

Analisis Ketelitian Geometrik Foto Udara pada Variasi Topografi Medan berbasis UAV

Geometric Accuracy Assessment of UAV-Based Aerial Photogrammetry Under Different Terrain Conditions

Virgus Ari Sondang^{1*}, Johan Aryantoni¹, Debi Nadia Putri¹, dan Al Shida Natul¹

¹Teknik Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Indo Global Mandiri, Palembang, 30128.

*Corresponding Author: virgus.ari@uigm.ac.id

Article Info:

Received: 14 – 04 - 2026

Accepted: 26 – 05 - 2026

Published: 25 – 07 - 2026

Kata kunci: UAV, ketelitian geometrik, fotogrametri, RMSE dan CE90, variasi topografi

Keywords: UAV, Geometric Accuracy, Photogrammetry, RMSE and CE90, Topographic Variation

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketelitian geometrik foto udara berbasis UAV pada wilayah dengan karakteristik topografi berbeda. Lokasi penelitian meliputi Desa Bunpenang, Kabupaten Sumenep, yang merepresentasikan medan relatif datar, serta Desa Rombuh, Kabupaten Pamekasan, yang memiliki topografi lebih bervariasi. Akuisisi data dilakukan menggunakan UAV DJI Phantom 4 Pro pada ketinggian terbang 200 m dengan panjang fokus kamera 10,26 mm. Pada masing-masing lokasi digunakan 6 titik GCP dan 12 titik ICP. Hasil pengolahan menunjukkan nilai bundle adjustment GCP di Desa Bunpenang sebesar 7,095 mm dan Desa Rombuh sebesar 30,478 mm. Evaluasi ketelitian geometrik menggunakan ICP menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,119 m pada Desa Bunpenang dan 0,179 m pada Desa Rombuh, dengan nilai CE90 masing-masing sebesar 0,180 m dan 0,272 m. Hasil uji normalitas menunjukkan residual error horizontal pada kedua lokasi cenderung mengikuti distribusi normal, yang mengindikasikan model geometrik orthophoto cukup stabil untuk analisis spasial. Berdasarkan standar Badan Informasi Geospasial, kedua lokasi termasuk kategori Kelas 1 pada skala 1:1.000. Perbedaan nilai RMSE dan CE90 menunjukkan adanya variasi ketelitian geometrik pada topografi yang berbeda. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi topografi berpotensi memengaruhi ketelitian hasil pemetaan berbasis UAV, meskipun diperlukan analisis statistik lanjutan untuk menguji signifikansi pengaruh tersebut secara lebih mendalam.

Abstract: This study aims to analyze the geometric accuracy of UAV-based aerial photogrammetry in areas with different topographic characteristics. The study locations include Bunpenang Village, Sumenep Regency, representing relatively flat terrain, and Rombuh Village, Pamekasan Regency, characterized by more varied topography. Data acquisition was conducted using a DJI Phantom 4 Pro UAV at a flight altitude of 200 m with a camera focal length of 10.26 mm. Each study area employed 6 Ground Control Points (GCPs) and 12 Independent Check Points (ICPs). The photogrammetric processing results showed GCP bundle adjustment errors of 7.095 mm in Bunpenang Village and 30.478 mm in Rombuh Village. Geometric accuracy evaluation using ICPs produced RMSE values of 0.119 m for Bunpenang Village and 0.179 m for Rombuh Village, with corresponding CE90 values of 0.180 m and 0.272 m, respectively. Normality test results indicated that the horizontal residual errors in both locations tended to follow a normal distribution, suggesting that the generated orthophoto geometric models were sufficiently stable for further spatial analysis. Based on the Indonesian Geospatial Information Agency (BIG) accuracy standard, both study areas were classified as Class 1 for a 1:1,000 map scale. Differences in RMSE and CE90 values indicate variations in geometric accuracy under different topographic conditions. These findings suggest that topographic conditions may potentially influence the accuracy of UAV-based mapping, although further statistical analysis is required to evaluate the significance of this effect more comprehensively.

How to Cite:

Sondang, V. A., Aryantoni, J., Putri, D. N., Natul, A. S. (2026). Analisis Ketelitian Geometrik Foto Udara pada Variasi Topografi Medan berbasis UAV. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 6(1), 45-58.. <https://doi.org/10.31315/imagi.v6i1.16747>.

1. PENDAHULUAN

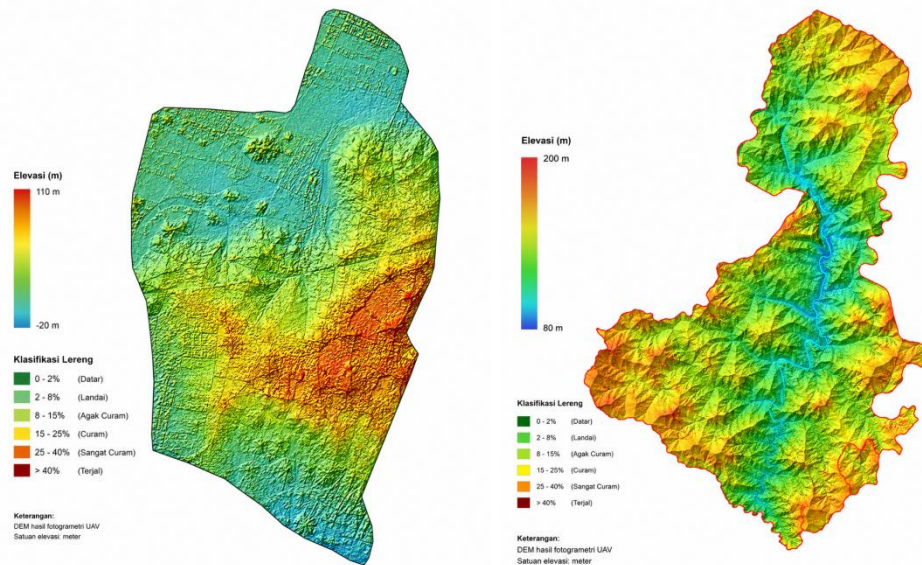
Perkembangan teknologi pemetaan dalam beberapa tahun terakhir mengalami kemajuan yang signifikan, khususnya dengan hadirnya Unmanned Aerial Vehicle (UAV) yang mampu menghasilkan data spasial beresolusi tinggi secara cepat, fleksibel, dan relatif efisien (Wolf, 1993). Citra dari wahana UAV menjadi salah satu sumber data penginderaan jauh yang paling penting karena tingginya fleksibilitas platform UAV serta penggunaan kamera berbiaya rendah yang semakin luas. Teknik dan aplikasi pemetaan 3D fotogrametri berbasis UAV mengalami perkembangan yang sangat pesat, yang dapat dilihat dari penerapan berbagai teknologi mutakhir, termasuk SfM (*Structure from Motion*) untuk orientasi citra secara offline (Xiao et al., 2021), SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) untuk navigasi UAV secara online (Yao et al., 2021), serta pemetaan 3D yang terintegrasi dengan *Deep Learning* (Jiang et al., 2022). Pemanfaatan UAV dalam bidang fotogrametri telah digunakan untuk berbagai keperluan di Indonesia, seperti pembuatan peta dasar pertanahan (Setiawan et al., 2019; Kersten et al., 2025), perencanaan wilayah dan kota (Hu & Minner, 2023), mitigasi bencana (Kedys et al., 2023; Agustina et al., 2022; Glantz et al., 2020), pemantauan tutupan lahan di wilayah pertambangan (Barroso et al., 2025; Putrawiyanta et al., 2023), pemetaan lahan pertanian (Khafiza et al., 2024; Wang et al., 2025), pemetaan jalur atau koridor (Huang et al., 2021), dan perencanaan pengembangan di tingkat desa (Firmansyah, 2024; Zhang et al., 2024). Keunggulan UAV dibandingkan metode konvensional terletak pada kemampuannya dalam menghasilkan foto udara dengan resolusi tinggi (Prayogo et al., 2020) serta kemudahan dalam proses akuisisi data (Derenyi, 1995).

