
Evaluasi Ketelitian Ortofoto dari Hasil Pemotretan Drone Menggunakan Minimum GCP dan Non-GCP (Mode RTK) terhadap Hasil Ortofoto dengan GCP Tersebar Merata

(Studi Kasus: Desa Tadang Palie, Kecamatan Sibulue, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan)

Accuracy Evaluation of Drone-Based Orthophoto Using Minimum and Non-Ground Control Points (RTK Mode) Compared to Orthophoto with Evenly Distributed Ground Control Points

Sungsang Bagus Nugroho¹, M. Edwin Tjahjadi², Adkha Yuliandha M³

¹ Program Studi Teknik Geodesi S-1, Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia

² Program Studi Teknik Geodesi S-1, Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia

³ Program Studi Teknik Geodesi S-1, Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia

Penulis Korespondensi: Sungsang Bagus Nugroho | **Email:** sungsangbagus10@gmail.com

Diterima (Received): D/M/Y Direvisi (Revised): D/M/Y Diterima untuk Publikasi (Accepted): D/M/Y

ABSTRAK

Perencanaan pemetaan skala besar berbasis UAV, seperti pada pekerjaan Integrated Land Administration Spatial Planning (ILASP), umumnya masih bergantung pada Ground Control Point (GCP) yang tersebar merata, meskipun pemasangan dan pengukurannya di lapangan memerlukan waktu dan sumber daya yang besar. Kehadiran teknologi Real-Time Kinematic (RTK) pada wahana UAV menawarkan alternatif pemetaan dengan GCP minimum maupun tanpa GCP (non-GCP), namun tingkat ketelitiannya perlu diuji terhadap standar Badan Informasi Geospasial (BIG). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi ketelitian horizontal (CE90) dan vertikal (LE90) ortofoto yang dihasilkan dari tiga skenario akuisisi, yaitu mode non-RTK dengan GCP tersebar merata, mode RTK dengan GCP minimum, dan mode RTK tanpa GCP, pada lokasi Desa Tadang Palie, Kabupaten Bone. Akuisisi data menggunakan drone DJI Matrice 4 Enterprise pada tinggi terbang 120 meter, sedangkan koordinat titik kontrol diperoleh melalui pengukuran GNSS metode rapid static. Pengolahan foto dilakukan dengan perangkat lunak Agisoft Metashape melalui proses Bundle Block Adjustment, dan ketelitian dievaluasi menggunakan 12 titik Independent Check Point (ICP) sesuai Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mode RTK non-GCP memberikan ketelitian terbaik dengan CE90 sebesar 0,010 m dan LE90 sebesar 0,001 m, diikuti mode non-RTK GCP merata dan RTK minimum GCP. Ketiga metode tersebut memenuhi klasifikasi Kelas 1 untuk peta skala 1:1.000, sehingga penggunaan mode RTK terbukti efektif dan efisien untuk pemetaan area persawahan tanpa mengorbankan ketelitian geometrik.

Kata Kunci: fotogrametri UAV, ground control point, RTK, ortofoto, CE90/LE90

ABSTRACT

Large-scale UAV-based mapping projects, such as the Integrated Land Administration Spatial Planning (ILASP) program, commonly rely on evenly distributed Ground Control Points (GCPs), although installing and surveying them in the field demands considerable time and resources. Real-Time Kinematic (RTK) technology on UAV platforms offers an alternative that uses a minimum number of GCPs or none at all, yet its accuracy must still be tested against the standards of the Geospatial Information Agency (BIG). This study evaluates the horizontal (CE90) and vertical (LE90) accuracy of orthophotos generated from three acquisition scenarios, namely non-RTK mode with evenly distributed GCPs, RTK mode with minimum GCPs, and RTK mode without GCPs, in Tadang Palie Village, Bone Regency. Data were acquired using a DJI Matrice 4 Enterprise drone at a flying height of 120 m, while control-point coordinates were obtained through rapid-static GNSS surveys. Photo processing was carried out in Agisoft Metashape using Bundle Block Adjustment, and accuracy was assessed using 12 Independent Check Points (ICPs) in accordance with BIG Regulation No. 6 of 2018. The results show that the non-GCP RTK mode produced the best accuracy, with a CE90 of 0.010 m and an LE90 of 0.001 m, followed by the non-RTK evenly distributed GCP mode and the minimum-GCP RTK mode. All three methods satisfy Class 1 requirements for 1:1,000-scale maps, indicating that RTK-based acquisition is effective and efficient for paddy-field mapping without sacrificing geometric accuracy.

