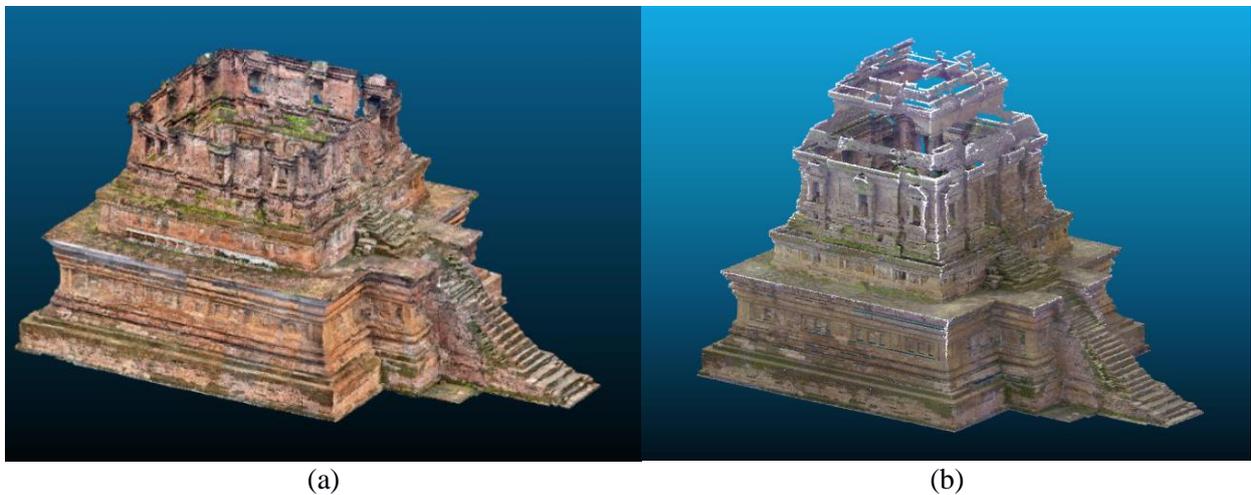
Data LiDAR yang didapatkan adalah berupa *point cloud* dan dilakukan pengolahan dengan proses awal yaitu dengan melakukan *filtering point cloud* menggunakan *software* Cloud Compare agar mendapatkan model 3D *point cloud* yang utuh. *Filtering point cloud* dilakukan untuk menghilangkan *noise* dari data *point cloud* atau untuk menghapus data *point cloud* yang tidak digunakan dalam proses penelitian. Didapatkan juga data TLS yang berupa *point cloud* maka dilakukan proses registrasi data terlebih dahulu menggunakan *software* Cyclone Register 360. Proses registrasi data bertujuan untuk menggabungkan data *point cloud* yang didapatkan dari setiap titik pemindaian data. Metode registrasi yang digunakan yaitu metode *cloud to cloud*. Proses selanjutnya yaitu dilakukan *filtering* data dengan menggunakan *software* yang sama. Dilakukan pengolahan koordinat menggunakan *software* pengolahan koordinat Excel dengan koordinat yang dihasilkan adalah berupa koordinat *Northing*, *Easting*, dan Elevasi dengan sistem koordinat yang dipakai adalah UTM 49S. Terdapat dua jenis koordinat yang dilakukan pengolahan yaitu koordinat *Ground Control Point* (GCP) yang berfungsi sebagai koordinat titik kontrol objek agar sesuai dengan titik koordinat sebenarnya di lapangan dan koordinat *Independent Control Point* (ICP) yang berfungsi sebagai koordinat titik uji akurasi geometrik yang diletakkan secara tersebar pada beberapa sudut objek badan Candi Gunung Gangsir.

Setelah dilakukan proses *Georeferencing* akan didapatkan model 3D *point cloud*. Kemudian, tahapan selanjutnya yaitu uji statistik yang bertujuan untuk melakukan pengujian terhadap *point cloud* yang dihasilkan

