PURBAWIDYA
p-ISSN: 2252-3758, e-ISSN: 2528-3618 ■ Terakreditasi SINTA 2
berdasarkan SK Dirjen Riset dan Pengembangan KEMENDIKTISAINTEK Nomor: 10/C/C3/DT.05.00/2025
Vol. 15 (2), November 2026, pp 463 – 478 ■ DOI: https://doi.org/10.55981/purbawidya.2026.13736
© 2026 Author (s) Published by Penerbit BRIN,
(https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0).

PEMANFAATAN FOTOGRAMETERI UDARA DALAM DOKUMENTASI DIGITAL PENDUKUNG PELESTARIAN ARKEOLOGIS SITUS CANDI MUARA TAKUS, RIAU, SUMATRA

Utilisation of Aerial Photogrammetry in Digital Documentation to Support Archaeological Conservation at the Muara Takus Temple Site, Riau, Sumatra

Hanifah Ikhsani[1,2)*], Muhammad Ikhwan[3)], dan Emy Sadjati[3)]
[1]Forestry Department, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km. 12,5, Pekanbaru 28293, Indonesia
[2]Center for Peatland and Disaster Studies (CPDS), Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km. 12,5, Pekanbaru 28293, Indonesia
[3]Forestry Department, Universitas Lancang Kuning
Jl. Yos Sudarso KM.8, Pekanbaru 28266, Indonesia
**Pos-el: hanifah.ikhsani@lecturer.unri.ac.id (corresponding author)*

Naskah diterima: 10 November 2025 - Revisi terakhir: 14 Mei 2026
Disetujui terbit: 15 Mei 2026 - Terbit: 11 November 2026

Abstract

This study examines the application of unmanned aerial vehicle (UAV)-based aerial photogrammetry for digital documentation supporting archaeological preservation at the Muara Takus Temple Site, Riau, Indonesia. High-resolution aerial imagery was acquired using a DJI Phantom 4 UAV at an altitude of 100 m and processed into orthomosaic datasets with a spatial resolution of 2.75 cm/pixel. Geometric accuracy was evaluated through comparisons between photogrammetric measurements and field observations using Root Mean Square Error (RMSE) analysis. The results demonstrate high spatial reliability, with an overall accuracy of 98.67%, indicating that UAV photogrammetry provides precise spatial representations of archaeological structures and surrounding landscape features. The generated data supports detailed spatial interpretation, long-term monitoring, and non-destructive documentation of cultural heritage landscapes. These findings highlight the potential of UAV photogrammetry as an efficient geospatial approach for sustainable archaeological preservation and digital heritage management.

Keywords: *Archaeological Mapping; Digital Heritage; Drone; Spatial Accuracy; Temple; Photogrammetry*

Abstrak

Penelitian ini mengkaji potensi teknologi fotogrametri udara berbasis pesawat tanpa awak sebagai alat presisi untuk dokumentasi dan pelestarian lanskap arkeologi, dengan studi kasus pada Kawasan Candi Muara Takus di Provinsi Riau, Indonesia. Citra udara beresolusi tinggi diperoleh menggunakan dron DJI Phantom 4 pada ketinggian 100 meter, kemudian diuji tingkat ketelitiannya melalui perbandingan hasil ortomosaik, data pengukuran lapangan, dan analisis Root Mean Square Error. Hasil penelitian menunjukkan tingkat presisi geometrik yang tinggi, dengan akurasi keseluruhan mencapai 98,67%, yang menegaskan kemampuan UAV dalam menghasilkan data spasial yang dapat diandalkan untuk aplikasi arkeologi. Penelitian ini mencerminkan pergeseran paradigma dokumentasi warisan budaya dari survei konvensional menuju metode konservasi digital yang efisien dan non-destruktif. Melalui kombinasi fotogrametri dan analisis geospasial, penelitian ini

menegaskan peran teknologi UAV dalam mendukung pelestarian berkelanjutan terhadap situs warisan budaya Indonesia.

Kata kunci: Akurasi Spasial; Candi; Pesawat Nirawak; Fotogrametri; Pemetaan Arkeologi; Warisan Digital

PENDAHULUAN

Provinsi Riau memiliki salah satu situs cagar budaya penting berupa Candi Muara Takus (CMT) yang terletak di Kabupaten Kampar. CMT merupakan peninggalan masa Hindu-Buddha yang diperkirakan telah ada sejak masa Kerajaan Sriwijaya dan dikenal sebagai salah satu candi tertua di Pulau Sumatera (Hidayat, Asmar & Yerizon 2021). CMT sebagai tinggalan budaya material memiliki nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan, pendidikan, agama, dan kebudayaan. Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya, situs cagar budaya merupakan lokasi yang mengandung benda, bangunan, dan/atau struktur cagar budaya sebagai hasil aktivitas manusia atau bukti kejadian pada masa lalu. Keberadaan CMT telah ditetapkan sebagai cagar budaya melalui Surat Keputusan Menteri Kebudayaan dan Pariwisata Nomor KM.9/PW.007/MKP/2003 tanggal 4 Maret 2003.

Pelestarian situs cagar budaya memerlukan dukungan data spasial yang akurat untuk mendokumentasikan kondisi fisik situs dan lingkungan di sekitarnya secara berkala. Dokumentasi spasial tersebut penting dalam mendukung kegiatan pelindungan, pengembangan, dan pemanfaatan cagar budaya sebagaimana diamanatkan dalam Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya. Selain itu, data spasial berperan dalam pemantauan perubahan lingkungan, identifikasi potensi kerusakan, serta pengendalian aktivitas yang dapat memengaruhi keberadaan situs. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mendukung kegiatan pelestarian situs cagar budaya adalah pemanfaatan teknologi informasi geospasial dan pemetaan untuk mengidentifikasi kondisi biofisik dan tutupan lahan di sekitar situs (Efendi, Marinda & Lusiana 2019).

Perkembangan teknologi penginderaan jauh mendorong pemanfaatan Pesawat Udara Tanpa Awak (PUTA) atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dalam kegiatan pemetaan karena mampu menghasilkan data spasial beresolusi tinggi secara cepat dan relatif ekonomis dibandingkan metode pemetaan konvensional (Ulandari, Siswanto, Ruslim & Aquastini 2023). Data foto udara hasil UAV dapat digunakan untuk mendokumentasikan kondisi situs cagar budaya secara detail, termasuk bentuk bangunan, pola lanskap, tutupan lahan, serta hubungan spasial antar elemen pada kawasan situs. Semakin detail data spasial yang dihasilkan, maka semakin besar potensi pemanfaatannya dalam mendukung kegiatan pelestarian dan pemantauan kondisi situs secara berkelanjutan.