Keywords: UAV photogrammetry, ground control point, RTK, orthophoto, CE90/LE90

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) membawa pengaruh signifikan terhadap teknik pengumpulan data spasial, termasuk pada proyek pemetaan bidang tanah oleh Badan Pertanahan Nasional yang mensyaratkan akuisisi data persil menggunakan UAV. Teknologi ini memungkinkan penyediaan data citra beresolusi tinggi secara cepat dan efektif dibandingkan teknik survei terestris konvensional. Produk utama dari pemotretan udara adalah ortofoto, yaitu citra yang telah dikoreksi terhadap distorsi topografi dan orientasi kamera sehingga merepresentasikan objek pada posisi geografis sebenarnya dengan skala seragam layaknya peta (Production et al., 2024).

Ketelitian ortofoto secara umum dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satu yang paling krusial adalah persebaran Ground Control Point (GCP) sebagai titik acuan koordinat pasti yang digunakan pada proses georeferencing. Ulvi (2021) membuktikan bahwa distribusi GCP di tepi area pemotretan memberikan akurasi planimetrik terbaik pada wahana non-RTK. Namun demikian, kebutuhan untuk menempatkan dan mengukur GCP di lapangan pada area survei yang luas atau bertopografi ekstrem, seperti perbukitan curam atau lahan basah, membutuhkan waktu tempuh, tenaga survei, dan biaya operasional tambahan yang tidak sedikit, mengingat setiap titik GCP harus diukur menggunakan GNSS metode statik dengan durasi pengamatan tertentu agar diperoleh ketelitian yang memadai.

Seiring perkembangan teknologi, sistem Real-Time Kinematic (RTK) memungkinkan integrasi GPS berketelitian tinggi pada UAV yang menawarkan alternatif pemetaan tanpa GCP secara masif, atau dengan jumlah GCP minimum, tanpa mengorbankan kualitas hasil pemetaan (Forlani et al., 2018). Akan tetapi, pertanyaan terkait seberapa besar pengaruh jumlah dan distribusi GCP, serta efektivitas mode RTK tanpa GCP terhadap ketelitian produk ortofoto, masih perlu diuji secara empiris terhadap standar ketelitian peta dasar yang ditetapkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG), sebagaimana juga menjadi perhatian Cho dan Lee (2023) dalam konteks gangguan sinyal RTK pada fotogrametri UAV.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi tingkat ketelitian horizontal (CE90) dan vertikal (LE90) ortofoto yang dihasilkan dari metode minimum GCP dan non-GCP (mode RTK) dibandingkan dengan ortofoto hasil mode non-RTK dengan GCP tersebar merata, serta menentukan skala peta yang dapat dipenuhi oleh masing-masing metode berdasarkan Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar pertimbangan metodologis bagi optimalisasi distribusi GCP pada pemetaan area persawahan, khususnya pada pekerjaan Integrated Land Administration Spatial Planning (ILASP).