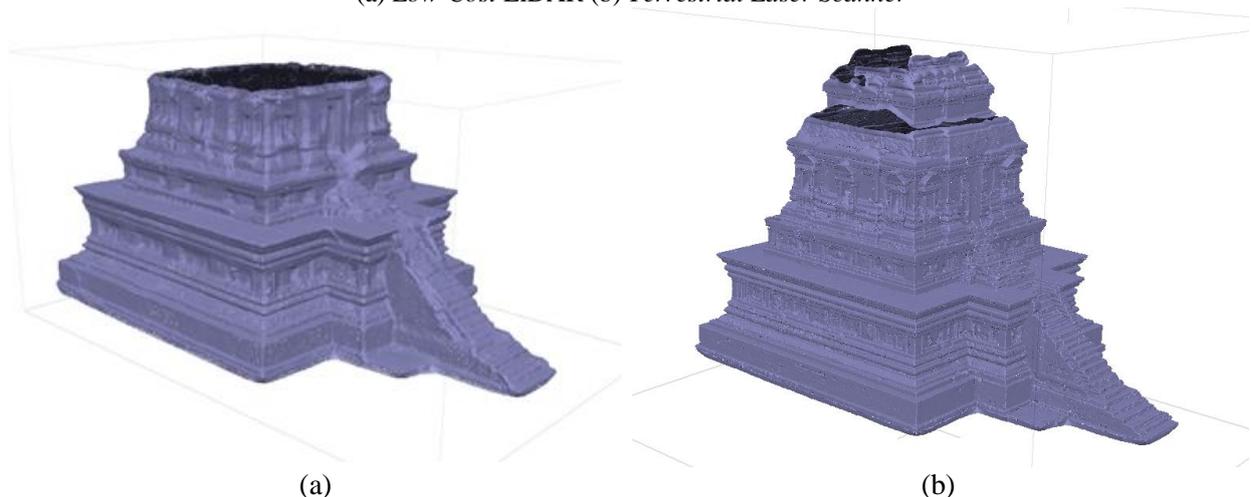
oleh *Low-Cost LiDAR*. Uji statistik pertama menggunakan Uji *t-student* berpasangan. Penarikan kesimpulan dari nilai pengujian dilakukan berdasarkan nilai dari t_{hitung} keseluruhan ukuran sampel yang digunakan sebagai parameter pengujian. Penentuan hipotesis H_0 yaitu tidak terdapat perbedaan nilai pada model 3D *point cloud* secara perhitungan statistik. Pengujian ini dilakukan untuk *point cloud* dengan menggunakan nilai parameter dari *eigenvalue based*. Nilai *eigenvalue based* yaitu parameter yang dapat mampu merepresentasikan karakteristik *point cloud* yang dihasilkan dari beberapa parameter, seperti nilai Planarity ($P\lambda$), Linearity ($L\lambda$), dan Sphericity ($S\lambda$). Selanjutnya dilakukan pengujian geometrik yaitu pengujian terhadap nilai ukuran sampel yang didapat dari model 3D *point cloud* sensor *Low-Cost LiDAR* dan TLS dengan ukuran secara langsung pada objek ruangan. Tahapan terakhir adalah melakukan analisis perbandingan proses pengambilan data dan hasil model 3D *point cloud* yang telah didapat. Pada akhirnya dilakukan pemodelan 3D berdasarkan model 3D *point cloud* yang dihasilkan.