Meskipun demikian, kualitas produk fotogrametri yang dihasilkan sangat bergantung pada ketelitian geometrik dari foto udara tersebut. Ketelitian geometrik menunjukkan tingkat kesesuaian posisi objek pada foto udara terhadap posisi sebenarnya di permukaan bumi. Untuk mendapatkan kesesuaian posisi objek pada citra, pengolahan data fotogrametri dijalankan mengikuti alur kerja bertahap (*multi-stage pipeline*) (Zhou et al., 2026). Dalam praktiknya, ketelitian geometrik dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain ketinggian terbang (Abdalla et al., 2025), spesifikasi kamera (Aziz & Maharani, 2025), metode pengolahan data (Sondang, 2018), distribusi dan jumlah Ground Control Point (GCP) (Pandego et al., 2024; Kurniawan et al., 2015), serta kondisi topografi medan (Zidan, 2022). Pada citra UAV beresolusi tinggi dan cakupan wilayah yang luas, penggunaan *Structure-from-Motion* (SfM) yang efisien dan akurat untuk estimasi posisi kamera serta rekonstruksi *cloud* titik 3D masih menjadi tantangan

Salah satu faktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap ketelitian geometrik adalah variasi topografi medan (Zidan, 2022). Perbedaan kondisi medan, seperti datar dan berbukit, dapat menyebabkan distorsi geometrik akibat variasi elevasi dan perubahan sudut pandang kamera saat akuisisi data. Pada daerah dengan topografi berbukit, perbedaan ketinggian yang cukup signifikan berpotensi menimbulkan kesalahan posisi yang lebih besar dibandingkan dengan daerah yang relatif datar.

Pulau Madura merupakan wilayah yang memiliki variasi topografi yang beragam, mulai dari dataran rendah hingga daerah perbukitan. Desa Bunpenang di Kabupaten Sumenep memiliki karakteristik medan yang relatif datar hingga bergelombang ringan, sedangkan Desa Rombuh di Kabupaten Pamekasan didominasi oleh topografi berbukit dengan kemiringan lereng yang lebih bervariasi. Untuk memberikan gambaran spasial mengenai lokasi penelitian, ditampilkan visualisasi Digital Elevation Model (DEM) yang dikombinasikan dengan *hillshade* pada Desa Bunpenang dan Desa Rombuh pada Gambar 1. Representasi ini digunakan untuk memperlihatkan karakteristik topografi secara umum kedua wilayah secara visual sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

Secara umum, Desa Bunpenang menunjukkan variasi elevasi yang relatif lebih homogen dengan dominasi wilayah berlereng landai, sedangkan Desa Rombuh memperlihatkan variasi relief yang lebih kompleks dengan perubahan elevasi yang lebih signifikan. Perbedaan karakteristik topografi tersebut dapat diamati melalui pola ketinggian pada DEM serta tekstur bayangan pada *hillshade*, yang merepresentasikan kontur permukaan tanah secara lebih jelas. Perbedaan kondisi topografi tersebut menjadikan kedua wilayah ini representatif untuk digunakan sebagai lokasi penelitian dalam menganalisis pengaruh variasi medan terhadap ketelitian geometrik foto udara berbasis UAV.



Gambar 1. Topografi lokasi Desa Bunpenang (kiri) dan Desa Rombuh (kanan)

Standar ketelitian peta dasar pada kegiatan pemetaan di Indonesia diatur dalam pedoman teknis yang ditetapkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). Ketelitian horizontal umumnya dinyatakan dalam parameter Circular Error 90% (CE90), yaitu radius lingkaran yang mencakup 90% kesalahan posisi. Berdasarkan pedoman tersebut, ketelitian peta dibagi menjadi beberapa kelas, yaitu Kelas 1, Kelas 2, dan Kelas 3, yang masing-masing memiliki batas toleransi berbeda sesuai dengan skala peta. Sebagai contoh, untuk peta skala 1:1.000, ketelitian horizontal yang disyaratkan adalah $\leq 0,3$ meter untuk Kelas 1, $\leq 0,6$ meter untuk Kelas 2, dan $\leq 0,9$ meter untuk Kelas 3. Standar ini menjadi acuan penting dalam mengevaluasi kualitas hasil pemetaan, termasuk hasil fotogrametri berbasis UAV.

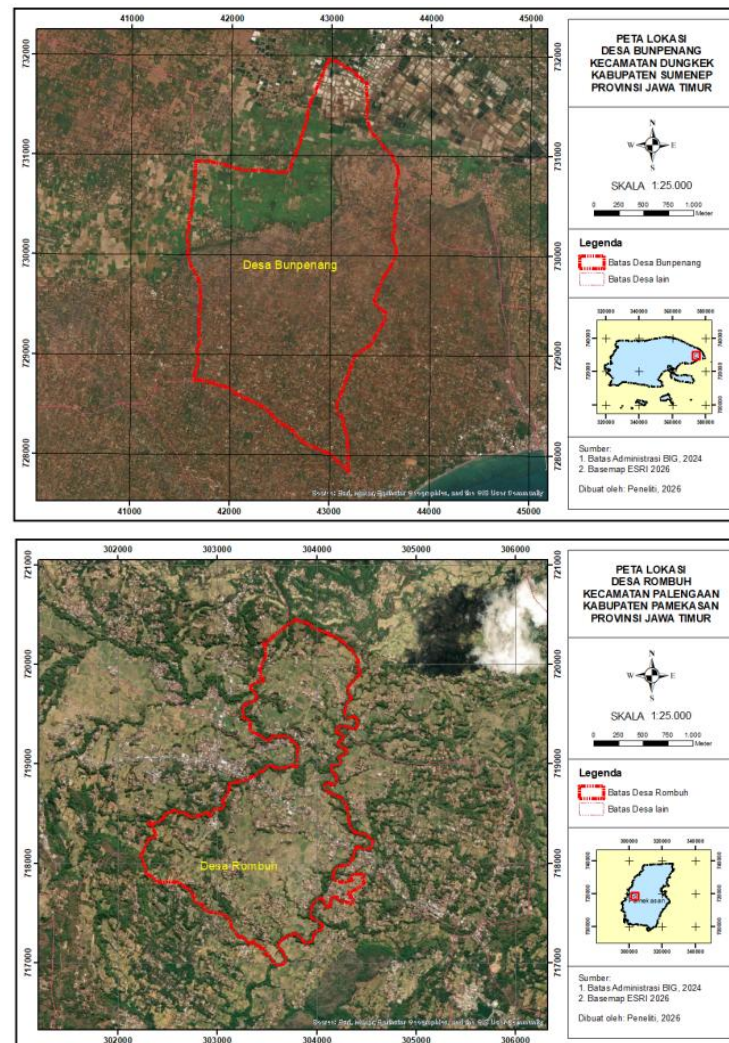
Dalam proses pengujian ketelitian geometrik, digunakan parameter Root Mean Square Error (RMSE) sebagai indikator kuantitatif tingkat kesalahan posisi. Nilai RMSE yang diperoleh kemudian dapat dikonversi menjadi CE90 untuk dibandingkan dengan standar ketelitian yang ditetapkan oleh BIG. Selain itu, pemanfaatan GCP berperan dalam meningkatkan akurasi geometrik melalui pengikatan koordinat ke sistem referensi, sedangkan ICP (*Independent Check Point*) digunakan sebagai titik uji independen untuk mengevaluasi hasil akhir secara objektif. Menurut Cwiąkała et al., (2026), optimasi parameter pengolahan yang dilakukan secara cermat mampu menghasilkan ketelitian yang tinggi dengan jumlah GCP yang lebih sedikit, sehingga dapat mengurangi pekerjaan lapangan yang memerlukan waktu relatif lama.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji ketelitian foto udara berbasis UAV, namun sebagian besar masih berfokus pada aspek teknis seperti jumlah dan distribusi GCP (Nugraha & Putrasakti, 2019; Suhadi et al., 2019; Purba et al., 2022; Putrawiyanta et al., 2023; Prayogo et al., 2020; Pandego et al., 2024). Kajian yang secara khusus membandingkan ketelitian geometrik foto udara berdasarkan variasi topografi medan, terutama pada skala lokal seperti desa, masih relatif terbatas. Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, penelitian mengenai ketelitian geometrik foto udara pada kondisi topografi yang berbeda telah dilakukan oleh Setiawan et al. dengan menggunakan 9 titik GCP dan 4 titik ICP. Berbeda dengan penelitian tersebut, penelitian ini menerapkan jumlah GCP yang lebih sedikit, yaitu 6 titik GCP, namun menggunakan jumlah ICP yang lebih banyak, yaitu 12 titik yang didistribusikan secara merata pada wilayah penelitian. Strategi ini didasarkan pada pendekatan bahwa distribusi titik evaluasi (ICP) yang lebih banyak dan tersebar merata dapat memberikan pengujian ketelitian geometrik yang lebih representatif dan independen terhadap kualitas hasil ortofoto.