Keunikan penelitian ini terletak pada perbandingan simultan tiga skenario akuisisi, yaitu non-RTK dengan GCP tersebar merata, RTK dengan GCP minimum, dan RTK tanpa GCP, yang dilaksanakan pada satu lokasi, satu jalur terbang, dan parameter pemotretan yang identik, sehingga pengaruh murni strategi kontrol tanah terhadap ketelitian ortofoto dapat diisolasi tanpa bias akibat perbedaan kondisi lapangan antar-skenario, sebagaimana umum dijumpai pada penelitian-penelitian terdahulu yang membandingkan hanya dua skema pada lokasi maupun waktu pemotretan yang berbeda. Selain itu, penelitian ini dilaksanakan langsung pada konteks operasional proyek ILASP di lahan persawahan Kabupaten Bone menggunakan wahana UAV generasi terbaru DJI Matrice 4 Enterprise, sehingga hasilnya memberikan bukti empiris yang relevan secara praktis bagi penyedia jasa survei pertanahan skala besar di Indonesia, khususnya dalam pengambilan keputusan mengenai strategi distribusi GCP yang paling efisien tanpa mengorbankan ketelitian geometrik produk akhir.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Fotogrametri UAV dan Ortofoto

Fotogrametri udara merupakan teknik yang memanfaatkan citra dari platform udara untuk memperoleh informasi tiga dimensi berdasarkan prinsip triangulasi geometri, dan menghasilkan produk berupa ortofoto, Digital Elevation Model (DEM), serta point cloud tiga dimensi yang dapat diaplikasikan pada pemetaan dan pemodelan ruang (Husna et al., 2016). Ortofoto sendiri didefinisikan sebagai citra yang telah mengalami koreksi terhadap distorsi akibat perbedaan topografi dan orientasi kamera, sehingga merepresentasikan objek pada lokasi geografis sebenarnya dengan skala seragam layaknya peta (Production et al., 2024). Point cloud yang menjadi dasar pembentukan ortofoto dihasilkan melalui dua tahapan utama, yaitu Structure from Motion (SfM) untuk mengestimasi posisi kamera dan geometri 3D secara kasar (sparse point cloud), dan Multi-View Stereo (MVS) untuk menghasilkan awan titik rapat (dense point cloud) dengan densitas jutaan titik (Westoby et al., 2012).

Model permukaan yang dihasilkan dari proses fotogrametri dibedakan menjadi tiga istilah, yaitu Digital Elevation Model (DEM) sebagai representasi statistik permukaan bumi secara umum, Digital Terrain Model (DTM) yang telah difilter dari objek non-tanah seperti vegetasi dan bangunan, serta Digital Surface Model (DSM) yang merepresentasikan permukaan teratas beserta seluruh objek di atasnya. DSM inilah yang digunakan sebagai acuan geometrik untuk proses ortorektifikasi dalam pembentukan ortofoto.

2.2. Ground Control Point dan Independent Check Point

Ground Control Point (GCP) adalah titik kontrol di permukaan tanah yang koordinatnya diketahui secara presisi dan digunakan sebagai referensi geospasial dalam proses pemetaan fotogrametri, sedangkan Independent Check Point (ICP) adalah titik kontrol yang juga memiliki koordinat akurat namun tidak dilibatkan dalam proses pengikatan citra, melainkan digunakan untuk mengevaluasi akurasi hasil akhir pemetaan (Garcia & Oliveira, 2020). Menurut Peraturan BIG Nomor 1 Tahun 2020, penempatan GCP direncanakan pada pojok, perimeter, dan tengah blok area pekerjaan, dengan distribusi yang merata mencakup seluruh blok. Linder (2016) juga menekankan bahwa distribusi titik kontrol yang ideal harus mencakup seluruh area blok pemotretan, terutama pada bagian tepi dan sudut, guna menjamin stabilitas geometri model fotogrametri.