Hasil dan Pembahasan

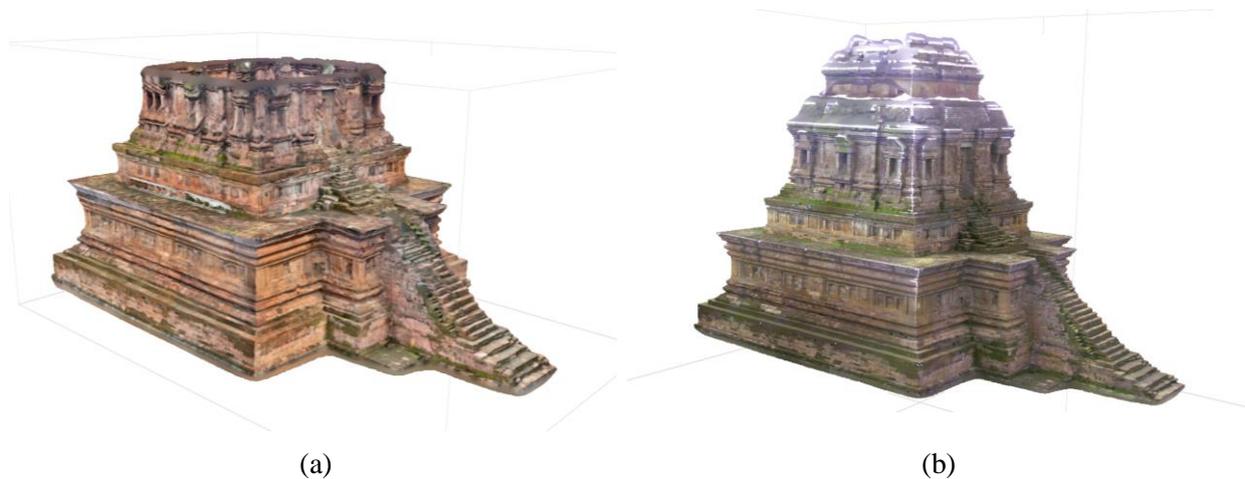
1. Hasil Pengolahan LiDAR



Gambar 3. Hasil *Merge* dan *Masking*
(a) *Low-Cost LiDAR* (b) *Terrestrial Laser Scanner*



Gambar 4. Hasil *Mesh*
(a) *Low-Cost LiDAR* (b) *Terrestrial Laser Scanner*



Gambar 5. Hasil akhir dari pemodelan 3D
(a) *Low-Cost LiDAR* (b) *Terrestrial Laser Scanner*

Data yang diambil oleh *Low-Cost LiDAR* berbentuk data *point cloud* sebanyak 8.234.112 titik. Dilakukan proses *merge* dan *masking* menggunakan perangkat lunak Cloud Compare dan Agisoft Metashape, sehingga menghasilkan *point cloud* sebanyak 6.099.712 titik. Sedangkan, Data yang diambil oleh TLS berbentuk data *point cloud* sebanyak 1.359.463.159 titik. Dilakukan proses *merge* dan *masking* menggunakan perangkat lunak Cyclone Register 360 dan Agisoft Metashape, sehingga menghasilkan *point cloud* sebanyak 17.283.274 titik.

2. Analisis Kerangka Kontrol

Pengukuran kerangka kontrol horizontal dalam penelitian ini dilakukan dengan metode poligon tertutup. Berikut merupakan hasil pengukuran kerangka kontrol horizontal yang dianalisis terhadap dua kriteria yaitu kesalahan linear dan kesalahan penutup sudut.

Tabel 1. Kesalahan Kerangka Kontrol Horizontal

Jenis	Nilai
Kesalahan Linear Relatif	0.0000768 meter
Kesalahan Penutup Sudut	4"

Pengolahan kerangka kontrol vertikal dilakukan untuk mendapatkan tinggi titik kontrol yang berada di tanah. Setelah dilakukan perhitungan, terdapat kesalahan beda tinggi saat pergi sebesar -0,1295 mm dan pulang sebesar 10,7992 mm. Dengan jarak total pengukuran 122,6277 meter, maka toleransi yang diperbolehkan pada penelitian ini sebesar $\pm 1,4007$ mm. Berdasarkan hal tersebut, maka pengukuran kerangka kontrol vertikal yang memenuhi toleransi adalah pengukuran saat pergi. Oleh karena itu, selanjutnya yang dipakai untuk perhitungan adalah data pengukuran pergi.

3. Analisis Proses Georeferencence

Proses georeferensi *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner* dilakukan menggunakan perangkat lunak yang berbeda. Tahap ini menggunakan 9 titik GCP yang tersebar di sekitar Candi Gunung Gangsir. Georeferensi *Low-Cost LiDAR* dilakukan menggunakan perangkat lunak Cloud Compare, sedangkan dan *Terrestrial Laser Scanner* diproses menggunakan perangkat lunak Cyclone Register 360. Hasil yang diperoleh dalam bentuk total RMS Error dimana pada penggunaan *Low-Cost LiDAR* menghasilkan kesalahan RMS Error sebesar 19,3 cm, sementara pada penggunaan *Terrestrial Laser Scanner* menghasilkan kesalahan RMS Error sebesar 5 mm.