Selain itu, penggunaan jumlah GCP minimum sejumlah 6 titik dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana model fotogrametri UAV tetap mampu mempertahankan tingkat ketelitian geometrik yang tinggi pada kondisi topografi yang berbeda. Pendekatan ini menjadi pembeda utama dibandingkan penelitian sebelumnya, karena tidak hanya berfokus pada peningkatan jumlah titik kontrol, tetapi juga pada efektivitas distribusi titik kontrol dan titik uji dalam proses evaluasi akurasi geometrik. Oleh karena

itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan strategi konfigurasi GCP–ICP yang lebih efisien dan optimal untuk pemetaan berbasis UAV, khususnya pada wilayah dengan variasi topografi yang berbeda.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis ketelitian geometrik foto udara pada variasi topografi medan berbasis UAV, dengan membandingkan kondisi medan datar di Desa Bunpenang, Kabupaten Sumenep, dan medan berbukit di Desa Rombuh, Kabupaten Pamekasan. Peta lokasi studi dilengkapi batas administrasi wilayah tersaji pada Gambar 1. Analisis dilakukan menggunakan parameter RMSE yang dikonversi menjadi CE90, dengan dukungan data GCP dan ICP untuk mengevaluasi tingkat akurasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh variasi topografi terhadap ketelitian pemetaan berbasis UAV serta kesesuaiannya dengan standar ketelitian peta dasar menurut BIG.



Gambar 2. Lokasi Desa Bunpenang (atas) dan Desa Rombuh (bawah)
(Sumber: Basemap ESRI, 2026)

2. METODE PENELITIAN

2.1 Persiapan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi UAV yang berfungsi untuk akuisisi data foto udara, GNSS metode RTK yang digunakan dalam pengukuran koordinat GCP dan ICP, serta perangkat lunak pengolahan fotogrametri untuk memproses data hasil akuisisi menjadi produk spasial. Adapun bahan atau data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data foto udara hasil akuisisi

UAV, data koordinat GCP yang digunakan sebagai titik kontrol dalam proses pengolahan, serta data koordinat ICP yang dimanfaatkan sebagai titik uji independen dalam evaluasi ketelitian geometrik.

2.2 Akuisisi Data Foto Udara

Akuisisi data dilakukan pada bulan Desember 2025 menggunakan UAV tipe multirotor (*quadcopter*) yaitu DJI Phantom 4 Pro dengan parameter penerbangan yang dikontrol secara konsisten pada kedua lokasi penelitian. UAV ini dilengkapi dengan kamera resolusi tinggi yang memiliki sensor CMOS beresolusi 5472×3648 piksel serta panjang fokus 10,26 mm. Parameter akuisisi yang digunakan meliputi tinggi terbang UAV sebesar 200 meter guna memperoleh kualitas citra dan resolusi spasial yang optimal untuk analisis ketelitian geometrik. Pengaturan ini bertujuan untuk memperoleh cakupan area yang optimal serta resolusi spasial yang memadai dalam analisis ketelitian geometrik. Selain itu, perencanaan jalur terbang dilakukan dengan mempertimbangkan tingkat pertampalan memanjang (*overlap*) $\pm 80\%$ dan pertampalan samping (*sidelap*) $\pm 70\%$, guna mendukung proses rekonstruksi model fotogrametri secara optimal. Pengaturan parameter tersebut dilakukan secara seragam pada kedua lokasi penelitian untuk memastikan bahwa perbedaan hasil yang diperoleh dipengaruhi oleh variasi topografi, bukan oleh perbedaan parameter akuisisi.

2.3 Penentuan dan Pengukuran Titik Kontrol

Pada masing-masing lokasi penelitian ditentukan 6 titik GCP yang digunakan dalam proses georeferensi dan peningkatan akurasi model, serta 12 titik ICP yang digunakan sebagai titik uji independen untuk evaluasi ketelitian. Distribusi GCP dan ICP dilakukan secara merata di area penelitian dengan mempertimbangkan variasi topografi, sehingga mampu merepresentasikan kondisi medan secara optimal. Pengukuran koordinat titik GCP dilakukan menggunakan metode GNSS RTK Radio dengan sistem referensi WGS84, sistem proyeksi proyeksi TM3 Zona 49.2 untuk Desa Rumbuh dan sistem proyeksi proyeksi TM3 Zona 50.1 untuk Desa Bunpenang. Hasil pengolahan jaringan menunjukkan bahwa nilai χ^2 test memenuhi kriteria penerimaan (*passed*), yang mengindikasikan kualitas observasi dan hasil penyesuaian jaringan yang baik.

Berdasarkan nilai standar deviasi baseline di dua lokasi studi, pengukuran GNSS memiliki ketelitian horizontal pada kisaran $\pm 0,005$ – $0,020$ m dan ketelitian vertikal pada kisaran $\pm 0,003$ – $0,014$ m. Ketelitian tersebut menunjukkan bahwa koordinat GCP yang digunakan telah memenuhi kebutuhan untuk proses evaluasi ketelitian geometrik foto udara berbasis UAV.

2.4 Pengolahan Data Fotogrametri

Data foto udara diproses menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape Professional melalui tahapan *image alignment*, optimasi kamera, pembentukan *dense point cloud*, pembuatan DEM, dan ortomosaik. Proses *image alignment* dilakukan dengan tingkat akurasi tinggi (*High accuracy*) untuk meningkatkan ketelitian proses bundle adjustment. Pengaturan *key point limit* sebesar 40.000 dan *tie point limit* sebesar 10.000 untuk memperkuat kestabilan orientasi relatif antar citra. Hal ini penting dalam penelitian ini karena tujuan utama adalah analisis ketelitian geometrik, sehingga diperlukan model yang memiliki tingkat presisi tinggi. Pemilihan parameter ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan reproyeksi dan meningkatkan kualitas hasil rekonstruksi tiga dimensi, khususnya pada wilayah dengan variasi topografi yang berbeda. Optimasi model dilakukan dengan mengaktifkan koreksi tambahan (*fit additional corrections*) untuk meningkatkan ketelitian geometrik.

Pembentukan *dense point cloud* dilakukan pada kualitas sedang (*Medium quality*) dengan mode penyaringan *Mild*. Hal ini diterapkan sebagai kompromi antara tingkat detail geometrik dan efisiensi waktu serta penggunaan sumber daya komputasi. Meskipun pengaturan *High quality* dapat menghasilkan densitas titik yang lebih tinggi, penelitian ini difokuskan pada evaluasi ketelitian geometrik berbasis GCP dan ICP, sehingga kualitas *Medium* dianggap memadai untuk menghasilkan representasi permukaan yang akurat tanpa meningkatkan beban komputasi secara signifikan. Oleh karena itu, parameter ini dipilih untuk menjaga keseimbangan antara akurasi model dan efisiensi proses pengolahan data. Model DEM

dibangun dengan tipe permukaan *height field* dan interpolasi diaktifkan. Ortofoto dihasilkan menggunakan metode *mosaic blending* serta fitur *hole filling* untuk memastikan kontinuitas permukaan. Metode *mosaic blending* dipilih dalam proses pembentukan ortofoto karena mampu menghasilkan transisi radiometrik yang halus pada area tumpang tindih antar citra. Teknik ini mengoptimalkan pemilihan piksel terbaik dari beberapa citra berdasarkan kualitas geometrik dan posisi relatifnya, sehingga mengurangi efek batas seam (*seamline artifacts*) serta perbedaan pencahayaan. Penggunaan *mosaic blending* bertujuan untuk menghasilkan ortofoto dengan kualitas visual dan konsistensi radiometrik yang baik, sehingga mendukung analisis ketelitian geometrik secara lebih stabil dan representatif. Fitur *hole filling* diaktifkan untuk mengisi area kosong yang dapat muncul akibat variasi elevasi, sudut pengambilan citra, atau keterbatasan cakupan data pada proses ortorektifikasi. Aktivasi fitur ini memungkinkan interpolasi berbasis model elevasi sehingga kontinuitas permukaan tetap terjaga. Maka dari itu, ortofoto yang dihasilkan memiliki cakupan spasial yang lengkap tanpa celah, yang penting untuk memastikan konsistensi analisis geometrik serta mendukung evaluasi ketelitian menggunakan titik ICP.