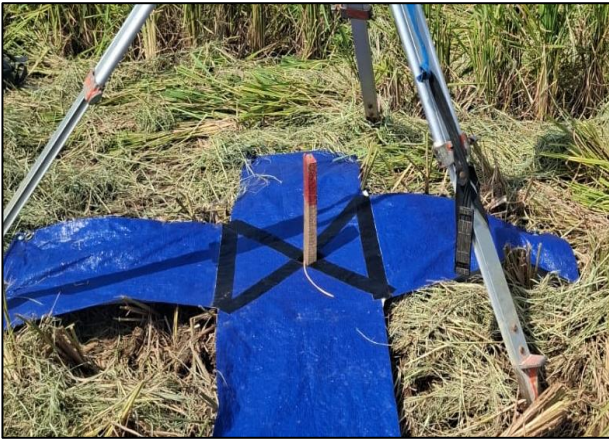


Figure 1. Premark ICP & GCP

Jumlah titik uji ICP yang disyaratkan mengacu pada luas area kerja, misalnya untuk luas area kurang dari 250 km² disyaratkan minimal 12 titik uji horizontal sesuai Peraturan BIG Nomor 1 Tahun 2020 yang merujuk SNI 8202:2019. Beberapa kajian terdahulu, seperti Ulvi (2021), menunjukkan bahwa jumlah dan pola distribusi GCP berpengaruh signifikan terhadap akurasi model ortofoto yang dihasilkan, meskipun penelitian tersebut dilakukan pada wahana non-RTK sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi ketika GCP diminimalkan pada wahana berteknologi RTK.

2.3. Teknologi RTK pada UAV

Drone dengan fitur Real-Time Kinematic (RTK) melibatkan komunikasi aktif antara dua sensor GNSS, yaitu rover yang terpasang pada drone dan base station di permukaan tanah, sehingga koreksi posisi kamera dapat dilakukan secara langsung saat pemotretan berlangsung, berbeda dengan drone standar yang bergantung sepenuhnya pada GCP untuk mengoreksi posisi (Forlani et al., 2018). Penentuan posisi menggunakan GNSS pada

dasarnya merupakan reseksi jarak dari receiver ke beberapa satelit secara simultan, yang dapat dilakukan dengan metode statik jaring untuk ketelitian tinggi maupun metode rapid static (statik singkat) berdurasi 5-20 menit yang lebih efisien dari sisi waktu namun tetap memenuhi kebutuhan ketelitian untuk penentuan titik kontrol (Yuwono & Apsandi, 2018).

Wahana DJI Matrice 4 Enterprise yang digunakan pada penelitian ini telah mengintegrasikan modul RTK dengan spesifikasi akurasi horizontal 1 cm + 1 ppm dan akurasi vertikal 1,5 cm + 1 ppm, sehingga posisi kamera pada saat akuisisi foto sudah memiliki ketelitian tinggi yang berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap GCP di lapangan. Beberapa studi seperti Cho dan Lee (2023) menekankan bahwa kualitas sinyal RTK sangat menentukan keberhasilan pemetaan non-GCP, terutama ketika terjadi gangguan koneksi terhadap base station melalui protokol Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP).

2.4. Bundle Block Adjustment dan Uji Ketelitian

Bundle Block Adjustment (BBA) merupakan solusi simultan untuk parameter orientasi dalam dan luar serta koordinat titik objek, yang didasarkan pada Persamaan Kolinearitas yang menyatakan bahwa pusat proyeksi kamera, titik pada citra, dan titik pada objek di ruang nyata terletak pada satu garis lurus (Verykokou & Ioannidis, 2018). Proses ini disertai self-calibration untuk menghitung parameter distorsi lensa (focal length, principal point, radial distortion, dan tangential distortion) secara otomatis mengikuti model matematika Brown (Remondino & Fraser, 2006).

