

## Pembuatan Model 3D dengan Memanfaatkan Teknologi Drone Lidar Untuk Pemetaan Situs Cagar Budaya Candi Garuda

Erlyna Nour Arrofiqoh<sup>1,\*</sup>, Rochmad Muryanto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Departemen Teknologi Kebumian, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

### Article Info

#### Article history:

Received August 18, 2023

Accepted October 10, 2023

Published November 6, 2023

#### Keywords:

Cultural heritage  
Prambanan temple  
Drones  
Lidar  
Pointcloud

### ABSTRACT

Garuda Temple is one of the temples located in the Prambanan Temple complex. Prambanan Temple is a Hindu temple in Indonesia which is listed as a world heritage site by UNESCO. The location of the temple is near the Opak fault zone so it is prone to damage when an earthquake occurs. To support temple preservation, regular monitoring and documentation of temple buildings is required. One method for monitoring and updating the condition of cultural heritage quickly and efficiently is by using unmanned aircraft or drones. As technology develops, the sensors used for observation become increasingly diverse. Drones can not only carry camera sensors but can also carry LiDAR sensors. This research tries to make observations using drone technology carrying camera sensors and LiDAR to obtain a 3D model of the Garuda Temple which is located in the Prambanan Temple cultural heritage area. The aim of this research activity is to create a 3D model with a combination of data originating from a combination of LiDAR sensors and camera sensors which are processed using the SfM (Structure from Motion) technique. The study results show that pointclouds from different sensors have different characteristics. Each pointcloud has advantages and disadvantages. The combination of pointcloud can improve the reconstruction results of the 3D model of Garuda Temple which has a unique character, namely tall, tapered architecture and lots of details.



### Corresponding Author:

Erlyna Nour Arrofiqoh,  
Departemen Teknologi Kebumian,  
Universitas Gadjah Mada,  
Sekip Unit 1, Caturtunggal, Depok, Sleman, D.I. Yogyakarta, 55281, Indonesia.  
Email: \*erlyna\_na@ugm.ac.id

## 1. PENGANTAR

Candi Prambanan merupakan candi agama Hindu terbesar di Indonesia dan tercatat menjadi salah satu warisan dunia oleh UNESCO pada tahun 1991 [1]. Letak Candi Prambanan berada di dekat pergerakan lempeng tektonik aktif yaitu sesar Opak yang membuat wilayah ini memiliki kerentanan tinggi terhadap kerusakan ketika terjadi gempa bumi [2]. Oleh karena itu, warisan budaya ini perlu dirawat dan dilestarikan keberadaannya karena memiliki nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan, pendidikan, agama, dan kebudayaan. Pelestarian Candi Prambanan sebagai cagar budaya dilakukan dengan cara mempertahankan keberadaan cagar budaya dan nilainya melalui perlindungan, pengembangan, dan pemanfaatan yang bertujuan untuk meningkatkan harkat dan martabat bangsa serta memperkuat kepribadian bangsa [3].

Pada area kompleks Candi Prambanan terdapat beberapa candi. Kompleks Candi Prambanan terdiri dari tiga Candi Trimurti (candi Siwa, candi Wisnu, dan candi Brahma) dan tiga Candi Wahana (candi Nandi, candi Garuda, dan candi Angsa). Pemodelan Candi Prambanan merupakan salah satu upaya untuk melestarikan cagar budaya. Pendokumentasian bangunan cagar budaya merupakan langkah awal yang paling penting dalam konservasi dan pengelolaan yang berkelanjutan [4]. Manfaat pendokumentasian warisan budaya antara lain untuk mentransfer warisan budaya ke generasi masa depan, membuat bangunan sejarah lebih terawat sesuai

dengan bentuk aslinya, memperoleh data untuk perencanaan masa depan, menemukan permasalahan pada bangunan atau monumen bersejarah, dan mengakuisisi pengetahuan tentang sejarah warisan budaya.

Teknologi pesawat tanpa awak atau drone untuk melakukan pengamatan dengan membawa sensor kamera merupakan salah satu cara untuk mendapatkan gambaran mengenai kondisi Candi Prambanan. Dewasa ini, semakin berkembangnya teknologi, tidak hanya sensor kamera saja yang dapat dibawa oleh drone, tetapi dapat juga membawa sensor LiDAR sekaligus dalam satu wahana [5], [6]. LiDAR adalah teknologi yang menerapkan sistem penginderaan jauh sensor aktif untuk menentukan jarak dengan memancarkan sinar laser yang dipasang pada wahana pesawat. Jarak didapatkan dengan menghitung waktu antara sinar laser yang dipancarkan dari sensor ke objek sampai diterima kembali oleh sensor [7]. Teknologi LiDAR dapat menggabungkan pengukuran jarak pancaran laser inframerah dari alat ke objek dan teknologi GNSS/IMU untuk mendapatkan koordinat 3D (X,Y,Z). Penggunaan LiDAR untuk survei pemetaan secara konvensional biasanya memakai wahana pesawat terbang berawak karena ukuran alat dan perlengkapan LiDAR perlu membutuhkan ruangan yang cukup besar [8], [9]. Sehingga pengukuran menggunakan LiDAR membutuhkan biaya dan waktu yang tidak sedikit. Seiring dengan perkembangan teknologi, sensor LiDAR semakin dibuat lebih kecil sehingga dapat dimuat di dalam pesawat tanpa awak atau drone dan pengukuran dapat dilakukan dengan lebih efisien [10]. Output dari teknologi LiDAR ini berupa titik awan yang disebut dengan *pointcloud* [11]. Kumpulan dari *pointcloud* ini dapat membentuk model 3D yang memiliki tingkat presisi yang tinggi. *Pointcloud* dari sensor LiDAR diperoleh secara langsung tanpa melalui proses pengolahan data seperti pada pemotretan udara dengan sensor kamera.