2.5 Analisis Ketelitian Geometrik dan Perbandingan Medan

Analisis ketelitian geometrik dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil ortofoto dengan koordinat hasil pengukuran lapangan pada titik ICP. Selisih koordinat antara kedua data tersebut digunakan untuk menghitung nilai RMSE sebagai indikator tingkat ketelitian geometrik. Nilai RMSE dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (1)$$

dengan

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ortho,i} - X_{ICP,i})^2}{n}} \quad (2)$$

dan

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ortho,i} - Y_{ICP,i})^2}{n}} \quad (3)$$

dimana $X_{ortho,i}$ dan $Y_{ortho,i}$ adalah koordinat ICP pada foto udara, serta $X_{ICP,i}$ dan $Y_{ICP,i}$ adalah koordinat ICP hasil pengukuran di lapangan.

Nilai RMSE kemudian dikonversi menjadi Circular Error 90% (CE90) untuk mengevaluasi ketelitian berdasarkan standar yang ditetapkan oleh BIG dengan persamaan berikut:

$$CE90 = 1,5175 \times RMSE_r \quad (4)$$

dengan 1,5175 adalah konstanta konversi statistik. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai RMSE dan CE90 pada dua lokasi penelitian, yaitu Desa Bunpenang yang merepresentasikan medan datar dan Desa Rombuh yang merepresentasikan medan berbukit. Perbandingan ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi topografi terhadap ketelitian geometrik hasil pemetaan berbasis UAV.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Akuisisi Data Foto Udara

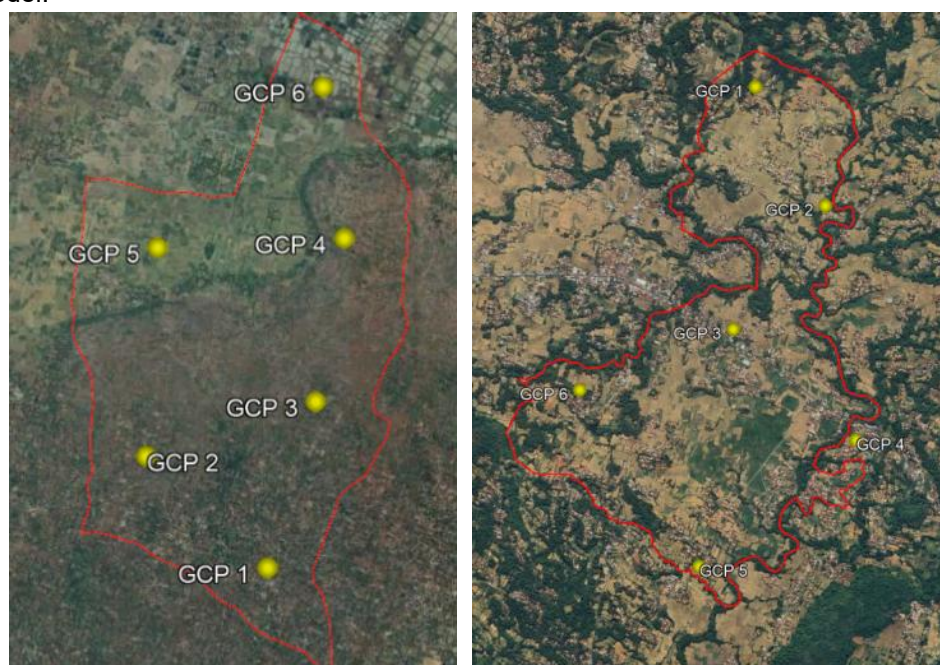
Pada tahap ini disajikan hasil akuisisi data menggunakan UAV pada dua lokasi penelitian, yaitu Desa Bunpenang dan Desa Rombuh. Akuisisi dilakukan dengan tinggi terbang rata-rata wahana 200 meter dan panjang fokus kamera yang digunakan adalah 10,26 mm. Hasil akuisisi berupa kumpulan foto udara yang memiliki tingkat overlap yang cukup untuk mendukung proses rekonstruksi model fotogrametri. Secara visual, data foto udara pada kedua lokasi menunjukkan perbedaan karakteristik permukaan, dimana Desa Bunpenang didominasi oleh lahan relatif datar, sedangkan Desa Rombuh menunjukkan variasi elevasi yang lebih kompleks. Perbedaan kondisi topografi ini berpotensi mempengaruhi kualitas geometri citra, khususnya pada daerah dengan perubahan elevasi yang signifikan yang dapat menyebabkan distorsi perspektif.



Gambar 3. Foto udara Desa Bunpenang (kiri) dan Desa Rombuh (kanan)

3.2 Hasil Penentuan dan Pengukuran Titik Kontrol

Pada masing-masing lokasi penelitian telah ditentukan sebanyak 6 titik GCP dan 12 titik ICP. Titik-titik tersebut didistribusikan secara merata di seluruh area penelitian dengan tujuan untuk merepresentasikan kondisi spasial wilayah secara optimal. Pengukuran koordinat seluruh titik dilakukan menggunakan GNSS dengan metode RTK, sehingga diperoleh data koordinat dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh titik kontrol memiliki kualitas koordinat yang baik dan memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai acuan dalam proses pengolahan data fotogrametri serta evaluasi ketelitian geometrik. Distribusi GCP yang merata berperan penting dalam meningkatkan kestabilan dan akurasi model fotogrametri, khususnya dalam proses georeferensi dan optimasi model.



Gambar 4. Distribusi GCP di lokasi Desa Bunpenang (kiri) dan Desa Rombuh (kanan)

Sementara itu, ICP digunakan sebagai titik uji independen yang tidak terlibat dalam proses pengolahan, sehingga berfungsi untuk memberikan evaluasi ketelitian yang objektif terhadap hasil akhir pemetaan. Hasil evaluasi terhadap titik ICP di Desa Bunpenang menunjukkan bahwa kesalahan horizontal berada pada rentang $\pm 0,055$ m hingga $\pm 0,239$ m, dengan nilai RMSE sebesar 0,119 m. Nilai kesalahan

minimum menunjukkan adanya titik dengan deviasi yang sangat kecil antara koordinat ortofoto dan koordinat hasil pengukuran lapangan, yang mencerminkan tingkat presisi geometrik yang tinggi pada sebagian area model. Sementara itu, nilai kesalahan maksimum sebesar $\pm 0,239$ m mengindikasikan adanya variasi deviasi pada beberapa titik, namun masih dalam batas toleransi akurasi spasial untuk pemetaan skala detail. Perbedaan antara nilai minimum dan maksimum menunjukkan bahwa distribusi kesalahan relatif terkendali dan tidak didominasi oleh *outlier* ekstrem. Nilai RMSE sebesar 0,119 m merepresentasikan tingkat ketelitian geometrik secara keseluruhan dan menunjukkan bahwa model ortofoto memiliki stabilitas yang baik. Kombinasi antara nilai minimum yang rendah, maksimum yang masih terkendali, dan RMSE yang kecil mengindikasikan bahwa proses *bundle adjustment* serta penggunaan titik kontrol telah berjalan efektif dalam menghasilkan model yang konsisten secara geometrik.