Secara matematis, Bundle Block Adjustment dapat dibuat dalam Persamaan (2.4) dan (2.5), dimana persamaan tersebut merupakan kolinearisasi yang menyatakan bahwa titik objek (X, Y, Z), pusat kamera, dan titik foto (x, y) terletak pada satu garis lurus.

$$x - x_0 = -f \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{12}(Y-Y_0) + r_{13}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)}$$

$$y - y_0 = -f \frac{r_{21}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{23}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)}$$

Dimana pada persamaan (2.6) r_{11} s.d r_{33} merupakan Matriks Rotasi

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$r_{11} = \cos \phi \cos \kappa$$

$$r_{12} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa$$

$$r_{13} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa$$

$$r_{21} = -\cos \phi \sin \kappa$$

$$r_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa$$

$$r_{23} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa$$

$$r_{31} = \sin \phi$$

$$r_{32} = -\sin \omega \cos \kappa$$

$$r_{33} = \cos \omega \cos \kappa$$

Matriks R merupakan matriks rotasi ortogonal yang mendefinisikan hubungan antara sistem koordinat foto dan sistem koordinat tanah. Elemen r_{11} hingga r_{33} diturunkan dari tiga sudut rotasi independen, yaitu ω , φ , κ .

Keterangan:

- x, y : Koordinat titik pada citra foto.
- x_0, y_0 : Koordinat titik utama foto (*principal point*).
- F : Panjang fokus lensa (*focal length*).
- X, Y, Z : Koordinat objek di lapangan (system tanah).
- X_0, Y_0, Z_0 : Koordinat pusat kamera (Parameter EO)
- $r_{11} - r_{33}$: Elemen matriks rotasi (Parameter EO Sudut ω , φ , κ)

Ketelitian geometrik produk fotogrametri umumnya diuji menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) yang membandingkan koordinat hasil pengolahan dengan koordinat ICP hasil pengukuran lapangan. Nilai RMSE horizontal dan vertikal selanjutnya dikonversi menjadi Circular Error 90% (CE90) dan Linear Error 90% (LE90) mengikuti standar US National Map Accuracy Standards yang diadopsi dalam Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Beberapa penelitian terdahulu, di antaranya Prayogo dkk. (2020) dan Seo dkk. (2024), memperlihatkan bahwa optimalisasi jumlah dan pola distribusi GCP dapat meningkatkan efisiensi pemrosesan fotogrametri tanpa mengurangi ketelitian geometrik secara signifikan, sedangkan penelitian ini memperluas kajian tersebut dengan turut menyertakan skenario RTK tanpa GCP sama sekali.

3. Data dan Metodologi

3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Desa Tadang Palie, Kecamatan Sibulue, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan, dengan luas wilayah sekitar 4,65 km² atau 465 hektare, yang merupakan salah satu desa lokasi pekerjaan Integrated Land Administration Spatial Planning (ILASP) tahun 2026. Area penelitian didominasi oleh lahan persawahan dengan topografi relatif datar, sehingga representatif untuk menguji efektivitas strategi kontrol tanah pada kondisi lapangan terbuka.



3.2. Alat dan Bahan

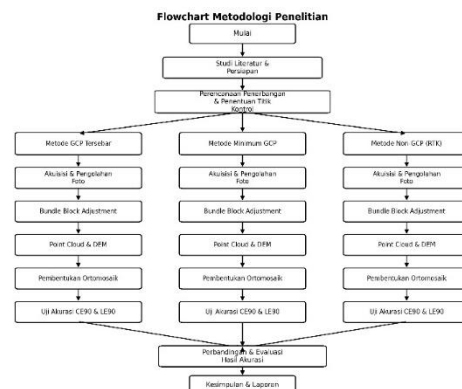
Penelitian ini menggunakan drone DJI Matrice 4 Enterprise beserta remote control untuk akuisisi data foto udara, GNSS Geodetik Comnav T300 beserta statif dan tribrach untuk pengukuran GCP dan ICP, serta pre-mark sebagai penanda titik kontrol agar mudah diidentifikasi pada foto udara. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Agisoft Metashape sebagai perangkat utama pengolahan fotogrametri (Bundle Block Adjustment, ekstraksi parameter Exterior Orientation, dan pembuatan ortofoto), Trimble Business Center untuk pengolahan data statik GNSS, serta Microsoft Excel untuk analisis statistik RMSE. Ringkasan alat dan bahan disajikan pada Tabel 1.