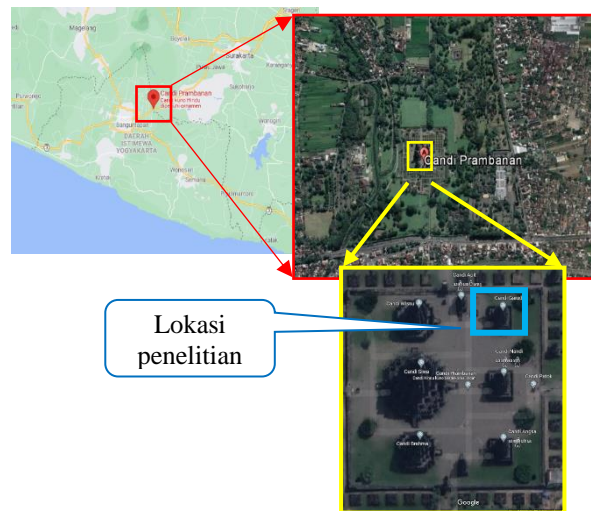
Teknik pengolahan foto hasil akuisisi drone yang membawa sensor kamera dilakukan dengan menggunakan metode SfM (*Structure from Motion*) [12], [13]. Metode ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan titik 3D *pointcloud* menggunakan foto dari kamera [14], [15]. Pembuatan model 3D bangunan warisan budaya dengan menggunakan drone pernah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan metode yang berbeda. Penelitian sebelumnya pernah memodelkan Candi Singosari di Jawa Timur secara 3D menggunakan fotogrametri udara dengan drone tipe DJI Phantom 2 dan pengukuran fotogrametri terestrial dengan menggunakan jenis kamera yang sama untuk mendokumentasikan Candi Singosari [16]. Penelitian lain pernah memodelkan bangunan masjid Hasbey Dar'ülhuffaz di Turki tetapi menggunakan jenis kamera yang berbeda yaitu Nikon D90 untuk fotogrametri terestrial dan DJI Phantom 4 untuk fotogrametri udara [17]. Hasil kedua metode akuisisi tersebut berhasil memperoleh model 3D namun waktu yang diperlukan untuk akuisisi data dan pengolahan data cukup lama serta kurang efisien. Pembuatan model 3D bangunan kastil Delizia Estense del Verginese di Italia juga pernah dilakukan menggunakan fotogrametri udara dengan drone saja tanpa menggabungkannya dengan data fotogrametri terestrial. Akuisisi data diambil secara vertikal (atas) dan oblique (miring) dari sisi bagian utara, selatan, timur dan barat bangunan secara terpisah kemudian digabungkan [18]. Hasil penelitian tersebut dapat menghasilkan model 3D secara lengkap dan menyeluruh dengan lebih cepat dari metode sebelumnya namun untuk ketelitian geometrinya sangat bergantung pada banyaknya GCP (*Ground Control Point*) serta kualitas foto hasil pemotretan.

Penelitian ini menggunakan metode yang berbeda dengan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, dimana teknologi drone banyak digunakan untuk memodelkan bangunan yang cukup sederhana dan tidak terlalu memiliki banyak detil [19], [20]. Pada penelitian ini akan mengkaji potensi teknologi drone pembawa sensor kamera dan LiDAR untuk pembuatan model 3D dalam pendokumentasian bangunan bersejarah, khususnya di Candi Garuda di Kompleks Candi Prambanan yang memiliki karakter bangunan tinggi, meruncing dan banyak detil. Penelitian ini juga mengkaji hasil *pointcloud* yang diperoleh dari dua jenis drone yaitu MDMapper 1000DG Microdrones yang membawa sensor kamera dan LiDAR dimana proses akuisisinya dilakukan secara nadir atau dari posisi bagian atas bangunan candi dan DJI Phantom 4 Pro yang membawa sensor kamera dimana proses akuisisinya dilakukan secara *oblique* mengelilingi tubuh candi atau dari sisi samping candi. *Pointcloud* yang diperoleh berasal dari tiga sumber, yaitu *pointcloud* LiDAR dan *pointcloud* hasil pengolahan foto udara dari sensor kamera pada alat MDMapper 1000DG Microdrones dan *pointcloud* hasil pengolahan foto udara dari sensor kamera pada alat DJI Phantom 4 Pro. Ketiga data *pointcloud* ini dibandingkan dan kemudian dikombinasikan sehingga terbentuk model 3D untuk dokumentasi bangunan bersejarah. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui potensi dari teknologi drone LiDAR untuk pembuatan model 3D khususnya situs cagar budaya di kawasan Candi Prambanan yaitu Candi Garuda yang terletak di halaman utama bagian paling utara sisi bagian timur.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Lokasi Penelitian

Bangunan cagar budaya yang dimodelkan pada penelitian ini adalah Candi Garuda yang berada di kompleks Candi Prambanan. Lokasi penelitian terletak di Jalan Raya Jogjakarta-Solo Km 17 desa Prambanan, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman, D.I. Yogyakarta. Lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian (<https://www.google.co.id/maps>)