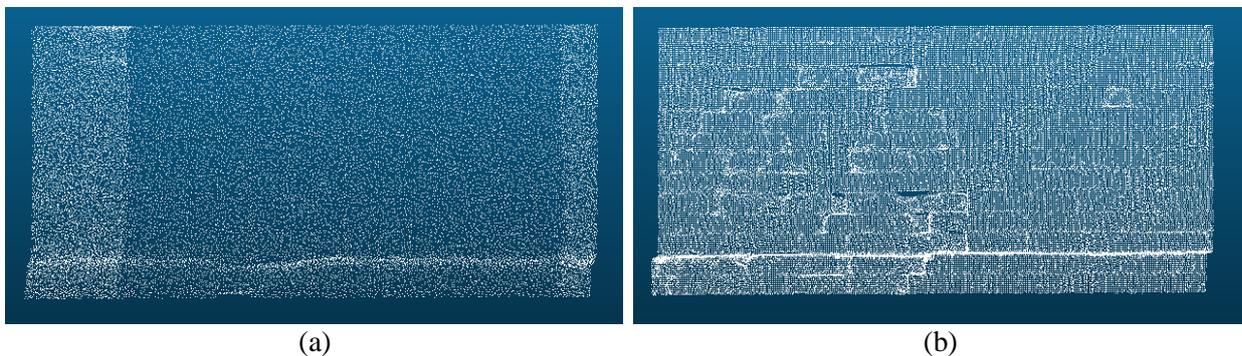
Tabel 2. RMS Error Georeference

Pengolahan	RMSE (m)
LiDAR iPhone 12 Pro Max	0,193
TLS Leica RTC360	0,005

Berdasarkan aturan yang berlaku pada CIPA *Heritage Documentation* tahun 2009 *Series I*, toleransi yang digunakan adalah sebesar 10 cm. Hasil RMS Error dari proses georeferensi Model 3D yang tertera pada tabel 2 hanya *Terrestrial Laser Scanner* yang memenuhi batasan toleransi tersebut. Jika membandingkan hasil georeferensi antara *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner*, terlihat bahwa *Low-Cost LiDAR* memiliki RMS Error yang lebih tinggi. Hal tersebut disebabkan pada proses *merge* dan georeferensi *Low-Cost LiDAR* menggunakan aplikasi *Cloud Compare*, persentase overlap antar sisi sangat kecil. Hal ini dipengaruhi oleh *point of view* kamera iPhone 12 Pro Max pada saat proses akuisisi data. Di sisi lain, dalam proses georeferensi *Terrestrial Laser Scanner* menggunakan *Cyclone Register 360* persentase overlap yang dihasilkan tinggi yaitu sebesar 64%. Sehingga hasil georeferensi dari persentase overlap menunjukkan nilai RMSE yang lebih rendah.

4. Analisis Point Cloud

Tujuan dilakukan perbandingan jumlah dan densitas *point cloud* antara *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner* adalah untuk menguji kemampuan sensor yang terdapat pada *Low-Cost LiDAR* pada saat proses *scanning*. Intensitas *point cloud* adalah jumlah *point cloud* yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner* dalam proses *pemindaian*, sementara densitas merupakan tingkat kerapatan antara *point cloud* tersebut. Baik jumlah maupun densitas *point cloud* sangat memengaruhi kualitas model 3D yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah dan semakin tinggi densitas *point cloud*, maka model 3D yang dihasilkan akan lebih baik dan dapat merepresentasikan detail ruangan dengan lebih baik pula. Pada penelitian ini digunakan sampel data *point cloud* dari area dengan ukuran $2 \times 1 \text{ m}^2$ untuk menganalisis intensitas dan densitas *point cloud* yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner*.



Gambar 6. Intensitas dan Densitas *Point Cloud*
(a) *Low-Cost LiDAR* (b) *Terrestrial Laser Scanner*

Terdapat perbedaan antara *point cloud* dari *Low-Cost LiDAR* (a) dan *Terrestrial Laser Scanner* (b). Dari segi intensitas, *point cloud* yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* lebih sedikit dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh *Terrestrial Laser Scanner*. Hal ini mempengaruhi kerapatan *point cloud* *Low-Cost LiDAR* yang menjadi renggang. Jika dimodelkan dalam bentuk 3D, secara keseluruhan jumlah *point cloud* yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* memiliki perbedaan yang signifikan dengan *Terrestrial Laser Scanner*. Total *point cloud* dari *Low-Cost LiDAR* sebesar 6.099.712 titik dibandingkan dengan jumlah *point cloud* dari *Terrestrial Laser Scanner* yang mencapai 17.283.274. Secara teknis, hal ini disebabkan oleh jumlah pulsa laser yang dipancarkan oleh sensor *Low-Cost LiDAR* yang lebih sedikit dalam satu unit waktu dibandingkan dengan *Terrestrial Laser Scanner*.