Akurasi menjadi salah satu aspek penting dalam pemanfaatan foto udara UAV karena berkaitan dengan tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap kondisi sebenarnya di lapangan (Nugroho, Nababan, Panjaitan & Agus 2024; Nugroho, Azwin & Ikhsani 2025; Purwaningsih, Setiawan, Manessa & Setiadi 2024). Tingkat akurasi foto udara

dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah tinggi terbang UAV yang berkaitan dengan resolusi spasial citra yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perbedaan tinggi terbang UAV menghasilkan resolusi spasial dan tingkat segmentasi objek yang berbeda-beda (Ikhsani, Ikhwan & Lestari 2024; Wulan et al. 2016). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menguji tingkat akurasi foto udara hasil pemetaan UAV pada Situs Candi Muara Takus sebagai dasar penyediaan data spasial yang akurat dalam mendukung kegiatan dokumentasi dan pelestarian situs cagar budaya.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Kawasan CMT yang terletak di Desa Muara Takus, Kecamatan XIII Koto Kampar, Kabupaten Kampar, Provinsi Riau, Indonesia (0° 20' 10" LU dan 100° 38' 32" BT). Kawasan ini mencakup empat bangunan utama, yaitu Candi Tuo, Candi Mahligai, Candi Bungsu, dan Candi Palangka. Candi-candi tersebut merepresentasikan warisan arsitektur dari masa kejayaan Kerajaan Sriwijaya. Secara geografis, CMT berada di wilayah dataran rendah tropis dengan karakteristik lereng landai hingga sedang (sekitar 4–10%) dan ketinggian rata-rata 85–100 meter di atas permukaan laut. Lingkungan sekitarnya didominasi oleh tutupan vegetasi berupa perkebunan, hutan sekunder, serta hamparan padang rumput yang membingkai lanskap candi secara alami. Kombinasi antara unsur topografi dan vegetasi tersebut menciptakan latar ekologis yang khas, sekaligus memperkuat nilai historis dan kultural situs sebagai peninggalan penting peradaban kuno di Sumatra bagian tengah.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu perangkat keras *(Hardware)* dan perangkat lunak *(software)*. Perangkat keras terdiri dari laptop, kamera, dron DJI phantom 4, GPS, peralatan tulis, *tallysheet*, dan patok *ground gontrol point (*GCP*)*. Wahana yang digunakan dalam penelitian ini adalah DJI Phantom 4, yang merupakan wahana jenis *multirotor* (*Quadcopter*). Untuk perangkat lunak terdiri dari *software Agisoft Photoscan, software Global Mapper, software ArcGIS 10.8, Microsoft Excel* 2019 *Microsoft Word* 2019, dan *software Drone Deploy*.

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan proses perencanaan jalur terbang meliputi desain area poligon, menentukan *sidelap* dan *overlap*, menghitung jumlah foto, membuat lokasi *take-off* dan *landing*, serta menggunakan aplikasi *Drone Deploy* untuk merencanakan sesi dan tinggi terbang. Selanjutnya dilakukan kalibrasi Kompas. Kalibrasi kompas menggunakan aplikasi DJI Go 4 dengan tujuan sinyal GPS terhubung dengan PUTA.

Pengukuran objek di lapangan menggunakan GPS Garmin dengan format posisi UTM 47 N, kompas, clino meter, dan meteran. Pada penelitian ini peneliti menggunakan metode *purposive sampling* pada saat mengukur objek-objek yang telah ditentukan dilapangan (Nugroho et al. 2025; Arsyad, Statiswaty, Iradat, Yamin & Sugiyarto 2020; Putra & Fauzy 2017). Pengukuran di lapangan bertujuan untuk mengetahui panjang dan dimensi lebar suatu objek pengukuran.

Pemotretan objek untuk menghasilkan foto udara dilakukan menggunakan

wahana PUTA DJI Phantom 4 yang dilengkapi kamera beresolusi 20 MP. Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh foto objek pengukuran sesuai dengan rencana terbang yang telah disusun. Jalur terbang dibagi menjadi enam bagian dengan arah penerbangan dari barat ke timur dan dari utara ke selatan. Setiap jalur terbang diatur dengan *overlap* sebesar 80% dan *sidelap* 60% pada ketinggian terbang 100 m di atas permukaan tanah di lokasi awal penerbangan. Pengaturan jalur terbang dilakukan menggunakan perangkat lunak DroneDeploy. Pengambilan data dilaksanakan pada siang hari untuk memperoleh kondisi pencahayaan yang optimal dan mengurangi pengaruh bayangan pada citra.

Penelitian ini menggunakan empat buah Ground Control Point (GCP) yang ditempatkan secara merata mengelilingi candi menyerupai poligon yang tertutup. Sebaran GCP tersebut bertujuan meningkatkan ketelitian geometrik ortofoto hasil pemetaan. Penempatan GCP secara merata pada seluruh area pemetaan merupakan metode yang umum digunakan dalam pemetaan fotogrametri UAV. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi horizontal dan vertikal hasil pengukuran. Pengolahan foto udara dilakukan menggunakan aplikasi *Agisoft photoscan*. Pengolahan dimulai dengan *Align photos* yang mensejajarkan foto, mengubah titik-titik yang ada di gambar. Proses selanjutnya adalah *Dense Cloud* untuk menghasilkan model permukaan digital model *terrain* digital dan *orthophoto. Mesh* atau 3D adalah modal untuk membuat *Digital Elevation Model* (DEM), baik *Digital Surface Model* (DSM), *Digital Terrain Model* (DTM) atau *orthophoto*. *Orthophoto* adalah sebuah foto udara yang telah dikoreksi geometris (*orthorectified*). Skala foto menjadi seragam dan dapat dianalisis lebih lanjut pada aplikasi pemetaan.

Uji akurasi dilakukan dengan metode omisi dan komisi (Nugroho et al. 2025; Arsyad et al. 2020; Putra & Fauzy 2017). Omisi merupakan kondisi pada hasil interpretasi lebih panjang, besar atau luas dari pengukuran lapangan. Komisi adalah kondisi pada hasil interpretasi lebih pendek, kecil atau sempit dari pengukuran lapangan Metode omisi dan komisi dihitung dengan Persamaan 1.

$$\text{Akurasi} = \left\{1 - \left[\frac{\Delta}{lapangan}\right]\right\} \times 100\ \% \quad \text{..... Persamaan 1}$$

keterangan:

Δ= Interpretasi foto udara – Lapangan

Selanjutnya dilakukan perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan untuk menghitung tingkat kesalahan atau deviasi rata-rata (Persamaan 2). Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan tingkat akurasi spasial yang lebih tinggi, yang berarti posisi titik hasil pemetaan UAV mendekati data acuan sebenarnya di lapangan.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{UAV,i} - X_{ref,i})^2} \quad \text{..... Persamaan 2}$$

keterangan:

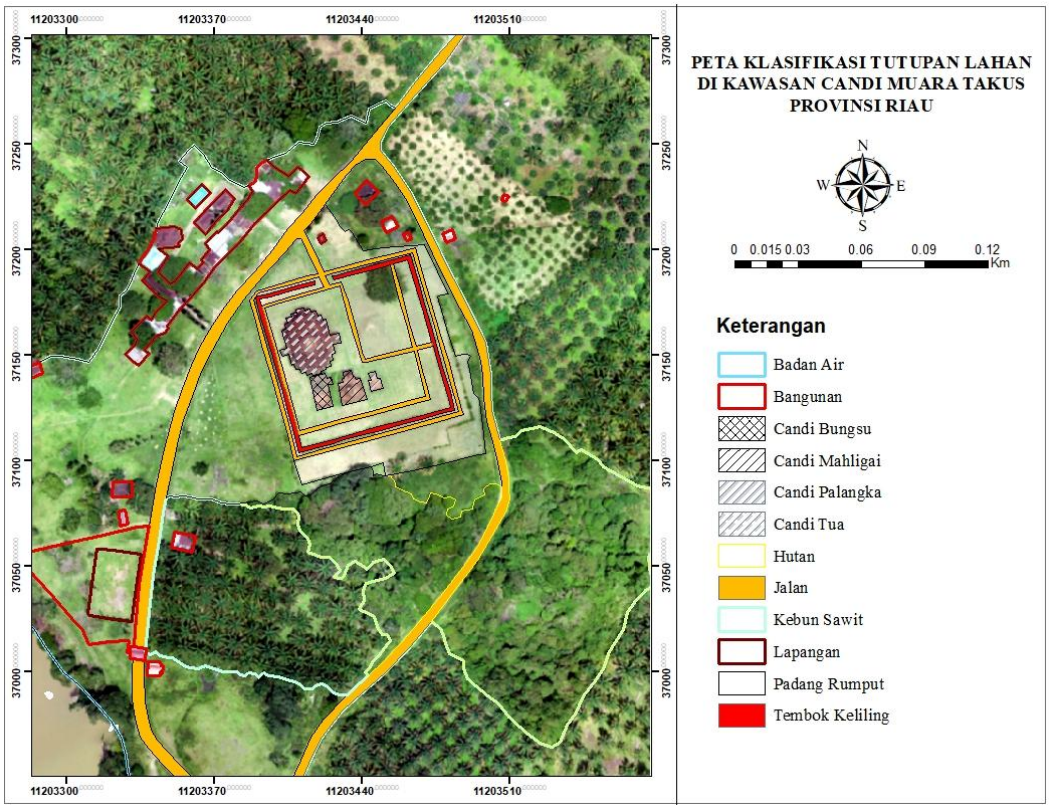
X_{UAV} : hasil pengukuran koordinat dari UAV

X_{ref} : data referensi lapangan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi Tutupan di Kawasan CMT

Kawasan CMT menunjukkan ragam kelas tutupan yang mencerminkan kondisi fisik serta aktivitas manusia di sekitar kawasan percandian. Kelas tutupan yang teridentifikasi meliputi badan air, bangunan, hutan, jalan, kebun sawit, lapangan, padang rumput, dan tembok keliling sebagaimana disajikan pada Gambar 1. Identifikasi kelas tutupan dilakukan menggunakan pendekatan fotogrametri berbasis wahana tanpa awak yang mampu menghasilkan data spasial beresolusi tinggi sehingga objek pada kawasan penelitian dapat dibedakan secara lebih detail. Pendekatan ini memberikan keunggulan dibanding dokumentasi konvensional karena dokumentasi visual biasa umumnya hanya menghasilkan informasi dua dimensi dengan cakupan spasial terbatas. Fotogrametri mampu menghasilkan ortofoto, model tiga dimensi, serta dokumentasi kondisi fisik objek secara lebih rinci dan terukur, sehingga mendukung analisis spasial, konservasi, dan pemantauan perubahan kawasan secara lebih sistematis



Gambar 1. Klasifikasi Tutupan Lahan di Kawasan CMT (Sumber: Ikhsani, 2025)

Pelaksanaan akuisisi data fotogrametri di lapangan menghadapi beberapa kendala, antara lain kondisi cuaca yang berubah cepat, intensitas cahaya yang tidak seragam, serta keberadaan vegetasi tinggi yang berpotensi menutupi sebagian objek pada area percandian. Selain itu, aktivitas pengunjung dan keterbatasan ruang terbang di

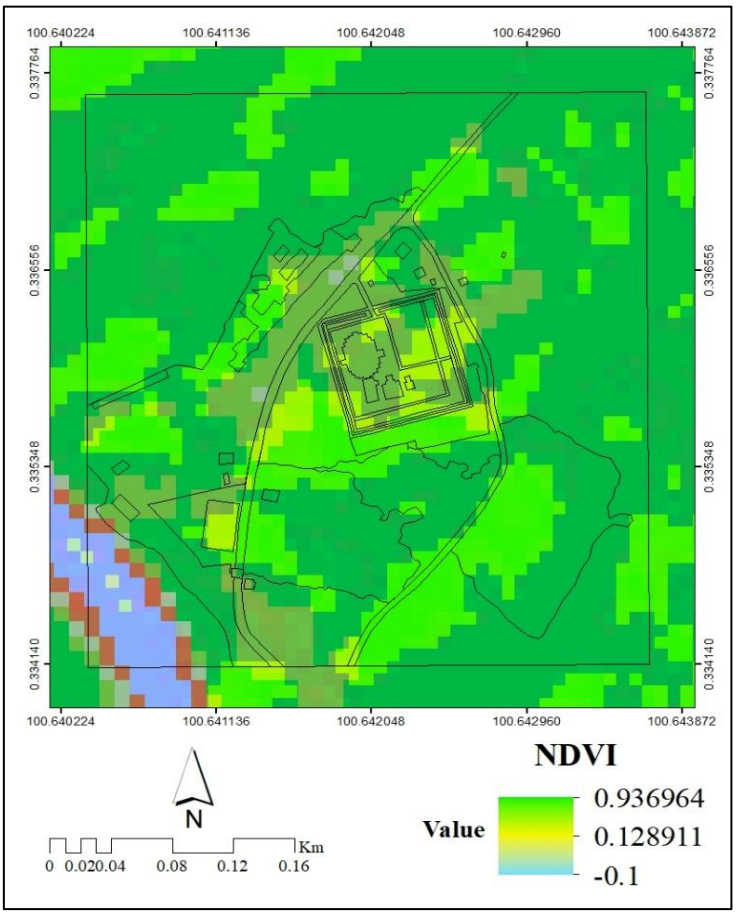
sekitar kawasan cagar budaya turut memengaruhi proses pengambilan citra udara. Kondisi tersebut menyebabkan pengaturan jalur terbang dan waktu akuisisi data harus dilakukan secara cermat agar kualitas citra yang dihasilkan tetap optimal dan memiliki tingkat tumpang tindih yang memadai untuk proses rekonstruksi model permukaan. Tantangan serupa juga dijelaskan oleh Tapinaki, Pateraki, Skamantzari & Georgopoulos (2023), bahwa kualitas citra, kompleksitas objek, serta kebutuhan perangkat lunak dan perangkat keras yang memadai menjadi faktor penting dalam keberhasilan dokumentasi fotogrametri kawasan cagar budaya.