## 2.2. Peralatan dan Bahan Penelitian

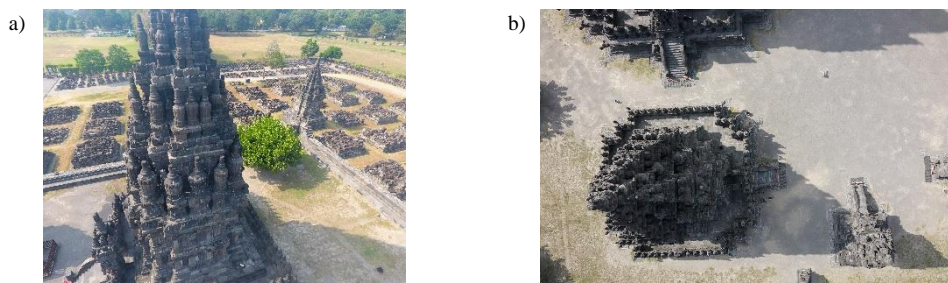
Akuisisi data dilakukan pada bulan Agustus 2020 dengan menggunakan dua jenis pesawat nir awak. Peralatan yang digunakan pada penelitian adalah drone MDMapper 1000DG Microdrones pembawa sensor LiDAR dan kamera untuk akuisisi pada bagian atas candi dan drone DJI Phantom 4 Pro pembawa sensor kamera untuk akuisisi tubuh candi secara oblique, drone bergerak dalam lintasan melingkar mengelilingi candi Garuda. Spesifikasi dari alat tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Alat

Parameter	Drone	Drone LiDaR
Nama	DJI Phantom 4 Pro	MDMapper 1000DG Microdrones
Resolusi Kamera	20 MP	42,4 MP
Resolusi Citra	4000 x 3000	7952 x 5304
Focal Length	24 mm	45 mm
Berat	1388 g	5870 g
Laser Scanner	Tidak ada	SICK 19500 point/sec
Proses akuisisi Gambar	Oblique (mengelilingi objek)	Nadir (dari sisi atas objek)

Sumber: <https://www.dji.com>, <https://www.microdrones.com>

Jumlah foto yang diambil menggunakan drone DJI Phantom 4 Pro untuk pemotretan tubuh candi sebanyak 220 foto dan menggunakan drone MDMapper 1000DG Microdrones untuk pemotretan dari atas sebanyak 265 foto. Contoh hasil akuisisi foto udara dari drone tersebut ditampilkan pada Gambar 2.

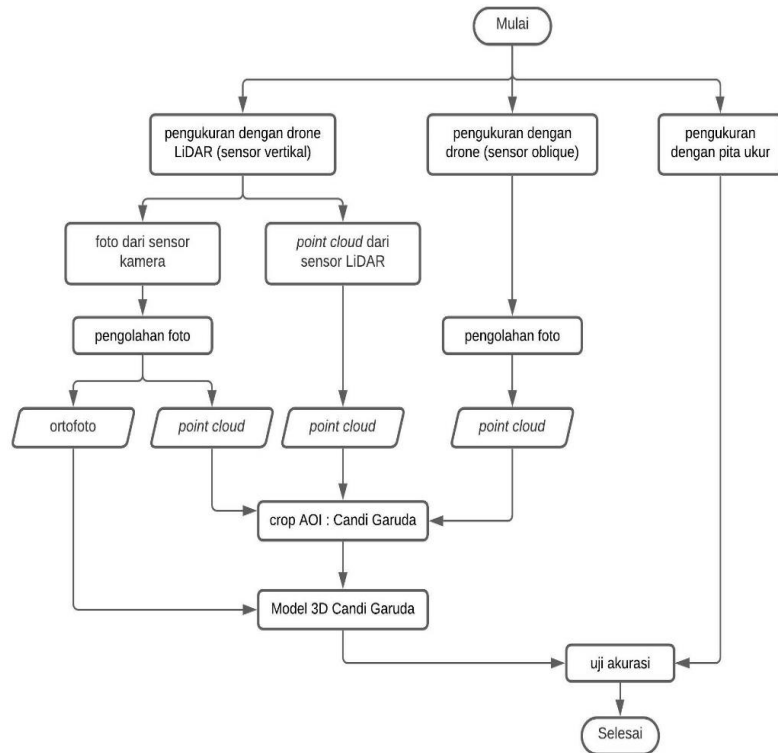


Gambar 2. a) Contoh foto yang diambil dengan DJI Phantom 4 Pro, b) Contoh foto yang diambil dengan MDMapper 1000DG Microdrones (Sumber. Data akuisisi lapangan)

## 2.3. Tahapan dan Proses Penelitian

Secara umum diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 3. Pengolahan foto dilakukan dengan menggunakan software Agisoft Metashape Pro. Pengolahan foto dilakukan pada foto udara yang diambil dari

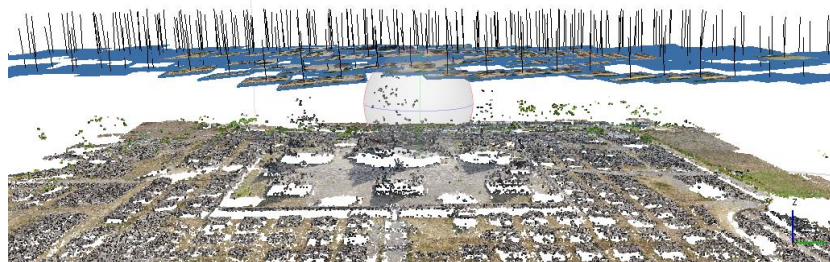
sisi atas (secara vertikal) dan foto udara yang diambil dengan lintasan memutar di candi Garuda (dari sisi samping).