Tabel 1. Koordinat GCP di lokasi penelitian

Nama Titik	Desa Bunpenang, Kab. Sumenep			Desa Rombuh, Kab. Pamekasan		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
GCP 1	42.811,609	728.505,578	32,145	303.586,106	720.695,087	134,906
GCP 2	42.023,144	729.920,371	28,932	304.197,479	720.104,828	118,510
GCP 3	43.732,928	729.543,661	35,617	303.893,422	718.732,902	106,279
GCP 4	43.310,554	730.410,322	30,876	304.439,045	717.847,729	99,082
GCP 5	42.180,160	730.450,158	33,254	303.331,704	717.228,656	96,601
GCP 6	43.125,392	731.460,046	29,741	302.690,466	718.221,143	120,401

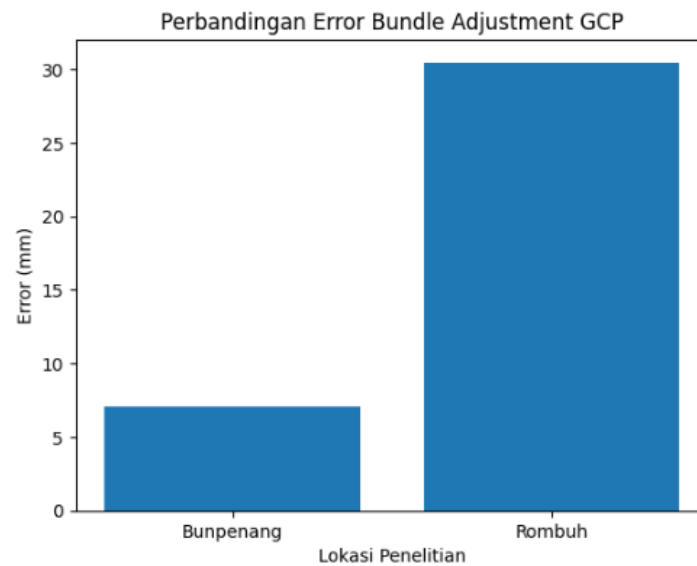
Hasil evaluasi terhadap 12 titik ICP di Desa Rombuh menunjukkan bahwa kesalahan horizontal berada pada rentang $\pm 0,004$ m hingga $\pm 0,277$ m, dengan nilai RMSE sebesar 0,179 m. Nilai kesalahan minimum yang sangat kecil menunjukkan bahwa pada beberapa titik, model ortofoto mampu merepresentasikan posisi di lapangan dengan tingkat presisi yang sangat tinggi. Namun demikian, nilai kesalahan maksimum yang mencapai $\pm 0,277$ m mengindikasikan adanya variasi deviasi yang lebih besar pada titik-titik tertentu. Rentang kesalahan yang lebih lebar dibandingkan wilayah medan datar menunjukkan bahwa distribusi *error* pada Desa Rombuh cenderung lebih bervariasi. Hal ini berkaitan dengan karakteristik topografi berbukit yang menyebabkan perubahan elevasi yang signifikan, sehingga mempengaruhi kestabilan geometri citra dalam proses rekonstruksi fotogrametri. Variasi relief tersebut dapat meningkatkan kompleksitas dalam proses *tie point matching* dan *bundle adjustment*, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan nilai kesalahan pada beberapa titik ICP.

Nilai RMSE sebesar 0,179 m merepresentasikan ketelitian geometrik secara keseluruhan dan menunjukkan bahwa model ortofoto masih berada pada tingkat akurasi desimeter. Meskipun nilai RMSE lebih besar dibandingkan wilayah medan datar, hasil ini masih tergolong baik dan berada dalam batas toleransi untuk pemetaan skala detail. Secara komparatif, kombinasi antara nilai minimum yang sangat kecil, nilai maksimum yang lebih tinggi, dan RMSE yang meningkat menunjukkan bahwa pada medan berbukit terjadi peningkatan variabilitas kesalahan geometrik. Hal ini mengindikasikan bahwa topografi memiliki pengaruh signifikan terhadap ketelitian hasil pemetaan berbasis UAV, khususnya dalam mempengaruhi konsistensi distribusi kesalahan pada model ortofoto.

3.3 Hasil Pengolahan Data Fotogrametri

Hasil pengolahan data fotogrametri pada kedua lokasi penelitian menunjukkan karakteristik yang dipengaruhi oleh kondisi topografi serta jumlah data yang diolah. Pada Desa Bunpenang, sebanyak 3.400 lembar foto udara dengan resolusi spasial 4,35 cm dan cakupan area 6,37 km² diproses menggunakan metode *bundle adjustment*. Hasil optimasi menunjukkan nilai RMS error pada titik GCP sebesar 7,095 mm. Nilai tersebut diperoleh dari laporan hasil pengolahan perangkat lunak Agisoft Metashape Professional, pada bagian hasil optimasi kamera dan penyesuaian jaringan (*bundle adjustment*). Sementara itu, pada Desa Rombuh sebanyak 4.465 lembar foto dengan resolusi spasial 4,74 cm dan cakupan area 9,07 km² diproses dengan metode yang sama. Hasil *bundle adjustment* menunjukkan nilai RMS error pada titik GCP sebesar 3,048 cm, sebagaimana tercantum dalam laporan pengolahan

perangkat lunak. Nilai ini merepresentasikan kesalahan residual setelah proses optimasi parameter kamera dan penyesuaian model geometrik. Ilustrasi perbandingan *error bundle adjustment* GCP tersaji pada Gambar 5.



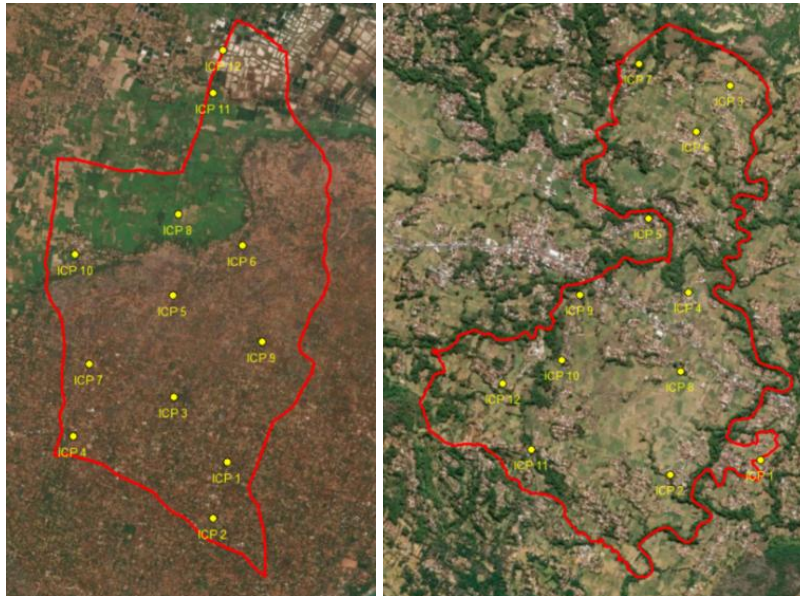
Gambar 5. Perbandingan Error Bundle Adjustment GCP Desa Bunpenang dan Desa Rombuh

Perbedaan nilai RMS error *bundle adjustment* antara kedua lokasi menunjukkan adanya pengaruh kondisi topografi terhadap kualitas hasil pengolahan fotogrametri. Desa Bunpenang yang memiliki karakteristik medan relatif datar cenderung menghasilkan model yang lebih stabil dengan nilai kesalahan yang lebih kecil. Sebaliknya, Desa Rombuh yang didominasi oleh medan berbukit menunjukkan nilai kesalahan yang lebih besar, yang dapat disebabkan oleh variasi elevasi yang tinggi sehingga mempengaruhi proses pencocokan titik (*tie points*) dan kestabilan model.