Hasil interpretasi tutupan lahan menunjukkan bahwa keberadaan badan air dan vegetasi alami masih mendominasi kawasan CMT meskipun telah terjadi konversi lahan untuk aktivitas manusia, seperti pembangunan kantin, kantor, pondok, serta pengembangan kebun sawit di sekitar kawasan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa unsur alami pada lanskap kawasan cagar budaya masih relatif terjaga. Dominasi tutupan vegetasi dan keberadaan unsur alami lainnya berperan penting dalam mendukung fungsi ekologis kawasan serta menjaga karakter lanskap cagar budaya. Hal tersebut sesuai dan mendukung bagi upaya konservasi serta pengelolaan lanskap cagar budaya (Adi, Mahanani & Faisal 2023). Tatanan kawasan mendukung pola zonasi di lokasi ini, seperti posisi jaringan jalan dan areal kebun sawit cenderung berlokasi pada tepi zona inti situs, sementara bangunan dan tembok keliling menandai koridor dan area di sekeliling struktur candi. Pola tersebut menandakan konsentrasi aktivitas manusia di sekitar titik akses utama dan pusat kegiatan cagar budaya, sedangkan tutupan hutan dan vegetasi alami mendominasi bagian luar yang fungsinya sebagai zona transisi atau penyangga. Pola ini konsisten dengan konsep zonasi inti, penyangga, dan transisi yang banyak dirujuk dalam studi konservasi warisan dan perencanaan ruang.

Berdasarkan karakteristik kelas tutupan, literatur menunjukkan ciri spektral dan tekstural berbeda yang membantu pemisahan kelas pada citra satelit dan foto resolusi tinggi. Misalnya, kebun sawit biasanya memperlihatkan pola tekstur teratur dan nilai NDVI atau struktur kanopi yang berbeda dari hutan alami sehingga sering memerlukan indeks khusus atau metode pembelajaran mesin untuk membedakannya dari tutupan hutan. Begitu juga badan air dapat dibedakan secara konsisten menggunakan indeks air (NDWI), sedangkan area terbangun dikenali lewat indeks terbangun (NDBI) dan pola geometri bangunan pada citra resolusi tinggi. Pemilihan kombinasi band/spektral indeks dan teknik klasifikasi yang tepat meningkatkan akurasi peta tutupan (Chong, Kanniah, Pohl & Tan 2017).

Dari sisi pengelolaan, peta klasifikasi yang mendetail memberi informasi penting mengenai tekanan terhadap ekosistem alami dan integritas lanskap di sekitar CMT. Perluasan perkebunan dan perubahan fungsi vegetasi alami menjadi areal budidaya dapat mengurangi nilai konservasi, mengubah tatanan ekologis, dan mengancam kelestarian konteks lanskap yang menjadi bagian dari nilai warisan budaya. Oleh karena itu, peta tutupan yang terverifikasi secara akurat memungkinkan pengelola kawasan merumuskan kebijakan zonasi, prioritas restorasi, dan langkah mitigasi guna menjaga keseimbangan antara perlindungan warisan dan kebutuhan pemanfaatan lahan.

Secara metodologis, pendekatan yang diterapkan pada CMT dapat dibandingkan dengan studi-studi serupa di Indonesia dan internasional yang menggabungkan pemrosesan citra dengan indeks spektral dan algoritma *supervised* maupun *machine learning* untuk meningkatkan pemisahan kelas dan akurasi peta. Penelitian-penelitian tersebut merekomendasikan penggunaan kombinasi indeks (NDVI, NDWI, NDBI), fitur tekstural, dan validasi lapangan untuk mencapai peta yang handal, dapat berfungsi sebagai dasar keputusan pengelolaan konservasi dan perencanaan tata ruang pada kawasan cagar budaya.



Gambar 2. NDVI di Kawasan CMT (Sumber: Ikhsani, 2025)

Gambar 2 menunjukkan distribusi indeks vegetasi di sekitar kawasan CMT. Skala warna menunjukkan nilai NDVI dari −0,1 hingga 0,94, dengan nilai hijau kekuning yang tinggi menandakan vegetasi sehat dan aktif, sedangkan warna lebih ke biru atau pucat menunjukkan vegetasi lebih tipis atau kondisi stres.

Nilai NDVI tinggi (0.93) muncul di banyak area hijau di sekitar kawasan candi. Hal ini mengindikasikan bahwa vegetasi di bagian-bagian tertentu tumbuh dengan baik, bisa jadi di area yang tidak tertutup oleh struktur batu atau konstruksi tambun. Sebaliknya, nilai lebih rendah muncul di sisi-sisi tertentu yang kemungkinan menunjukkan area dengan tutupan vegetasi yang tipis atau tanah terbuka di dalam kawasan, misalnya area

di dalam tembok candi atau jalan perkeliling yang memiliki lapisan batu atau pasir, yang memengaruhi kondisi vegetasi.

Penggunaan NDVI sebagai alat pemetaan objek warisan arkeologi semakin mendapat perhatian. Gonzalez (2019) menggunakan NDVI dari citra UAV untuk mengidentifikasi rute jalan Romawi yang tertutup dan menemukan bahwa struktur linier menunjukkan anomali NDVI yang berbeda dari vegetasi sekitarnya. Demikian pula, dalam konteks CMT, pola NDVI bisa membantu memetakan area bertutupan batu atau struktur yang menghambat pertumbuhan vegetasi dibanding area terbuka. Hal ini penting untuk mendeteksi batas-struktur, jalan atau plaza candi yang mungkin telah dipadatkan atau ditutup.

Area dengan nilai NDVI sangat rendah atau nilai yang berbeda mencolok dengan sekitarnya bisa menunjukkan tanah terbuka, vegetasi tipis, atau struktur yang menonjol, seperti objek jalan batu, tembok, dan permukaan padat. Hal ini bisa menjadi sinyal awal untuk monitoring kondisi konservasi, misalnya area yang mengalami erosi, retak vegetasi atau perubahan tutupan yang bisa mengindikasikan permasalahan konservasi. Pemanfaatan citra multispektral dan termal dari UAV untuk zona arkeologi menunjukkan bahwa variasi dalam vegetasi dan tutupan tanah memberikan indikator kondisi struktur di bawahnya. Oleh karena itu, peta NDVI ini bisa menjadi *baseline* untuk pemantauan temporal, perubahan nilai NDVI dari tahun ke tahun bisa menunjukkan perubahan kondisi vegetasi atau eksposur struktur yang perlu ditangani oleh pihak konservasi.