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Pengolahan foto dari sisi atas dan sisi samping diproses melalui tahapan yang sama. Tahap pertama pemrosesan foto udara adalah *align photo*. Pada proses ini diperoleh *pointcloud* dari foto yang saling bertampalan. Kemudian proses *build dense*, yang merupakan perapatan dari *pointcloud* tersebut. *Pointcloud* yang sudah lebih rapat dilakukan tahapan *build mesh* untuk membuat permukaan objek sehingga terbentuk sebuah model. *Pointcloud* yang rapat dari hasil proses *build dense* kemudian diekspor. Gambar 4 menampilkan proses *align photo* dan *build dense* pada foto yang diambil dari sisi atas.

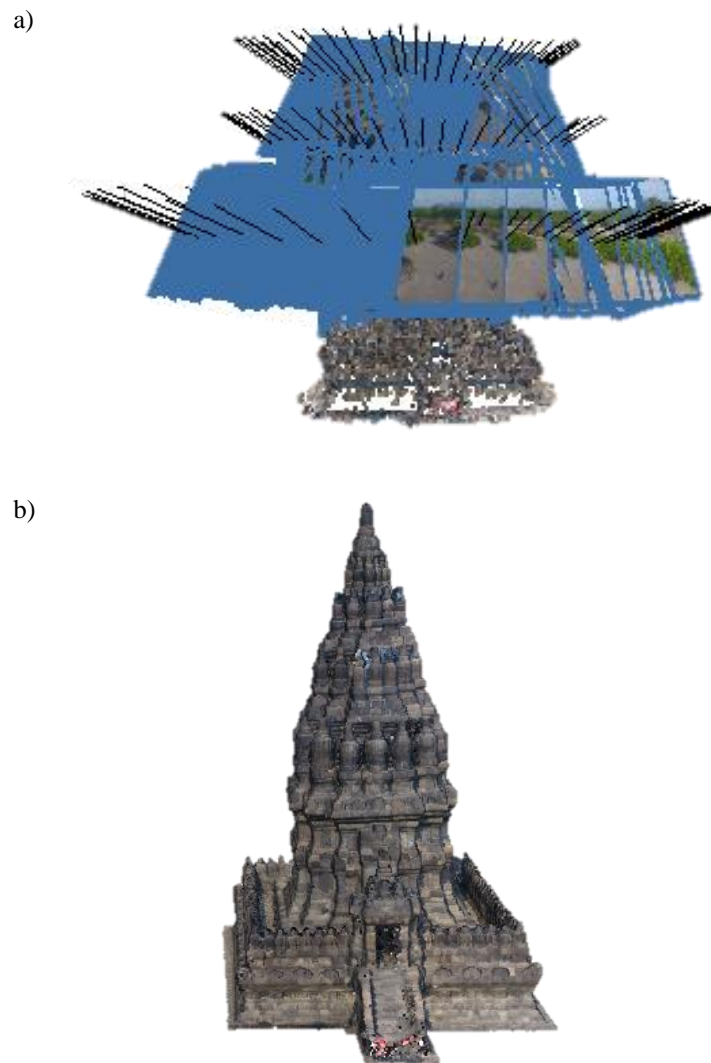
a)



b)



Gambar 4. Tahapan pengolahan foto udara dari sisi atas (a) proses *align photo* dan (b) proses *build dense*  
 Gambar 5 di bawah ini menampilkan proses *align photo* dan *build dense* pada foto yang diambil dari sisi samping.



Gambar 5. Tahapan pengolahan foto udara dari sisi samping (a) proses *align photo* dan (b) proses *build dense*

Pada pengolahan foto udara dari sisi atas, terdapat beberapa detil yang tidak terbentuk dengan sempurna karena minimnya sudut pengambilan gambar, terutama pada bagian puncak dan bagian tengah candi. Pada pengolahan foto dari sisi samping, detil candi terlihat lebih baik dan keseluruhan tubuh candi dapat terbentuk. Analisis perbandingan dan penggabungan *pointcloud* LiDAR dan *pointcloud* foto dilakukan dengan menggunakan software CloudCompare. Kemudian dibuat bentuk permukaan model 3D. Ketelitian geometri dari model kemudian dibandingkan dengan pengukuran langsung menggunakan pita ukur.

### 3. HASIL DAN ANALISIS

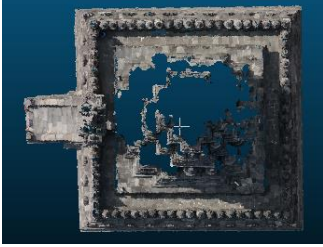
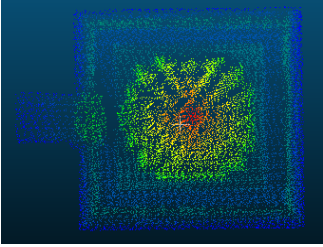