Meskipun jumlah foto udara pada Desa Rombuh lebih banyak dibandingkan Desa Bunpenang, hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan jumlah citra tidak secara langsung diikuti oleh peningkatan ketelitian geometrik. Berdasarkan hasil penelitian ini, perbedaan ketelitian lebih konsisten berkorelasi dengan kondisi topografi dan karakteristik medan. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa dalam konteks studi ini, faktor topografi memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap variasi ketelitian dibandingkan jumlah data citra yang diolah. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih menekankan pentingnya karakteristik topografi sebagai faktor yang perlu dipertimbangkan dalam proses rekonstruksi fotogrametri berbasis UAV, dibandingkan hanya berfokus pada jumlah citra yang diakuisisi.

3.4 Hasil Analisis Ketelitian Geometrik dan Perbandingan Medan

Analisis ketelitian geometrik dilakukan menggunakan 12 titik ICP (Tabel 2 dan Tabel 3) pada setiap lokasi penelitian dengan menghitung nilai RMSE sebagai indikator tingkat kesalahan posisi horizontal. Distribusi titik ICP di lokasi studi tersaji pada Gambar 6. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai RMSE pada Desa Bunpenang yang merepresentasikan medan datar sebesar 0,119 meter, sedangkan pada Desa Rombuh yang merepresentasikan medan berbukit sebesar 0,179 meter. Perbedaan nilai RMSE tersebut menunjukkan bahwa tingkat ketelitian geometrik pada medan datar lebih tinggi dibandingkan dengan medan berbukit. Nilai RMSE yang lebih besar pada Desa Rombuh mengindikasikan adanya pengaruh variasi elevasi yang menyebabkan peningkatan distorsi geometrik serta mempengaruhi akurasi model fotogrametri.



Gambar 6. Distribusi ICP di lokasi Desa Bunpenang (kiri) dan Desa Rombuh (kanan)

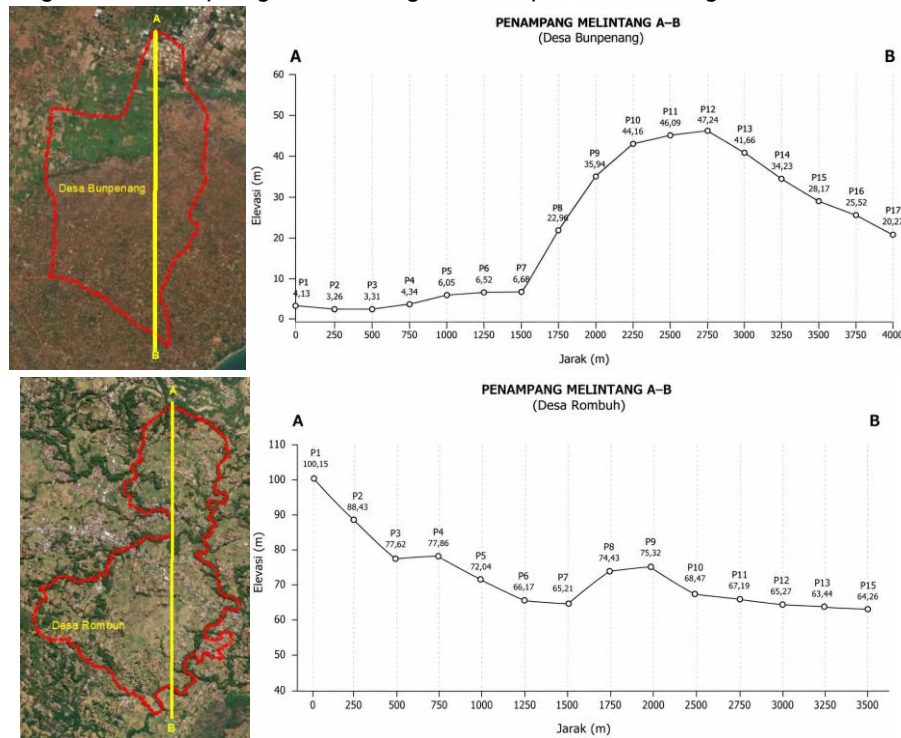
Tabel 2. Koordinat ICP di Desa Bunpenang, Kabupaten Sumenep

Nomor Titik	Nama Titik	X	X	Y	Y	$(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2$
		(Koordinat ICP Lapangan)	(Koordinat ICP Orthophoto)	(Koordinat ICP Lapangan)	(Koordinat ICP Orthophoto)	
A	B	C	D	E	F	G
1	ICP1	42916,144	42916,211	728685,423	728685,414	0,005
2	ICP2	42804,642	42804,874	728268,181	728268,234	0,057
3	ICP3	42516,086	42516,196	729169,280	729169,370	0,024
4	ICP4	41770,011	41769,963	728877,277	728877,337	0,006
5	ICP5	42512,568	42512,525	729924,357	729924,383	0,003
6	ICP6	43022,251	43022,216	730293,114	730293,157	0,003
7	ICP7	41890,559	41890,484	729415,113	729415,169	0,009
8	ICP8	42551,567	42551,586	730523,359	730523,298	0,004
9	ICP9	43170,996	43170,969	729581,338	729581,269	0,005
10	ICP10	41785,582	41785,483	730228,681	730228,670	0,010
11	ICP11	42805,454	42805,271	731423,563	731423,493	0,038
12	ICP12	42883,114	42883,044	731741,008	731740,973	0,006
Jumlah	0,169	RMSE	0,119			
Rata ²	0,014	CE90	0,18			

Tabel 3. Koordinat ICP di Desa Rombuh, Kabupaten Pamekasan

Nomor Titik	Nama Titik	X	X	Y	Y	$(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2$
		(Koordinat ICP Lapangan)	(Koordinat ICP Orthophoto)	(Koordinat ICP Lapangan)	(Koordinat ICP Orthophoto)	
A	B	C	D	E	F	G
1	ICP1	304373,922	304373,789	717710,463	717710,482	0,018
2	ICP2	303802,175	303802,279	717621,056	717621,012	0,005
3	ICP3	304180,646	304180,726	720064,888	720064,746	0,027
4	ICP4	303919,526	303919,39	718766,337	718766,261	0,024
5	ICP5	303669,487	303669,715	719228,632	719228,791	0,077
6	ICP6	303967,797	303967,962	719775,646	719775,564	0,014
7	ICP7	303604,472	303604,966	720204,378	720204,096	0,018
8	ICP8	303867,919	303867,878	718269,480	718269,735	0,011
9	ICP9	303232,695	303232,878	718747,789	718747,611	0,065
10	ICP10	303118,467	303118,564	718341,133	718341,274	0,029
11	ICP11	302927,138	302927,26	717777,323	717777,142	0,048
12	ICP12	302749,367	302749,487	718194,522	718194,335	0,049
Jumlah	0,385	RMSE	0,179			
Rata ²	0,032	CE90	0,272			

Berdasarkan profil melintang A-B dengan arah potongan utara-selatan pada Gambar 7, Desa Bunpenang memiliki variasi elevasi yang relatif lebih rendah dan fluktuasi topografi yang lebih landai dibandingkan Desa Rombuh. Elevasi pada Desa Bunpenang berkisar antara 5–46 meter dengan perubahan relief yang tidak terlalu ekstrem. Sementara itu, Desa Rombuh menunjukkan variasi elevasi yang lebih besar, yaitu sekitar 64–131 meter, disertai perubahan lereng yang lebih tajam dan morfologi permukaan yang lebih kompleks. Studi ini menunjukkan perbedaan karakteristik topografi terindikasi memberikan pengaruh terhadap tingkat distorsi geometrik pada hasil fotogrametri UAV.