Analisis *point cloud* juga dilaksanakan dengan melakukan perbandingan terkait nilai dari parameter *feature extraction* berdasarkan nilai dari *eigenvalue based* yang dihasilkan oleh masing-masing alat. *Eigenvalue based*

merupakan nilai yang dihasilkan oleh vektor eigen. Nilai tersebut akan menghasilkan parameter *feature extraction*. *feature extraction* adalah fitur yang menggambarkan kondisi dan karakteristik yang dapat digunakan untuk merekonstruksi *point cloud*. Pada penelitian ini, digunakan sebanyak 3 parameter *feature extraction* dimana setiap parameter mempunyai karakteristik berbeda-beda dalam menggambarkan *point cloud*. Parameter *feature extraction* yang digunakan antara lain *Planarity* ($P\lambda$), *Linearity* ($L\lambda$), dan *Sphericity* ($S\lambda$). Analisis uji akurasi terhadap *point cloud* dilakukan menggunakan uji statistik dengan didasarkan pada nilai yang terdapat pada parameter di *feature extraction*.

Hipotesis:

$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ (Tidak terdapat perbedaan rata-rata antara *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner*)
Tingkat signifikansi (α) yang digunakan sebesar 5% dengan daerah penolakan yaitu H_0 ditolak jika $|t\text{-hitung}|$ lebih besar dari $t\text{-tabel}$.

Tabel 3. Hasil Uji *t-student* pada Parameter *Feature Extraction*

Parameter	Nilai Parameter		T-Hitung	T-Tabel	Keputusan
	Low-Cost LiDAR	TLS			
Planarity	0,502	0,497	0,190	1,967	H_0 gagal ditolak
Linearity	0,443	0,496	1,911	1,967	H_0 gagal ditolak
Sphericity	0,371	0,387	0,729	1,967	H_0 gagal ditolak

Dari ketiga parameter *eigen value based* menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan secara statistik antara data yang diperoleh dari *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner*. Hal ini menunjukkan bahwa *Low-Cost LiDAR* memiliki potensi untuk digunakan sebagai alat pemodelan 3D. Uji akurasi *point cloud* tersebut menunjukkan bahwa sensor pada *Low-Cost LiDAR* mampu menghasilkan *point cloud* dengan tingkat kehalusan dan hamburan yang baik. Selain itu, sensor ini juga mampu menghasilkan *point cloud* yang cocok dalam pembentukan garis pada model 3D.

5. Analisis Model 3D

Pada pengolahan model 3D, *software* yang digunakan adalah *Agisoft Metashape*. Data yang digunakan dalam pengolahan model 3D ini adalah data *point cloud* yang sudah melewati proses *merge*, *filtering*, dan *georeference*. Selanjutnya, model 3D *point cloud* tersebut dijadikan *mesh* menggunakan *software Agisoft Metashape*.



Gambar 7. Model 3D Bagian Depan Candi Gunung Gangsir
(a) *Low-Cost LiDAR* (b) *Terrestrial Laser Scanner*

Secara visual model 3D yang dihasilkan oleh *Terrestrial Laser Scanner* menampilkan detail yang lebih baik daripada hasil dari *Low-Cost LiDAR*. Contohnya, pada bagian relief Candi Gunung Gangsir, model 3D dari *Terrestrial Laser Scanner* menampilkan detail relief yang hampir menyerupai sesungguhnya. Hal

ini disebabkan oleh pengaruh sudut pandang sensor yang terdapat alat *Low-Cost LiDAR* saat proses *scanning*. Namun sebaliknya, untuk warna pada model 3D yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* lebih cerah daripada hasil dari *Terrestrial Laser Scanner*. Hal ini disebabkan oleh jenis kamera yang digunakan dari kedua alat tersebut dan metode *scanning*-nya. Selain itu, analisis sebelumnya juga menunjukkan bahwa jumlah *point cloud* yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* lebih sedikit dibandingkan dengan *Terrestrial Laser Scanner*, sehingga model 3D yang dihasilkan oleh *Low-Cost LiDAR* tidak sempurna menyeluruh dibandingkan dengan *Terrestrial Laser Scanner*.