NDVI merupakan metode non-destruktif yang mendukung survei arkeologi dan konservasi, sebagaimana dikemukakan dalam literatur Kaimaris (2024) tentang *remote sensing* arkeologi menggunakan indeks vegetasi. Rekomendasi untuk kegiatan monitoring adalah mengambil citra multitemporal untuk membandingkan perubahan NDVI yang bisa mengindikasikan perubahan fisik di struktur candi atau vegetasi pelindung.

Nilai Akurasi Objek di Kawasan CMT

Validasi hasil pemetaan udara menggunakan teknologi dron multirotor dilakukan untuk menilai tingkat akurasi geometrik antara hasil pengukuran foto udara (ortomosaik) dan pengukuran lapangan langsung (Tabel 1). Analisis ini menjadi tahap penting dalam menilai keandalan data spasial yang digunakan untuk dokumentasi arkeologi, karena presisi dimensi struktur menentukan tingkat validitas interpretasi spasial dan morfometrik situs bersejarah. Pengujian akurasi difokuskan pada objek-objek utama di kawasan CMT, meliputi empat struktur candi, yaitu Candi Tua, Candi Palangka, Candi Mahligai, dan Candi Bungsu serta elemen penunjang seperti jalan keliling candi dan jalur akses utama.

Validasi dilakukan dengan membandingkan dimensi panjang dan lebar hasil ekstraksi dari citra ortomosaik UAV beresolusi 2,75 cm/pixel dengan hasil pengukuran lapangan. Perbedaan antara kedua hasil tersebut diukur menggunakan indikator *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengidentifikasi deviasi spasial yang terjadi (Tabel 1). Berdasarkan hasil analisis, nilai akurasi setiap objek kemudian dibandingkan dengan benchmark 95% toleransi geometrik yang

direkomendasikan oleh *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) dan standar Badan Informasi Geospasial (BIG).

Tabel 1. Statistik Akurasi Pengukuran Dimensi Objek CMT (Sumber: Ikhsani, 2025)

Parameter Analisis	Jumlah Sampel (n)	MAE (m)	RMSE (m)	Std. Dev (m)	Error Maksimum (m)	Keterangan
Panjang	9	0.495	0.615	0.388	0.94	Akurasi sangat baik, sesuai benchmark 95%
Lebar	4	0.280	0.374	0.287	0.68	Akurasi tinggi, sedikit dipengaruhi efek bayangan

Tabel 2 juga menampilkan perbandingan nilai kesalahan pengukuran panjang dan lebar untuk setiap objek. Pola grafik memperlihatkan stabilitas nilai kesalahan yang tidak melebihi 3%, mengindikasikan hasil pengukuran yang konsisten dan valid. Elkhrachy (2021) menunjukkan bahwa evaluasi ortofoto terhadap kontrol lapangan juga melaporkan RMSE linear checkpoint yang umumnya kecil, pengukuran linear menunjukkan *relative error* < 1% pada skala uji yang relevan untuk perbandingan kesalahan panjang/lebar. Hasil ini mendukung temuan (Caciora et al. 2024; Gomes & Tomé 2023; Carvajal-Ramírez, Martínez-Carridondo, Yero-Paneque & Agüera-Vega 2019) yang menyatakan bahwa UAV dapat digunakan sebagai alat ukur non-destruktif yang efektif untuk pemetaan struktur peninggalan bersejarah.

Tabel 2. Nilai Akurasi Objek di Kawasan CMT (Sumber: Ikhsani, 2025)

No	Object Name	Aerial Length (m)	Field Length (m)	Aerial Width (m)	Field Width (m)	Length Accuracy (%)	Width Accuracy (%)	Mean Accuracy (%)
1	Tua Temple	32.06	32.90	28.47	29.15	97.45	97.67	**97.56**
2	Palangka Temple	9.01	9.00	5.66	5.65	99.89	99.82	**99.85**
3	Mahligai Temple	15.63	15.70	11.63	11.36	99.55	97.63	**98.59**
4	Bungsu Temple	15.96	15.70	10.54	10.70	98.34	98.50	**98.42**
5	Road Boundary 1	76.51	76.60	—	—	99.88	—	**99.88**
6	Road Boundary 2	76.05	75.23	—	—	98.91	—	**98.91**
7	Road Boundary 3	77.47	76.93	—	—	99.30	—	**99.30**
8	Road Boundary 4	75.79	74.85	—	—	98.74	—	**98.74**
9	Road	40.04	39.16	—	—	97.75	—	**97.75**
Overall Mean Accuracy (%)								**98.67**

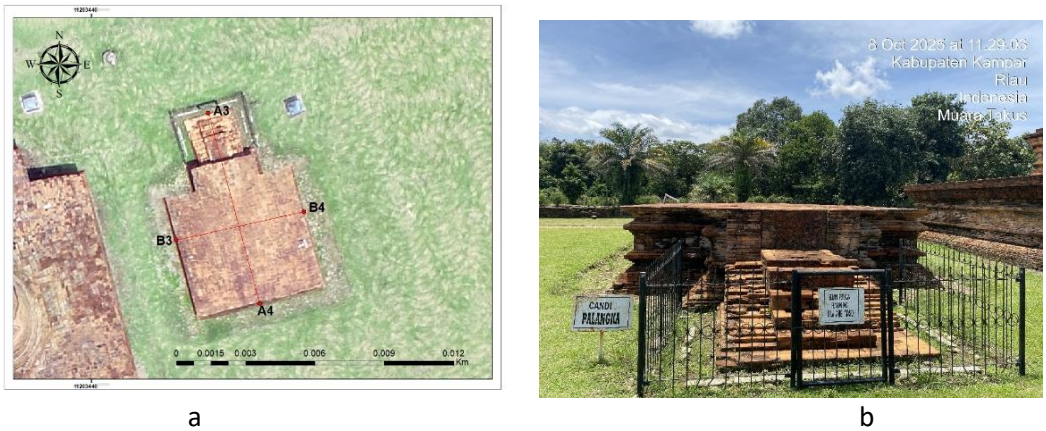
Hasil pengukuran dimensi objek di kawasan CMT menggunakan citra foto udara yang diperoleh dari dron multirotor beresolusi spasial 2,75 cm/pixel menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Persentase kesalahan antara hasil pengukuran foto udara dan

hasil pengukuran lapangan berada pada rentang 0,12%–2,55% untuk dimensi panjang, dan 0,18%–2,38% untuk dimensi lebar (Tabel 1). Nilai ini masih berada dalam batas toleransi geometrik benchmark 95%, sebagaimana dijelaskan oleh ASPRS (2015), bahwa kesalahan horizontal di bawah 5% dapat diterima untuk pemetaan skala besar berbasis UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Meskipun nilai kesalahan pengukuran pada penelitian ini berada di bawah 3% dan masih memenuhi standar toleransi geometrik ASPRS dan BIG, interpretasi terhadap besarnya kesalahan riil tetap penting dilakukan, terutama pada objek bangunan cagar budaya. Pengukuran lapangan pada penelitian ini digunakan sebagai data acuan (*benchmark*/*ground truth*) untuk membandingkan hasil interpretasi fotogrametri UAV terhadap kondisi sebenarnya di lapangan.