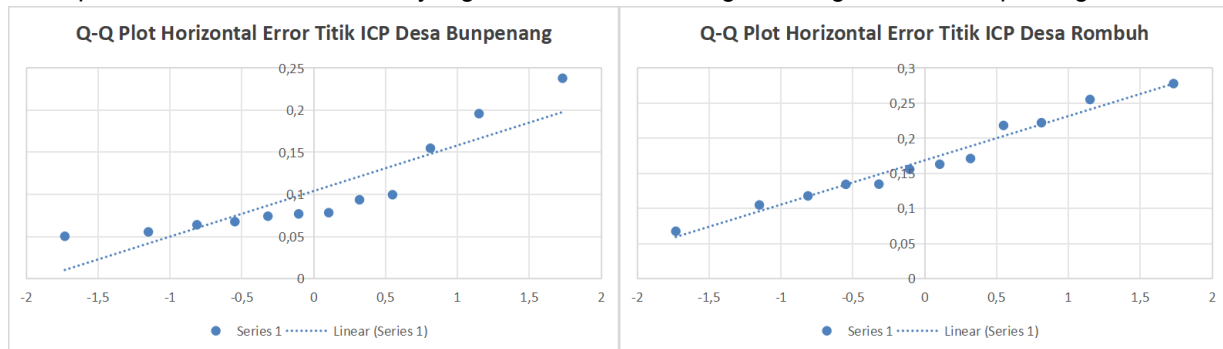
Gambar 7. Profil melintang Desa Bunpenang (atas) dan Desa Rombuh (bawah)

Pada wilayah dengan variasi elevasi yang tinggi seperti Desa Rombuh, perubahan ketinggian yang signifikan menyebabkan *displacement relief* lebih besar pada orthofoto. Kondisi ini mengakibatkan objek pada area lereng dan punggung mengalami pergeseran posisi geometrik relatif terhadap pusat foto. Berdasarkan studi ini, semakin besar perbedaan elevasi, maka semakin tinggi potensi distorsi geometrik yang muncul pada orthophoto maupun model permukaan hasil rekonstruksi.

Pada Desa Bunpenang, kondisi topografi yang relatif landai menyebabkan distorsi relief lebih kecil sehingga geometri citra lebih stabil. Akibatnya, proses ortorektifikasi dan pembentukan model permukaan dapat dilakukan dengan tingkat ketelitian yang lebih baik. Nilai perbedaan koordinat (ΔX , ΔY , dan ΔZ) pada daerah dengan relief rendah umumnya lebih kecil dibandingkan wilayah dengan relief terjal pada penelitian ini. Sebaliknya, pada Desa Rombuh, variasi elevasi yang lebih tinggi menyebabkan ketelitian model fotogrametri cenderung menurun. Hal ini terlihat dari adanya peningkatan kemungkinan error vertikal dan horizontal akibat efek *relief displacement* serta ketidakseragaman sudut pengambilan citra. Oleh karena itu, studi ini menunjukkan semakin besar variasi elevasi suatu wilayah, maka semakin besar pula potensi distorsi geometrik yang dapat mempengaruhi akurasi model fotogrametri.

Selanjutnya, nilai RMSE dikonversi menjadi Circular Error 90% (CE90) untuk mengevaluasi ketelitian berdasarkan standar yang ditetapkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). Hasil konversi menunjukkan bahwa nilai CE90 pada Desa Bunpenang sebesar 0,180 meter, sedangkan pada Desa Rombuh sebesar 0,272 meter. Berdasarkan standar ketelitian peta dasar BIG untuk peta skala 1:1.000, ketelitian horizontal yang disyaratkan adalah $\leq 0,30$ meter untuk Kelas 1, $\leq 0,60$ meter untuk Kelas 2, dan $\leq 0,90$ meter untuk Kelas 3. Mengacu pada klasifikasi tersebut, nilai CE90 pada Desa Bunpenang sebesar 0,180 meter termasuk dalam Kelas 1, yang menunjukkan tingkat ketelitian geometrik yang tinggi.

Sementara itu, nilai CE90 pada Desa Rombuh sebesar 0,272 meter juga masih termasuk dalam Kelas 1, meskipun memiliki nilai kesalahan yang lebih besar dibandingkan dengan Desa Bunpenang.



Gambar 8. Perbandingan Q–Q Plot distribusi error horizontal titik ICP Desa Bunpenang dan Desa Rombuh

Uji normalitas dilakukan terhadap residual error horizontal titik ICP menggunakan metode Q–Q Plot sebagaimana tersaji pada Gambar 8. Analisis dilakukan dengan membandingkan distribusi data aktual terhadap distribusi normal teoritis berdasarkan nilai probabilitas dan Z teoritis. Berdasarkan hasil Q–Q Plot pada Desa Rombuh, titik-titik residual error horizontal cenderung mengikuti pola garis linear teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi residual memiliki kecenderungan mendekati distribusi normal. Meskipun terdapat sedikit penyimpangan pada bagian akhir distribusi, secara umum pola penyebaran data masih tergolong homogen dan tidak menunjukkan adanya outlier ekstrem. Pada Desa Bunpenang, pola distribusi residual juga menunjukkan kecenderungan linear terhadap garis teoritis distribusi normal. Terlihat adanya penyimpangan yang sedikit lebih besar pada bagian akhir distribusi dibanding beberapa titik di tengah distribusi. Sebagian besar titik berada di sekitar garis regresi sehingga dapat diinterpretasikan bahwa residual error horizontal memiliki distribusi yang mendekati normal. Penyimpangan kecil pada beberapa titik masih dapat diterima karena dipengaruhi oleh kondisi pengukuran lapangan dan proses pemodelan fotogrametri. Hasil uji normalitas menunjukkan bahwa residual error horizontal pada kedua desa secara visual memenuhi asumsi distribusi normal. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa model geometrik orthophoto yang dihasilkan memiliki kualitas yang cukup baik dan stabil untuk digunakan dalam analisis spasial lebih lanjut.

Hasil ini menunjukkan bahwa kedua lokasi penelitian telah memenuhi standar ketelitian peta dasar yang ditetapkan oleh BIG untuk skala tertentu, dengan tingkat ketelitian yang relatif baik. Meskipun kedua lokasi memenuhi Kelas 1, perbedaan nilai ketelitian menunjukkan bahwa kondisi topografi tetap menjadi faktor pembatas dalam pencapaian akurasi optimal pada pemetaan berbasis UAV. Pada medan berbukit, variasi elevasi yang tinggi menyebabkan kompleksitas dalam proses rekonstruksi model, sehingga berpotensi meningkatkan kesalahan posisi. Oleh karena itu, pada wilayah dengan topografi berbukit diperlukan perhatian lebih dalam hal distribusi GCP, pengaturan parameter penerbangan, serta proses pengolahan data fotogrametri guna meminimalkan kesalahan dan meningkatkan kualitas hasil pemetaan.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketelitian geometrik foto udara berbasis UAV dipengaruhi oleh variasi topografi medan. Nilai *bundle adjustment* pada titik GCP di Desa Bunpenang sebesar 7,095 mm lebih kecil dibandingkan Desa Rombuh sebesar 30,478 mm, yang menunjukkan model fotogrametri lebih stabil pada medan datar. Analisis ketelitian menggunakan ICP menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,119 meter pada Desa Bunpenang dan 0,179 meter pada Desa Rombuh. Hasil konversi ke CE90 menunjukkan nilai masing-masing sebesar 0,180 meter dan 0,272 meter. Berdasarkan standar ketelitian peta dasar dari Badan Informasi Geospasial (BIG), kedua lokasi termasuk dalam kategori Kelas 1. Meskipun demikian, perbandingan nilai ketelitian geometrik antara kedua lokasi menunjukkan bahwa wilayah dengan karakteristik medan berbukit cenderung memiliki nilai kesalahan yang lebih tinggi dibandingkan wilayah medan datar dalam konteks penelitian ini. Hasil tersebut mengindikasikan adanya

pengaruh kondisi topografi terhadap variasi akurasi pemetaan berbasis UAV, meskipun diperlukan analisis statistik lanjutan untuk memastikan signifikansi perbedaan tersebut.