Alat/Bahan	Fungsi
DJI Matrice 4 Enterprise + RC	Akuisisi data foto udara
GNSS Geodetic + Controller	Pengukuran koordinat GCP dan ICP
Statif + Tribrach, Pre-mark	Penyangga antenna dan penanda titik kontrol
Agisoft Metashape	Pengolahan BBA dan pembuatan ortofoto
Trimble Business Center	Pengolahan data statik GNSS
Microsoft Excel	Analisis statistik RMSE, CE90, LE90

Tabel 1 Alat dan bahan penelitian

3.3. Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar, penelitian dilaksanakan melalui tahapan sebagai berikut: (1) studi literatur dan survei awal untuk menentukan parameter terbang; (2) persiapan dan kalibrasi alat UAV serta GNSS; (3) pembuatan jalur terbang menggunakan ArcGIS dan Google Earth; (4) pemasangan pre-mark pada titik GCP dan ICP di lapangan; (5) pengukuran koordinat titik kontrol menggunakan metode rapid static maupun base RTK; (6) akuisisi foto udara pada tiga skenario (non-RTK GCP merata, RTK minimum GCP, dan RTK non-GCP); (7) Bundle Block Adjustment menggunakan Agisoft Metashape; (8) pembentukan point cloud, DSM, dan ortofoto; (9) uji akurasi CE90 dan LE90 menggunakan koordinat ICP; serta (10) evaluasi hasil dan penyusunan kesimpulan mengenai kelas ketelitian peta yang dapat dipenuhi.



3.4. Uraian Metode Pengambilan Data

Pengambilan data titik kontrol dilakukan menggunakan metode rapid static GNSS berdurasi 30 menit per titik, dengan receiver base station ditempatkan pada titik referensi FSI 02 yang terikat pada CORS Barru (cbar) dan CORS Bone (cbne). Pengamatan dilakukan pada kondisi lapangan terbuka untuk meminimalkan gangguan sinyal seperti multipath dan obstruksi dari bangunan maupun vegetasi. Perencanaan jumlah dan persebaran ICP mengacu pada Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018, yaitu 12 titik untuk luas area kurang dari 250 km², sedangkan GCP direncanakan tersebar merata pada skenario non-RTK dan diminimalkan menjadi 4 titik di sudut area kerja pada skenario RTK minimum GCP.

Akuisisi foto udara dilaksanakan pada ketinggian terbang 120 m yang menghasilkan resolusi spasial (Ground Sampling Distance) sekitar 3 cm/piksel, dengan forward overlap 80% dan side overlap 70% pada jalur terbang yang identik untuk seluruh skenario. Pemotretan dilakukan sebanyak dua kali pada jalur terbang yang sama, yaitu menggunakan mode navigasi standar (non-RTK) dan mode koreksi langsung (RTK) melalui protokol NTRIP dengan status positioning 'FIX', untuk membandingkan hasil ketelitian antar-mode secara terkendali.

3.5. Uraian Metode Pengolahan Data

Data hasil pemotretan diolah menggunakan Agisoft Metashape melalui tahapan alignment photos dengan kualitas medium, yang menghasilkan 6.037 foto pada mode non-RTK dan 6.596 foto pada mode RTK. Selanjutnya dilakukan input dan marking koordinat GCP dan ICP pada setiap foto yang memuat target premark; pada skenario non-GCP, hanya titik ICP yang di-marking sedangkan proses georeferensi sepenuhnya mengandalkan parameter Exterior Orientation hasil RTK on-board. Tahap optimize camera alignment dilakukan melalui proses Bundle Block Adjustment dengan parameter distorsi lensa (fit f, fit cx-cy, fit k1-k3, fit p1-p2) untuk meminimalkan kesalahan rekonstruksi model tiga dimensi.