Pada Candi Tua, selisih pengukuran panjang antara hasil fotogrametri dan pengukuran lapangan mencapai 0,84 m atau sekitar 2,55% dari panjang aktual bangunan sebesar 32,90 m. Secara statistik nilai tersebut masih dapat diterima, namun dalam konteks dokumentasi arkeologi, deviasi spasial tersebut cukup signifikan karena dapat melebihi dimensi satu susunan bata atau elemen struktur tertentu pada bangunan candi. Sebaliknya, Candi Palangka menunjukkan selisih pengukuran yang sangat kecil, yaitu sekitar 0,01 m–0,02 m dengan tingkat akurasi di atas 99%, sehingga hasil interpretasi fotogrametri dinilai sangat representatif terhadap kondisi aktual di lapangan.

Perbedaan tingkat kesalahan antar objek menunjukkan bahwa bentuk bangunan, bayangan vegetasi, dan kondisi permukaan objek memengaruhi ketelitian hasil fotogrametri UAV. Oleh karena itu, pengukuran lapangan tetap diperlukan sebagai patok duga untuk memvalidasi hasil interpretasi fotogrametri, terutama pada dokumentasi detail bangunan cagar budaya yang memerlukan ketelitian spasial tinggi. Objek dengan nilai kesalahan terkecil terdapat pada Gambar 3.



a b

Gambar 3. Candi Palangka: a. Foto Udara; b. Foto Lapangan
(Sumber: Dokumentasi Ikhsani, 2025)

Objek Candi Palangka memperlihatkan nilai kesalahan terkecil yaitu 0,14% (panjang) dan 0,18% (lebar). Hal ini disebabkan oleh bentuk struktur yang simetris serta area yang bebas dari vegetasi tinggi, sehingga proses ortorektifikasi berjalan optimal. Sebaliknya, Candi Tua memiliki tingkat kesalahan tertinggi, yakni 2,55% pada panjang

dan 2,33% pada lebar (Gambar 4). Hal ini disebabkan adanya bayangan vegetasi di sisi barat yang menimbulkan efek *shadow* dan mengganggu batas objek pada hasil ortomosaik.

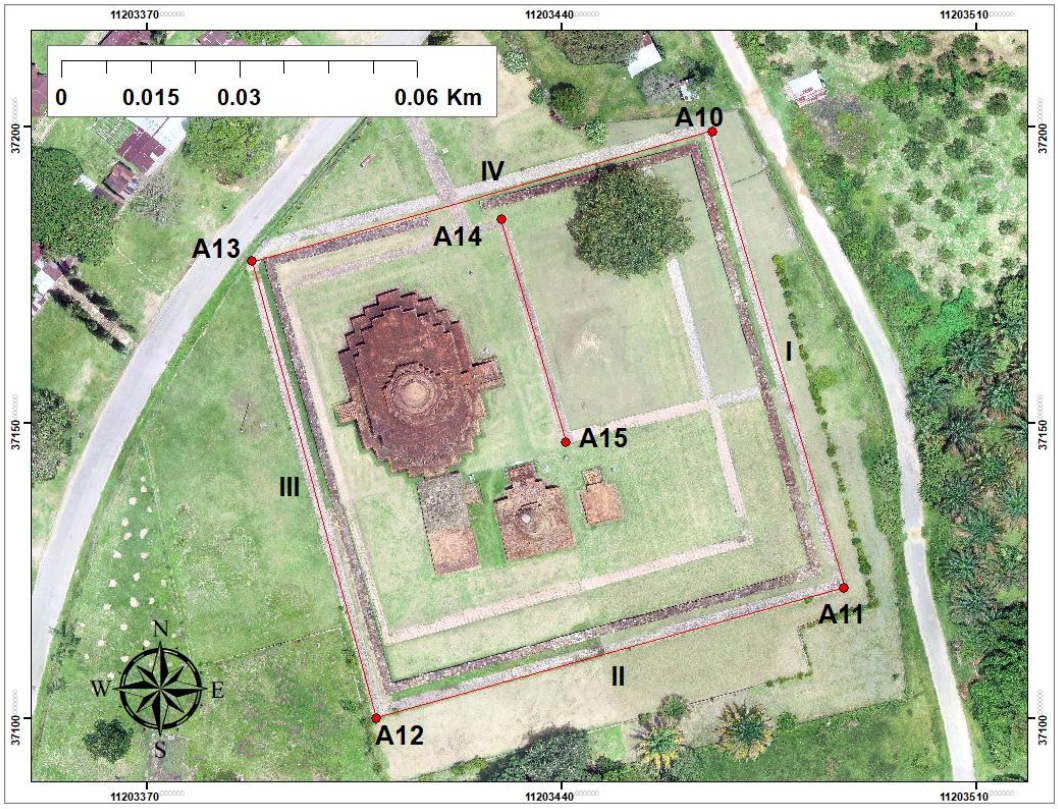


a b

Gambar 4. Candi Tua: a. Foto Udara; b. Foto Lapangan (Sumber: Dokumentasi Ikhsani, 2025)

Objek linear seperti jalan batas keliling candi menunjukkan akurasi tinggi dengan kesalahan berkisar 0,12%–1,26% (Gambar 5). Kondisi ini menunjukkan efektivitas dron dalam pemetaan objek arkeologi yang berbentuk linier. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Barba et al. (2019) yang menyatakan bahwa UAV mampu menghasilkan model 3D objek arkeologi dengan tingkat kesalahan rendah, hingga di bawah 3 cm. Selain itu, Chiabrandoa et al., (2018) menegaskan bahwa UAV photogrammetry berperan penting dalam dokumentasi arkeologi karena mampu menghasilkan representasi spasial berketelitian tinggi pada skala mikro (≤5 cm).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan dron untuk pemetaan situs arkeologi CMT menghasilkan akurasi sesuai dengan standar nasional (BIG, 2018) maupun standar internasional (ASPRS, 2015). Teknologi UAV juga terbukti lebih efisien dibandingkan survei terestrial, baik dari segi waktu maupun aksesibilitas lapangan (Lingua et al. 2023). Oleh karena itu, metode ini dapat diandalkan untuk kegiatan konservasi, dokumentasi digital, dan pemantauan periodik struktur candi.