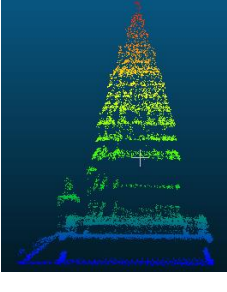
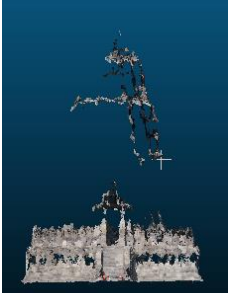
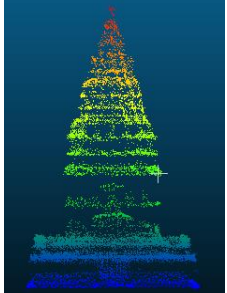
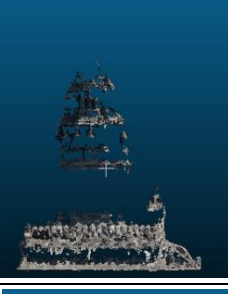
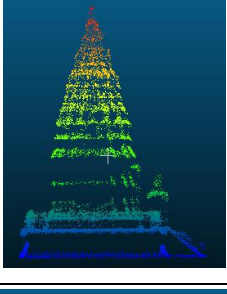
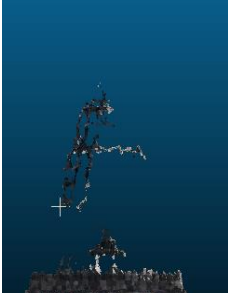
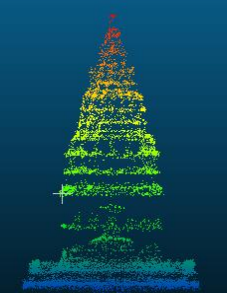
#### 3.1. Perbandingan *pointcloud* LiDAR dan *pointcloud* pengolahan foto udara pada wahana MDMapper 1000DG Microdrones

Penelitian tentang hasil akuisisi *pointcloud* pada UAV MDMapper 1000DG Microdrones secara nadir dengan sensor LiDAR dan sensor kamera yang pernah dilakukan oleh Arrofiqoh et al. (2022) untuk pembuatan peta 2D skala besar menunjukkan jumlah *pointcloud* yang diperoleh dari sensor kamera lebih banyak dibandingkan dengan jumlah *pointcloud* dari sensor LiDAR, namun secara geometri *pointcloud* dari sensor LiDAR lebih merepresentasikan bentuk candi dibandingkan dengan *pointcloud* dari sensor kamera. Pada sensor kamera, beberapa *pointcloud* candi tidak terbentuk secara sempurna karena kurangnya pertampalan antar foto [10].

Studi kasus pada penelitian ini dikhususkan pada Candi Garuda, sehingga dilakukan pemotongan *pointcloud* dari satu *scene* kompleks candi Prambanan sehingga hanya terpilih *pointcloud* Candi Garuda.

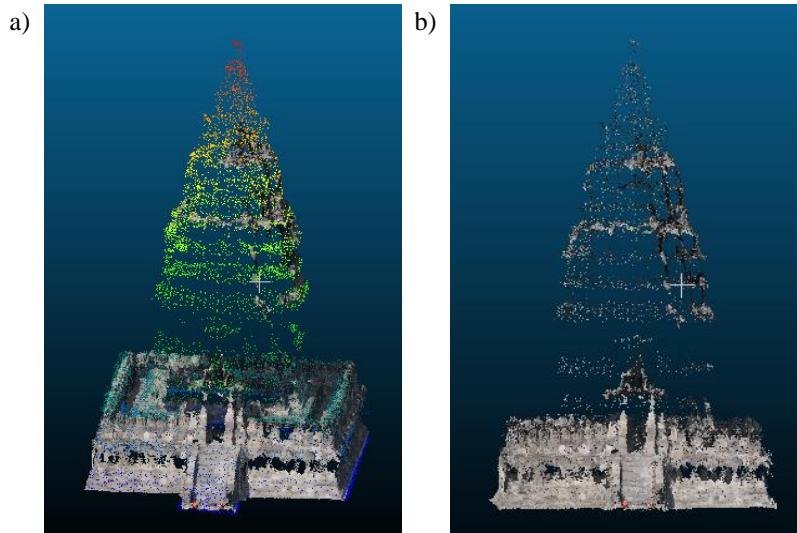
*Pointcloud* Candi Garuda diperoleh dari dua data yaitu *pointcloud* dari LiDAR dan *pointcloud* dari foto udara. Tabel 2 menunjukkan perbedaan visual dari kedua data ini.

Tabel 2. Perbandingan visual *pointcloud* foto udara dan *pointcloud* Lidar secara nadir dengan wahana MDMapper 1000DG Microdrones

Parameter	Foto Udara	LiDaR
Atas		
Utara		
Barat		
Selatan		
Timur		

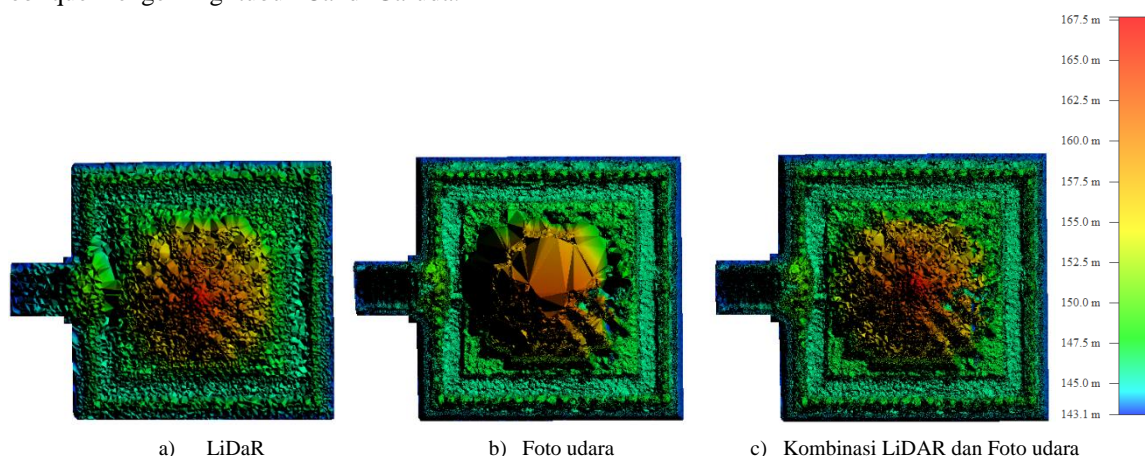
*Pointcloud* LiDAR menunjukkan bagian dari tiap tingkatan pada candi bahkan detail puncak candi dapat diperoleh. Sedangkan pada *pointcloud* foto banyak detail yang tidak dapat terbentuk sehingga datanya kosong. Bagian *pointcloud* foto yang dapat terekam dengan baik hanya pada bagian bawah candi. *Pointcloud* foto tidak