Daftar Pustaka

- Abdalla, U. A., Dewi, C., & Anisa, R. (2025). Kajian Ketelitian Planimetrik dan Geometrik Peta Foto Udara dengan Variasi Tinggi Terbang UAV. *Journal of Geodesy and Geomatics DATUM*, 5(1), 13-22. <https://doi.org/10.23960/datum.v5i1.6815>
- Agustina, F. D., Tjahjadi, M. E., & Rahmadany, V. (2022). Pembuatan Peta Kemiringan Lereng Menggunakan DEM Presisi Foto Udara untuk Mitigasi Bencana Longsor, Studi Kasus di Pandansari, Ngantang, Kabupaten Malang. *Prosiding Semsina 2022 Metaverse ITN Malang*, 17-23.
- Aziz, A., & Maharani, M. (2025). Perbandingan Akurasi UAV Multirotor dan Fixed Wing Berbasis Post Processing Kinematic (PPK) untuk Pemetaan Skala Besar. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 5(2), 127-139. <https://doi.org/10.31315/imagi.v5i2.15792>
- Barroso, A., Henriques, R., Cerqueira, A., Gomes, P., Antunes, I. M. H. R., Reis, A. P. M., Valente, T. M. (2025). *Acid mine drainage and waste dispersion in legacy mining sites: An integrated approach using UAV photogrammetry and geospatial analysis*. *Journal of Hazardous Materials*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138827>
- Ćwiąkała, P., Puniach, E., Pastucha, E., & Gruszczyński, W. (2026). *The impact of processing parameters on high-accuracy measurements in UAV photogrammetry*. *Measurement*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.120315>
- Derenyi, E., E. (1995). *Digital Photogrammetry: Current Status and Future Prospects*. *Geomatica*, 49(4), 425-431. <https://doi.org/10.5623/geomat-1995-0060>
- Firmansyah, Y. (2024). Pemanfaatan Foto Udara untuk Rencana Pengembangan Kawasan Wisata Desa Tamansari. *Jurnal Teknik*, 25(1), 45-49.
- Glantz, E. J., Gilbreath, D., Anton, A., Ritter, F.E., Stager, S. J., & Emani, R. (2020). *UAV Use in Disaster Management*. *Proceedings of the 17th ISCRAM Conference*, 914-921.
- Hu, D., & Minner, J. (2023). *UAVs and 3D City Modeling to Aid Urban Planning and Historic Preservation: A Systematic Review*. *Remote Sens.*, 15(23), 1-27. <https://doi.org/10.3390/rs15235507>
- Jiang, W., Jiang, S., & Xiao, X. (2022). *Editorial on Special Issue "Techniques and Applications of UAV-Based Photogrammetric 3D Mapping"*. *Remote Sens.*, 14(15), 1-4. <https://doi.org/10.3390/rs14153804>
- Kedys, J., Tchappi, I., & Najjar, A. (2023). *UAVs for Disaster Management - An Exploratory Review*. *The 14th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks*, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.184>
- Kersten, T., Preuß, F., Teten, D., & Lindstaedt, M. (2025). *UAV/UAS Photogrammetry for Use in Cadastral Surveying*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-6-2025, 169-175. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-6-2025-169-2025>
- Khafiza, S. R., Harmanto, H., Anasiru, R. H., & Hamdani, A. (2024). Implementasi Teknik Foto Udara untuk Verifikasi Luas Lahan Baku Sawah (LBS) Menggunakan Drone Mavic 2 Pro (Studi kasus: Desa Margajaya, Kecamatan Bogor Barat, Kota Bogor, Jawa Barat). *Journal of Agriculture Engineering and Applied Technology*, 1(1), 55-65.
- Kurniawan, A., Taufik, M., & Yudha, I.S. (2015). Pengaruh Jumlah dan Sebaran Gcp Pada Proses Rektifikasi Citra Worldview II (Studi Kasus : Kota Kediri, Jawa Timur). *Geoid Journal of Geodesy and*

- Geomatics*, 11(1), 67-74. <http://dx.doi.org/10.12962%2Fj24423998.v11i1.1101>
- Nugraha, R., & Putrasakti, S. (2019). Pengaruh Sebaran Data Ground Control Point (GCP) dalam Pengolahan Data Foto Udara pada Area In-Pit Mapping menggunakan Drone Quadcopter DJI Phantom 4 RTK berbasis Base GPC Metode Real Time Kinematic (RTK). *Prosiding TPT XXVIII PERHAPI*, 191-200.
- Pandego, H. A. M., Fajrin, F., & Arini, D. (2024). Analisis Jumlah dan Distribusi Ground Control Point yang Efektif dan Efisien pada Pemetaan Foto Udara (Studi Kasus di Desa Kohong, Kecamatan Barito Tuhup Raya, Kabupaten Murung Raya, Provinsi Kalimantan Tengah). *Venus Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(5), 186-204. <https://doi.org/10.61132/venus.v2i5.599>
- Prayogo, I. P., H., Manoppo, F. J., & Lefrandt, L. I. R. (2020). Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter dalam Pemetaan Digital (Fotogrametri) menggunakan Kerangka Ground Control Point (GCP). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 10(1), 47-58.
- Putrawiyanta, I. P., Novalisae, N., Noveriady, N., Ferdinandus, F., & Drobank, A. (2023). Pemanfaatan Teknologi Drone untuk Pemetaan Perubahan Rona Bentang Alam pada Wilayah Pertambangan. Palangka Raya. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Nasional*, 5(3), 50-56. <https://doi.org/10.54783/jin.v5i3.783>
- Purba, R., Hasan, H., & Sasmito, K. (2022). Pengaruh Penggunaan Ground Control Point dalam Pengolahan Foto Udara Pada PT Internasional Prima Coal Sub PT Coalindo Adhi Perkasa Kota Samarinda Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral FT Unmul*, 10(1). <http://dx.doi.org/10.30872/jtm.v10i1.7432>
- Setiawan, M. A., Wahyono, E. B., & Suyudi, B. (2019). Hasil Pemotretan Unmanned Aerial Vehicle pada Variasi Topografi untuk Pengukuran dan Pemetaan. *Jurnal Tunas Agraria*, 2(1), 21-44.
- Sondang, A. V. 2018. Pembuatan Model Ortofoto Hasil Perekaman dengan Wahana UAV menggunakan Perangkat Lunak Fotogrametri. *Jurnal Tekno Global*, 6(2), 1-5. <https://doi.org/10.36982/jtg.v6i2.396>
- Suhadi, S., Dwiarmoko, M. U., & Saismana, U. (2019). Analisis Pengaruh Sebaran GCP (Ground Control Point) terhadap Akurasi Hasil Orthophoto di Pit Cendana PT Kalimantan Prima Persada Site Bre. *Jurnal Geosapta*, 5(2). <http://dx.doi.org/10.20527/jg.v5i2.6832>
- Wang, J., Huang, H., Ariyasena, H.H.S., Zhao, J., Zhang, X., Gao, X., Zhao, X., & Zhao, Y. (2025). A UAV-based method for root zone soil moisture modeling of different farmland scale with grain and economic crops. *Agricultural Water Management*. 321. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109932>
- Wolf, P. R. (1993). *Elemen Fotogrametri Dengan Interpretasi Foto Udara dan Penginderaan Jauh*, Edisi Kedua. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.(OK)
- Xiao, T., Yan, Q., Ma, W., & Deng, F. (2021). *Progressive Structure from Motion by Iteratively Prioritizing and Refining Match Pairs*. *Remote Sens.*, 13(12), 51-73. <https://doi.org/10.3390/rs13122340>
- Yao, G., Yilmaz, A., Meng, F., & Zhang, L. (2021). *Review of Wide-Baseline Stereo Image Matching Based on Deep Learning*. *Remote Sens.*, 13(16), 5-26. <https://doi.org/10.3390/rs13163247>
- Zhang, K., Fiwa, L., Kurata, M., Okazawa, H., Luweya, K. A. B., Mandal, M. S. H., & Sakai, T. (2024). *Precise LULC classification of rural area combining elevational and reflectance characteristics using UAV*. *Scientific African*, 26, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02431>
- Zhou, Y., Zheng, X., Gao, J., Shi, Q., & Liu, X. (2026). *A geometric consistency constrained hierarchical global SfM for large-scale UAV images*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.105075>
- Zidan, M. (2021). Pengaruh Variasi Topografi terhadap Tingkat Ketelitian untuk Peta Dasar Pendaftaran Tanah menggunakan Metode Fotogrametri. Universitas Pendidikan Indonesia.