(a) (b)
Gambar 8. Model 3D Bagian Kanan Candi Gunung Gangsir.
(a) *Low-Cost LiDAR* (b) *Terrestrial Laser Scanner*

6. Analisis Uji Geometrik Model 3D

Analisis uji geometrik pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 13 titik ICP yang tersebar secara merata di tiap sisi Candi Gunung Gangsir. Untuk melakukan analisis geometri maka digunakan nilai *RMS Error* yang diperoleh dari masing-masing hasil pengolahan dan *residual error* yang diperoleh masing-masing sumbu yaitu *Easting*, *Northing*, dan Elevasi yang dihasilkan di lapangan.

Nilai rata-rata dari *residual error* pada koordinat *easting* untuk *Low-Cost LiDAR* sebesar 0,039 meter, sedangkan pada *Terrestrial Laser Scanner* sebesar 0,005 meter. Maka dari hasil *residual error* koordinat *easting* pada masing masing model, didapatkan nilai *RMS Error* pada *Low-Cost LiDAR* sebesar 0,104 meter dan pada *Terrestrial Laser Scanner* sebesar 0,012 meter. Berdasarkan perhitungan tersebut, data yang diperoleh dari *Terrestrial Laser Scanner* menunjukkan tingkat kesalahan yang lebih rendah, sehingga akurasi *point cloud* lebih baik daripada *Low-Cost LiDAR* dalam hal koordinat *easting*.

Nilai rata-rata dari *residual error* pada koordinat *northing* untuk *Low-Cost LiDAR* sebesar 0,0004 meter, sedangkan pada *Terrestrial Laser Scanner* sebesar 0,003 meter. Maka dari hasil *residual error* koordinat *easting* pada masing masing model, didapatkan nilai *RMS Error* pada *Low-Cost LiDAR* sebesar 0,068 meter dan pada *Terrestrial Laser Scanner* sebesar 0,007 meter. Sehingga dari hasil perhitungan *RMS Error* tersebut data yang diperoleh dari *Terrestrial Laser Scanner* memiliki akurasi yang lebih baik dari *Low-Cost LiDAR* pada koordinat *easting*.

Nilai rata-rata dari *residual error* pada koordinat elevasi untuk *Low-Cost LiDAR* sebesar -0,009 meter, sedangkan *Terrestrial Laser Scanner* sebesar 0,009 meter. Maka dari hasil tersebut didapatkan nilai *RMS Error* pada *Low-Cost LiDAR* sebesar 0,025 meter dan pada *Terrestrial Laser Scanner* sebesar 0,012 meter. Sehingga dari hasil perhitungan *RMSE* tersebut data dari *Terrestrial Laser Scanner* memiliki akurasi yang lebih baik dari *Low-Cost LiDAR* pada koordinat elevasi.

7. Analisis Ketelitian Dimensi Panjang Model 3D

Ketelitian dimensi panjang pada model 3D dapat ditentukan dengan cara membandingkan panjang objek yang sebenarnya dengan panjang objek yang dihasilkan pada model 3D. Kemudian, dilakukan analisis terkait ketelitian menggunakan metode omisi-komisi untuk mengetahui presentase ketelitian model 3D.

Tabel 4. Hasil persentase ketelitian dimensi panjang

Segmen Garis	Low-Cost LiDAR (%)	TLS (%)
S1	98,16%	99,47%
S2	97,08%	99,20%
S3	97,84%	97,84%
S4	98,40%	98,40%
S5	98,96%	99,22%
S6	97,43%	99,23%
S7	99,40%	100%
S8	97,78%	100%
S9	100%	98,98%
S10	99,40%	99,85%

Dari 10 sampel yang digunakan, nilai selisih dari kedua alat yaitu *Low-Cost LiDAR* dan *Terrestrial Laser Scanner* cukup kecil dimana persentase akurasi berada di atas 95%, sehingga menunjukkan hasil model 3D tersebut mendekati valid. Menurut peraturan yang dikeluarkan oleh Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018, hubungan antara tingkat ketelitian dan skala diukur melalui perhitungan CE90. Nilai CE90 pada *Low-Cost LiDAR* didapatkan sebesar 0,188 meter. Sedangkan, *Terrestrial Laser Scanner* nilai CE90 didapatkan sebesar 0,02 meter.