terbentuk secara lengkap karena foto kurang overlap dan tekstur gambar yang kurang memadai sehingga pembentukan *tie point* saat pengolahan foto menjadi kurang maksimal. LiDAR tidak terpengaruh oleh hal tersebut, LiDAR akan tetap merekam data apapun ketika laser mengenai permukaan suatu objek. Kelebihan dari *pointcloud* foto yaitu menghasilkan data yang memiliki warna, sedangkan data LiDAR tidak dapat menyimpan warna objek. Warna pada *pointcloud* LiDAR dapat diberikan dengan mengambil warna dari foto seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kombinasi dari *pointcloud* LiDAR dan *pointcloud* foto yang diambil secara nadir a) *pointcloud* LiDAR sebelum dilakukan pewarnaan b) *pointcloud* LiDAR sesudah dilakukan pewarnaan

Hasil visualisasi model elevasi dari *pointcloud* LiDAR dan *pointcloud* foto yang diambil secara nadir ditunjukkan pada Gambar 7. Dari penampakan sisi atas, *pointcloud* LiDAR dapat mengisi keseluruhan bangunan candi namun model dihasilkan kurang halus karena *pointcloud* LiDAR kurang memiliki densitas yang padat dan jarak titik yang cenderung tidak beraturan. Sedangkan *pointcloud* foto memiliki densitas yang rapat dan teratur sehingga permukaan model yang terbentuk akan halus, namun karena kurangnya foto yang overlap, terdapat bagian candi yang tidak dapat terbentuk dengan baik. Resolusi spasial model elevasi pada data foto lebih tinggi dibandingkan dengan data LiDAR. Data foto menghasilkan resolusi 0,004 meter dan data LiDAR menghasilkan resolusi 0,022 meter. Kedua data *pointcloud* tersebut memiliki kelemahan dan kelebihan. Apabila kedua data *pointcloud* ini dikombinasikan untuk pembuatan model 3D, hasilnya masih belum sempurna, sehingga untuk pembuatan model 3D secara menyeluruh perlu data tambahan untuk bagian permukaan tubuh candi dengan menggunakan drone DJI Phantom 4 Pro yang akusisinya dilakukan secara oblique mengelilingi tubuh Candi Garuda.








Gambar 7. Model elevasi dari *pointcloud* LiDaR dan foto dari atas/nadir

### 3.2. *Pointcloud* pengolahan foto udara pada wahana DJI Phantom 4 Pro

Akusisi data dengan Drone DJI Phantom 4 Pro dilakukan secara oblique mengelilingi tubuh Candi Garuda dengan pertampalan antar foto yang cukup memadai sehingga *pointcloud* yang terbentuk dapat lebih rapat dan

dapat menampilkan bentuk Candi Garuda secara menyeluruh. Hasil *pointcloud* dari pengolahan foto udara tersebut ditampilkan pada Tabel 3.

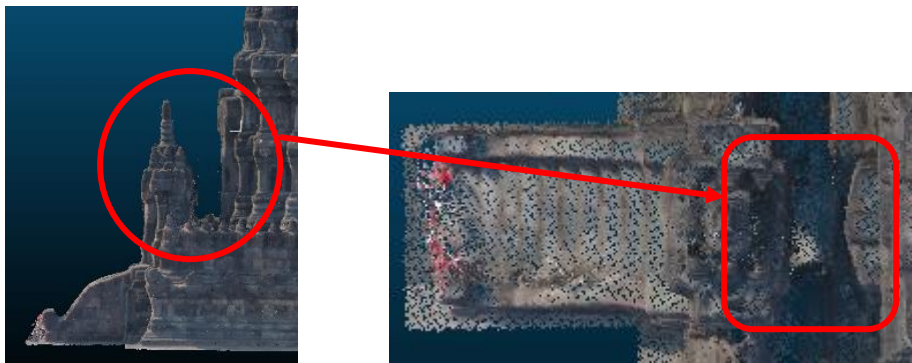
Tabel 3. Perbandingan visual *pointcloud* foto udara secara oblique dengan wahana DJI Phantom 4 Pro

Parameter	Foto Udara
Atas	
Utara	
Barat	
Selatan	
Timur	

Oleh karena bentuk Candi Garuda cukup kompleks dan banyak detail, hasil akuisisi dari pengolahan foto udara secara oblique masih menunjukkan adanya kelemahan, yaitu adanya *pointcloud* yang tidak terbentuk



terutama pada bagian objek yang tertutupi oleh objek lain saat akuisisi data seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Contoh area yang tidak terbentuk *pointcloud*nya karena terdapat objek yang menutupi area tersebut saat akuisisi data