Gambar 5. Jalan batas keliling candi (Sumber: Dokumentasi Ikhsani, 2025)

Candi Mahligai menunjukkan tingkat akurasi 98,59% dengan selisih pengukuran sebesar 0,07 m pada panjang dan 0,27 m pada lebar (Gambar 6). Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan elevasi vertikal pada struktur stupa, yang berpengaruh terhadap konsistensi skala dalam proses rekonstruksi fotogrametri. Adanya variasi elevasi pada objek cagar budaya dapat mempengaruhi akurasi model tiga dimensi hasil UAV.

Selanjutnya, Candi Bungsu memiliki tingkat akurasi rata-rata 98,42%, dengan selisih 0,26 m pada panjang dan 0,16 m pada lebar (Gambar 7). Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh ketidakrataan permukaan tanah dan bayangan sebagian struktur pada saat pengambilan citra udara. Fenomena serupa juga sesuai dengan temuan Chiabrandoa et al., (2018) Chiabrandoa et al., (2018) dalam kajian dokumentasi warisan budaya menggunakan UAV yang menemukan bahwa kondisi pencahayaan dan relief permukaan dapat menurunkan akurasi spasial pada area bertekstur kompleks.

Pemugaran Candi Bungsu pada kawasan Candi Muara Takus dilaksanakan antara tahun 1988 hingga 1990. Bangunan ini memiliki denah memanjang dari utara ke selatan dengan ukuran panjang sekitar 15,8 m dan lebar sekitar 7,39 m, serta tinggi setelah pemugaran mencapai ±6,20 m dari permukaan tanah. Podium utamanya berdiri sekitar 2,26 m di atas tanah, dengan podium bagian utara yang menopang stupa setinggi ±1,48 m di atasnya, sehingga total tinggi badan stupa dari pondasi mencapai sekitar 5 m. Struktur Candi Bungsu terdiri atas dua bagian material: bagian pertama terbuat dari batu pasir, sedangkan bagian kedua adalah batu bata, yang keduanya menyatu membentuk satu

kesatuan bangunan. Tangga masuk berupa satu *entrance* yang injakannya dari batu pasir dan pinggirnya dari batu bata, menunjukkan bahwa bagian batu pasir kemungkinan dibangun terlebih dahulu sebelum penambahan batu bata p % ada tahap selanjutnya. Kombinasi material dan konstruksi ini memberikan bukti penting bagi teknik arsitektur Buddhis di Sumatra klasik (Siswanto & Ardiansyah 2020).

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa fotogrametri berbasis dron merupakan metode yang andal dan efisien untuk kegiatan dokumentasi spasial struktur kuno, terutama dalam mendukung upaya pelestarian dan analisis spasial warisan budaya arkeologis seperti CMT. Akurasi tinggi pada CMT memungkinkan pengukuran linier dan areal secara sangat baik, membuka kemungkinan untuk menghubungkan data geometri dengan interpretasi fungsi. Misalnya, perubahan panjang/lebar batas keliling bisa dikaitkan dengan ekspansi situs, rekonstruksi, atau penambahan dan pengurangan struktur. Akurasi di bawah 0,3 m dalam pengukuran linier berarti bahwa interpretasi arkeologis yang mendalam (misalnya korelasi antara gateway, tangga, atau sambungan dinding) menjadi lebih andal. Model 3 dimensi dari drone dapat digunakan bukan hanya sebagai dokumentasi statis, tetapi sebagai baseline untuk monitoring perubahan.



a b

Gambar 6. Candi Mahligai: a. Foto Udara; b. Foto Lapangan
(Sumber: Dokumentasi Ikhsani, 2025)

Pada konteks arkeologi, sebuah survei awal dengan akurasi 98% dapat dijadikan titik referensi untuk survei ulang di masa depan, sehingga perubahan linier atau deformasi struktur dapat dideteksi secara kuantitatif. Pendekatan ini memiliki peran penting dalam mendukung kegiatan konservasi, restorasi, serta pengelolaan kawasan warisan budaya secara berkelanjutan. Hasil penelitian pada kawasan CMT menunjukkan bahwa pendekatan fotogrametri berbasis UAV mampu menghasilkan dokumentasi spasial yang detail dan menyeluruh terhadap kondisi lanskap kawasan percandian, termasuk identifikasi tutupan lahan, elemen bangunan, serta lingkungan di sekitarnya. Selain mendukung dokumentasi visual bangunan cagar budaya, hasil fotogrametri juga membantu memahami tata letak kawasan percandian dalam konteks lanskap secara lebih komprehensif, seperti hubungan spasial antar stupa, pola sebaran bangunan, akses jalan, serta sistem drainase di sekitar kawasan. Informasi spasial tersebut penting untuk mengidentifikasi keterkaitan antar elemen kawasan dan memahami bentuk pengelolaan ruang pada masa lalu. Yuwono, Guruh Pratomo & Eka Rana Mulyono (2018) mengungkapkan bahwa Fotogrametri tidak hanya menitikberatkan pada pemodelan objek

cagar budaya, tetapi juga pada interpretasi kondisi lanskap kawasan secara spasial untuk mendukung pengelolaan kawasan cagar budaya secara lebih komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki pengembangan yang lebih luas karena fotogrametri tidak hanya dimanfaatkan sebagai media rekonstruksi visual bangunan cagar budaya, tetapi juga sebagai dasar analisis spasial untuk mengidentifikasi dinamika tutupan lahan dan kondisi lingkungan kawasan CMT secara periodik dan terukur.



a b

Gambar 7. Candi Bungsu: a. Foto Udara; b. Foto Lapangan
(Sumber: Dokumentasi Ikhsani, 2025)

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa kelas tutupan lahan yang teridentifikasi pada kawasan CMT meliputi vegetasi lebat, vegetasi sedang, lahan terbuka, badan air, serta permukiman. Analisis spasial memperlihatkan bahwa perbedaan spektral antar kelas dapat terdeteksi secara jelas melalui kombinasi *band* inframerah-dekat (NIR) dan band merah (*Red*), yang menjadi dasar dalam perhitungan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Nilai NDVI yang tinggi (0,6–0,8) menunjukkan area berhutan rapat dan vegetasi sehat, sedangkan nilai rendah (<0,2) mengindikasikan lahan terbuka atau area terbangun. Hasil analisis menunjukkan tingkat akurasi geometrik keseluruhan sebesar 98,67%, dengan nilai akurasi tertinggi adalah objek Candi Palangka. Penelitian ini menyarankan agar kegiatan pemetaan dan klasifikasi tutupan lahan di kawasan CMT dilakukan secara berkala dan terintegrasi dengan pemantauan kondisi situs arkeologi menggunakan UAV atau citra satelit resolusi tinggi. Pendekatan ini memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan vegetasi, erosi, maupun aktivitas manusia yang berpotensi mengancam kelestarian struktur candi.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini mendapat dukungan dari Universitas Lancang Kuning melalui Anggaran Pendapatan dan Belanja Universitas (APBU) tahun 2025. Para penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang tulus atas kepercayaan serta dukungan pendanaan yang diberikan, yang sangat berperan dalam terselenggaranya dan terselesaikannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adi, AMW, Mahanani, N & Faisal, G. 2023. Spiritual Landscape Characterization of Muara Takus Temple Compound and Surroundings Area Karakterisasi Lanskap Spiritual Kompleks Candi Muara Takus dan Kawasan di Sekitarnya. *SPAFA Journal*. 7:116–135.