Hasil uji akurasi juga diklasifikasikan berdasarkan standar *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)* Tahun 2023. Standar ini mempertimbangkan *Nominal Pulse Density (NPD)* dan *Nominal Pulse Spacing (NPS)* untuk menilai intensitas dan densitas *point cloud* dengan menggunakan perhitungan *RMS Error* elevasi. *RMS Error* elevasi yang terdapat pada *Low-cost LiDAR* dengan nilai 0,025 meter atau 2,5 cm diperoleh minimal *Nominal Pulse Density (NPD)* sebesar ≥ 16 (pts/m²) dan minimal *Nominal Pulse Spacing (NPS)* sebesar $\leq 0,25$ (m) sehingga didapatkan minimal ukuran area sebesar 4,000 (m²). Sedangkan *RMS Error* elevasi yang terdapat pada *Terrestrial Laser Scanner* dengan nilai 0,012 meter atau 1,2 cm diperoleh minimal *Nominal Pulse Density (NPD)* sebesar ≥ 16 (pts/m²) dan minimal *Nominal Pulse Spacing (NPS)* sebesar $\leq 0,25$ (m) sehingga didapatkan minimal ukuran area sebesar 4,000 (m²).

Kesimpulan

Pada akuisisi data menggunakan *Low-Cost LiDAR* metode *scanning* yang digunakan adalah secara dinamis sehingga dihasilkan 8.234.112 titik, sedangkan TLS menggunakan *scanning* statis menghasilkan 1.359.463.159 titik. Pengukuran panjang candi dilakukan dengan membandingkan 10 sampel dari model 3D. Titik kontrol koordinat GCP dan ICP dilakukan menggunakan GPS Geodetik dan total station *reflectorless* dengan penempatan 9 titik GCP dan 13 titik ICP di sisi candi. Hasil pengukuran menunjukkan kesalahan sudut horizontal sebesar 4", kesalahan linier 0.0000768 meter, dan kesalahan beda tinggi vertikal -0.1295 mm, yang semuanya berada dalam batas toleransi. Setelah proses pengolahan data, *Low-Cost LiDAR* menghasilkan 6.099.712 titik dan TLS menghasilkan 17.283.274 titik. Visualisasi 3D yang dihasilkan oleh TLS lebih detail dibandingkan dengan *Low-Cost LiDAR*. *RMS Error* pada proses *georeference* untuk *Low-Cost LiDAR* adalah 19,3 cm, sementara untuk TLS adalah 0,5 cm, di mana hanya TLS yang memenuhi batas toleransi. *Point cloud* dari *Low-Cost LiDAR* memiliki intensitas dan densitas lebih rendah akibat jumlah pulsa laser yang dipancarkan lebih sedikit. Uji t-student menunjukkan tidak terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan secara statistik antara *Low-Cost LiDAR* dan TLS. Meskipun *Low-Cost LiDAR* menunjukkan potensi dalam pemodelan 3D dengan akurasi panjang objek di atas 95%.

Ucapan Terimakasih

Penulis A.S.R. menyampaikan terima kasih kepada Balai Pelestarian Kebudayaan (BPK) Wilayah XI Jawa Timur dan PT Sonar Nusantara Utama yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini.

Referensi

- Gillihan, R. N. (2008). *Accuracy Comparisons of Iphone 12 Pro Lidar Outputs*.
Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan. (2017). Modul pelestarian cagar budaya. *Kementerian Pendidikan Dan Kebudayaan*.
- Safira, F., Salim, T. A., & Rahmi, R. (2020). Peran Arsip Dalam Pelestarian Cagar Budaya Di Indonesia: Sistematisa Review. *Jurnal Dokumentasi Dan Informasi*.
- Soetaat. (2009). *Pengantar LiDAR: Konsep, Proyek, dan Aplikasi*. Universitas Gajah Mada Press.
- Syaifulloh, M., & Wibowo, B. (2020). *Benda Cagar Budaya: Potensi Wisata & Ekonomi Kreatif Masyarakat Kota Pontianak*.
- Tambunan, A. (2022). Analisis Pemanfaatan LiDAR Pada iPhone Untuk Menunjang Kebutuhan Pemodelan Tiga Dimensi. *Research Repository - ITERA*.
- Wang, B., Lan, J., & Gao, J. (2022). *LiDAR Filtering in 3D Object Detection Based on Improved RANSAC*.



This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).