### 3.3. 3D Model Candi Garuda

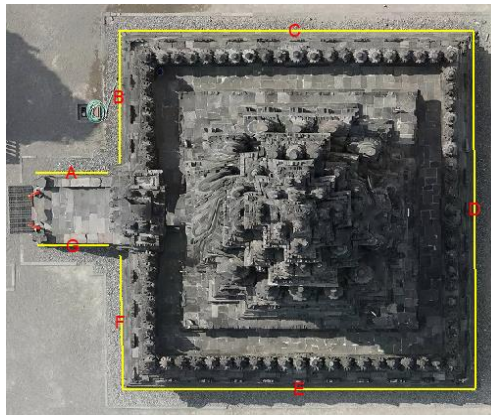
Drone MDMapper 1000DG Microdrones melakukan akuisisi data hanya dari sisi atas bangunan candi sehingga apabila akan dibuat model 3D hasilnya kurang baik walaupun sudah mengkombinasikan data dari sensor LiDAR dan sensor kamera. Oleh karena itu diperlukan akuisisi data dari bagian tubuh candi yang dalam hal ini diperoleh dari drone DJI Phantom 4 Pro dengan sensor kamera yang diterbangkan mengelilingi tubuh candi atau dari sisi samping candi. Hasil pengolahan foto dilakukan dengan menggunakan teknik SfM. Algoritma SfM efisien untuk rekonstruksi bentuk objek dan tingkat detail 3D dari *pointcloud* tergantung pada kualitas gambarnya. Semakin banyak sudut pengambilan gambar, overlap antar foto yang memadai, foto memiliki pencahayaan yang baik dan tidak blur maka hasil dari pengolahan foto akan lebih baik. Kelemahan utama dari algoritma SfM adalah pembentukan geometri objek. Algoritma SfM tidak dapat merestorasi skala absolut, posisi, orientasi suatu objek kecuali jika ada titik kontrol sehingga hasil dari pengolahan foto dapat memiliki ukuran yang sedikit berbeda dengan ukuran yang sebenarnya. *Pointcloud* dari LiDAR memiliki ketelitian spasial yang lebih tinggi karena telah tergeoreferensi dan dapat menembak langsung ke permukaan candi sehingga *pointcloud* LiDAR dapat untuk mengoreksi ukuran geometri bentuk bangunan candi dari hasil *pointcloud* pengolahan foto. Keseluruhan hasil *pointcloud* Candi Garuda dari ketiga metode tersebut kemudian dikombinasikan sehingga diperoleh bentuk model 3D dari bangunan Candi Garuda secara menyeluruh, tampilannya lebih halus, dan detail permukaan candi dapat dimodelkan dengan lebih baik seperti yang disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Model 3D bangunan Candi Garuda

Pengujian terhadap bentuk geometri bangunan candi Garuda dilakukan untuk menguji seberapa akurat ukuran dimensi dari hasil pemodelan 3D dengan ukuran yang sebenarnya. Tabel 4 menyajikan hasil ukuran

lapangan pada sampel candi Garuda dengan menggunakan pita ukur di lapangan. Selisih rata-rata keseluruhan ukuran adalah 0,0157 meter.



Gambar 10. Sketsa hasil ukuran lapangan

Tabel 4. Hasil ukuran lapangan

Parameter	Ukuran Lapangan (m)	Ukuran model 3D (m)	Selisih (m)
A	2,93	2,92	0,01
B	5,34	5,32	0,02
C	14,32	14,30	0,02
D	14,34	14,30	0,04
E	14,32	14,31	0,01
F	5,34	5,33	0,01
G	2,92	2,92	0
<b>Selisih rata -rata</b>			<b>0,0157</b>

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini memperkenalkan potensi teknologi LiDAR yang dipasang pada wahana drone untuk pemodelan bangunan cagar budaya, dimana bangunan yang dimodelkan memiliki karakteristik yang unik yaitu bangunan yang tinggi, banyak detail dengan atap bangunan yang meruncing. Penggunaan kombinasi sensor kamera dan LiDAR dalam satu wahana yang dipasang secara nadir dapat menghasilkan data ortofoto dan *pointcloud* sekaligus dalam sekali akuisisi lapangan sehingga dapat lebih efisien dari sisi waktu dan biaya serta cocok untuk pembuatan peta 2D skala besar, namun untuk pemodelan 3D penggunaan data LiDAR dengan sensor yang dipasang secara nadir kurang dapat merepresentasikan bentuk candi secara utuh, sehingga diperlukan akuisisi dari bagian samping tubuh candi. Ketelitian geometrik bentuk bangunan candi dari data kombinasi *pointcloud* LiDAR dan foto menunjukkan hasil yang cukup baik ditandai dengan selisih antara data pengukuran lapangan dan model 3D yang memiliki perbedaan ukuran yang kecil.

Penelitian ini dapat menjadi referensi dalam memilih alternatif survei dalam pendokumentasian warisan cagar budaya yang dapat diterapkan pada skala yang kecil dengan lebih efektif. Teknologi LiDAR dan fotogrametri memiliki banyak keuntungan dalam dokumentasi dan konservasi warisan budaya. Kedepannya, teknologi drone dengan sensor LiDAR yang dapat mengakuisisi data secara tegak (nadir) dan miring (*oblique*) dapat menjadi alternatif yang baik untuk pemodelan 3D bangunan cagar budaya.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Sekolah Vokasi UGM atas bantuan hibah dana penelitian. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada PT Geotronix Indonesia dan Microdrones yang telah memberikan bantuan berupa peralatan untuk akuisisi data dalam pelaksanaan penelitian, serta kepada Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) DIY yang telah memberikan perizinan lokasi penelitian.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Warta et al., "ANALISIS SWOT DALAM PENCANANGAN CANDI PRAMBANAN SEBAGAI PUSAT RITUAL UMAT HINDU SWOT ANALYSIS IN THE DECLARATION OF PRAMBANAN TEMPLE AS A HINDU RITUAL CENTER," 2022.