Arsyad, LOMN, Statiswaty, Iradat, LM, Yamin, M & Sugiyarto, T. 2020. Akurasi Citra Data Foto Udara UAV Quadcopter Persimpangan Lalu Lintas Kota Kendari. *Rekaya Sipil*. 14(1):51–59. Available from: https://www.dji.com/id/phantom-4.

Barba, S, Barbarella, M, Di Benedetto, A, Fiani, M, Gujski, L & Limongiello, M. 2019. Accuracy assessment of 3d photogrammetric models from an unmanned aerial vehicle. *Drones*. 3(4):1–19. doi.org/10.3390/drones3040079.

Caciora, T, Ilieș, A, Herman, GV, Berdenov, Z, Safarov, B, Bilalov, B, Ilieș, DC, Baias, Ștefan, et al. 2024. Advanced Semi-Automatic Approach for Identifying Damaged Surfaces in Cultural Heritage Sites: Integrating UAVs, Photogrammetry, and 3D Data Analysis. *Remote Sensing*. 16(16). doi.org/10.3390/rs16163061.

Carvajal-Ramírez, F, Martínez-Carridondo, P, Yero-Paneque, L & Agüera-Vega, F. 2019. UAV PHOTOGRAMMETRY and HBIM for the VIRTUAL RECONSTRUCTION of HERITAGE. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. V. 42. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 271–278. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-271-2019.

Chiabrandoa, F, D'Andriab, F, Sammartanoa, G & Spanò, A. 2018. UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3d models at the hierapolis in Phrygia (Turkey). *Virtual Archaeology Review*. 9(18):28–43. doi.org/10.4995/var.2018.5958.

Chong, KL, Kanniah, KD, Pohl, C & Tan, KP. 2017. A review of remote sensing applications for oil palm studies. *Geo-Spatial Information Science*. 20(2):184–200. doi.org/10.1080/10095020.2017.1337317.

Efendi, Y, Marinda, A & Lusiana. 2019. Aplikasi Objek Wisata 3D Augmented Reality Berbasis Mobile. *JIRE (Jurnal Informatika & Rekayasa Elektronika)*. 2(1):1–9. Available from: http://e-journal.stmiklombok.ac.id/index.php/jire.

Elkhrachy, I. 2021. Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*. 60(6):5579–5590. doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.011.

Gomes, MG & Tomé, A. 2023. A digital and non-destructive integrated methodology for heritage modelling and deterioration mapping. The case study of the Moorish Castle in Sintra. *Developments in the Built Environment*. 14. doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100145.

Hidayat, T, Asmar, A & Yerizon, Y. 2021. Eksplorasi Etnomatematika Pada Candi Muara Takus Di Kec. XIII Koto Kampar Riau. *JURNAL EKSAKTA PENDIDIKAN (JEP)*. 5(1):77–86. doi.org/10.24036/jep/vol5-iss1/575.

Ikhsani, H, Ikhwan, M & Lestari, I. 2024. Klasifikasi Tutupan Lahan Menggunakan Object Based Image Analysis (OBIA) Pada Berbagai Tinggi Terbang Unmanned Aerial System (UAS). *ZONasi Jurnal Sistem Informasi*. 6:38–47.

Kaimaris, D. 2024. Aerial Remote Sensing Archaeology—A Short Review and Applications. *Land*. 13(7). doi.org/10.3390/land13070997.

Lingua, A, Martino, A, Sammartano, G, Maschio, P, Reali, E & Tonghini, C. 2023. UAV-BASED ARCHAEOLOGICAL 3D MONITORING: A RURALSCAPE CASE in IRAQI KURDISTAN. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. V. 48. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 935–942. doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-935-2023.

Nugroho, A, Nababan, B, Panjaitan, JP & Agus, SB. 2024. Pemetaan Habitat Bentik Berbasis Objek Menggunakan Drone Di Perairan Pulau Gili Labak, Sumenep. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*. 17(1):29–42. doi.org/10.21107/jk.v17i1.24518.

Nugroho, HW, Azwin, A & Ikhsani, H. 2025. Uji Akurasi Foto Udara di Kawasan Objek Wisata Alam Pulau Semut Pekanbaru. *Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan*. 20(1):25–42. doi.org/10.31849/forestra.v20i1.20977.

Purwaningsih, Y, Setiawan, H, Manessa, MDM & Setiadi, H. 2024. Analisis Uji Akurasi Horisontal Peta Tutupan Lahan berbasis UAV RTK Multispektral Desa Ciputri. *Media Komunikasi Geografi*. 25(2):332–342. doi.org/10.23887/mkg.v25i2.79124.

Putra, AS & Fauzy, A. 2017. Pemanfaatan Data Foto Udara Untuk Perencanaan Dan Pemetaan Kawasan Kampus (Studi Kasus: Akuisisi Data Foto udara di Universitas Islam Indonesia, DIY). In: *Prosiding Seminar Nasional seri 7 "Menuju Masyarakat Madani dan Lestari"*. Yogyakarta. 31–39.

Siswanto, A & Ardiansyah. 2020. Struktur Unik Candi Muaro Takus, Riau. *Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia*. 9(4):180–186. doi.org/10.32315/jlbi.v9i4.75.

Tapinaki, S, Pateraki, M, Skamantzari, M & Georgopoulos, A. 2023. Conventional or automated photogrammetry for cultural heritage documentation? In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. V. 48. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 1535–1542. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1535-2023.

Ulandari, I, Siswanto, H, Ruslim, Y & Aquastini, D. 2023. Identifikasi Mahang (Macaranga gigantea) Dan Puspa (Schima wallichii) Menggunakan Foto Drone Di KHDTK Diklat Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Mulawarman. *Jurnal Pertanian Terpadu*. 11(1):1–12. doi.org/10.36084/jpt..v10i2.381.

Wulan, TR, Ambarwulan, W, Putra, AS, Maulana, E, Maulia, N, Putra, MD, Wahyuningsih, DS, Ibrahim, F, et al. 2016. Uji Akurasi Data Uav (Unmanned Aerial Vehicle) di Kawasan Pantai Pelangi, Parangtritis, Kretek, Kabupaten Bantul. In: *Prosiding Seminar Nasional Kelautan 2016*. Madura: Universitas Trunojoyo Madura. 232–240.

Yuwono, Guruh Pratomo, D & Eka Rana Mulyono, Y. 2018. Rekonstruksi Model 3d Candi Jawi dengan Metode Structure From Motion (SFM) Foto Udara. In: *Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri 2018*. Malang: ITN Malang.