- [2] T. W. Kuningsih et al., "ANALISIS KETAHANAN TANAH DASAR FONDASI CANDI PRAMBANAN TERHADAP ANCAMAN LIKUIFAKSI BERDASAR SIMPLIFIED PROCEDURE," 2017.
- [3] Presiden Republik Indonesia, "Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2010," Jakarta, 2010.
- [4] J. Sánchez and E. Quirós, "Semiautomatic detection and classification of materials in historic buildings with low-cost photogrammetric equipment," *J Cult Herit*, vol. 25, pp. 21–30, 2017, doi: 10.1016/j.culher.2016.11.017.
- [5] V. O. Jonassen, N. S. Kjørsvik, and J. G. O. Gjevestad, "Scalable hybrid adjustment of images and LiDAR point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 202, pp. 652–662, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2023.07.007.
- [6] Y. Li, L. Zhao, Y. Chen, N. Zhang, H. Fan, and Z. Zhang, "3D LiDAR and multi-technology collaboration for preservation of built heritage in China: A review," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 116, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jag.2022.103156.
- [7] J. M. Vilbig, V. Sagan, and C. Bodine, "Archaeological surveying with airborne LiDAR and UAV photogrammetry: A comparative analysis at Cahokia Mounds," *J Archaeol Sci Rep*, vol. 33, no. March, p. 102509, 2020, doi: 10.1016/j.jasrep.2020.102509.
- [8] T. Raj, F. H. Hashim, A. B. Huddin, M. F. Ibrahim, and A. Hussain, "A survey on LiDAR scanning mechanisms," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 5. MDPI AG, May 01, 2020. doi: 10.3390/electronics9050741.
- [9] J. C. Fernandez-Diaz, W. E. Carter, R. L. Shrestha, and C. L. Glennie, "Now you see it... Now you don't: Understanding airborne mapping LiDAR collection and data product generation for archaeological research in Mesoamerica," *Remote Sens (Basel)*, vol. 6, no. 10, pp. 9951–10001, 2014, doi: 10.3390/rs6109951.
- [10] E. N. Arrofiqoh et al., "Pemanfaatan UAV dengan Sensor Kamera dan Lidar untuk Pemetaan Situs Cagar Budaya Kawasan Candi Prambanan Leveraging UAV with Camera and LIDAR sensor for Mapping of Cultural Heritage Sites in the Prambanan Temple Area," vol. 17, no. 2, pp. 176–184, 2022.
- [11] F. Leberl et al., "Point clouds: Lidar versus 3D vision," *Photogramm Eng Remote Sensing*, vol. 76, no. 10, pp. 1123–1134, 2010, doi: 10.14358/PERS.76.10.1123.
- [12] C. A. Jones and E. Church, "Photogrammetry is for everyone: Structure-from-motion software user experiences in archaeology," *J Archaeol Sci Rep*, vol. 30, no. January, p. 102261, 2020, doi: 10.1016/j.jasrep.2020.102261.
- [13] Y. Yang, Y. Shi, X. Liang, T. Huang, S. Fu, and B. Liu, "Evaluation of structure from motion (SfM) photogrammetry on the measurement of rill and interrill erosion in a typical loess," *Geomorphology*, vol. 385, p. 107734, 2021, doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107734.
- [14] S. Green, A. Bevan, and M. Shapland, "A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research," *J Archaeol Sci*, vol. 46, no. 1, pp. 173–181, 2014, doi: 10.1016/j.jas.2014.02.030.
- [15] H.-M. Lu, L.-C. Yao, J.-T. Lin, and S. S. Liu, "DIGITAL HERITAGE AND PRESERVATION: AERIAL PHOTOGRAMMETRY AND LIDAR APPLIED TO THE MAPPING OF KAPAYUWANAN, INDIGENOUS PAIWAN SETTLEMENTS, TAIWAN," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-M-2–2023, pp. 985–993, Jun. 2023, doi: 10.5194/isprs-archives-xxviii-m-2-2023-985-2023.
- [16] H. Hidayat and A. B. Cahyono, "Combined aerial and terrestrial images for complete 3D documentation of Singosari Temple based on Structure from Motion algorithm," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 47, no. 1, pp. 0–11, 2016, doi: 10.1088/1755-1315/47/1/012004.
- [17] A. Şasi and M. Yakar, "Photogrammetric Modelling of Hasbey Dar'Ülhuffaz (Masjid) Using an Unmanned Aerial Vehicle," *International Journal of Engineering and Geosciences*, vol. 3, no. 1, pp. 6–11, 2018, doi: 10.26833/ijeg.328919.
- [18] M. Bolognesi, A. Furini, V. Russo, A. Pellegrinelli, and P. Russo, "Testing the low-cost rpas potential in 3D cultural heritage reconstruction," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 40, no. 5W4, pp. 229–235, 2015, doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-229-2015.
- [19] M. Cramer, N. Haala, D. Laupheimer, G. Mandlburger, and P. Havel, "Ultra-high precision UAV-based LiDAR and dense image matching," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 42, no. 1, pp. 115–120, 2018, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-115-2018.
- [20] Z. M. Firdaus, H. H. Handayani, and H. Hidayat, "Pemanfaatan Data LiDAR dan Foto Udara untuk Pemodelan Kota Tiga Dimensi ( Studi Kasus : Wilayah Surabaya Barat )," *Jurnal Geoid*, vol. 16, no. 1, pp. 80–92, 2020.