Selanjutnya dibangun dense point cloud dengan kerapatan sekitar 2,2 juta titik sebagai dasar pembentukan Digital Surface Model (DSM), yang kemudian digunakan sebagai acuan ortorektifikasi dalam penyusunan ortofoto dan ortomosaik dengan resolusi spasial yang seragam di seluruh area penelitian.

3.6. Uji Ketelitian

Ketelitian ortofoto dievaluasi dengan membandingkan koordinat model terhadap koordinat ICP hasil pengukuran GNSS statik menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) horizontal (RMSEr) dan vertikal (RMSEz) sebagaimana Persamaan (1) dan (2), yang selanjutnya dikonversi menjadi Circular Error 90% (CE90) dan Linear Error 90% (LE90) sesuai Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018 (Persamaan (3) dan (4)).

$$RMSEr = \sqrt{[\Sigma((Xdata-Xcek)^2 + (Ydata-Ycek)^2) / n]} \quad (1)$$

$$RMSEz = \sqrt{[\Sigma(Zdata-Zcek)^2 / n]} \quad (2)$$

$$CE90 = 1,5175 \times RMSEr \quad (3)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSEz \quad (4)$$

Keterangan: X, Y, Z adalah koordinat pada citra hasil pengolahan; Xcek, Ycek, Zcek adalah koordinat ICP hasil pengukuran GNSS statik; dan n adalah jumlah titik uji. Hasil CE90 dan LE90 kemudian dibandingkan dengan standar ketelitian peta dasar BIG untuk menentukan kelas dan skala peta yang dapat dipenuhi oleh masing-masing metode.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil Akuisisi Data

Ketiga skenario akuisisi dilaksanakan pada jalur terbang dan cakupan area yang identik seluas kurang lebih 7,6 km², dengan resolusi spasial (GSD) berkisar antara 3,12 cm/piksel pada mode non-RTK dan 3,14 cm/piksel pada mode RTK. Jumlah foto yang dihasilkan relatif besar, yaitu 6.037 foto pada mode non-RTK dan 6.596 foto pada mode RTK, sehingga tingkat overlap yang tinggi mendukung terbentuknya jaringan fotogrametri yang kuat dan stabil pada proses Bundle Block Adjustment, termasuk pada skenario tanpa GCP.

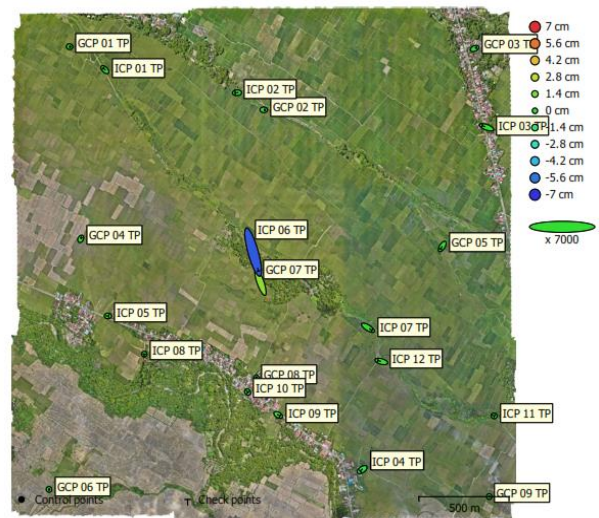


Figure 2. Hasil Persebaran GCP Merata

4.2. Ketelitian Titik Kontrol (GCP) dan Titik Uji (ICP)

Evaluasi terhadap titik GCP dan ICP pada ketiga skenario menunjukkan tingkat ketelitian pada level sentimeter hingga milimeter, sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Mode RTK minimum GCP menghasilkan RMSE GCP terkecil (0,077 cm) karena hanya 4 titik yang diikat dengan

sebaran di sudut area kerja, sedangkan mode RTK non-GCP menghasilkan RMSE ICP terkecil (0,679 cm) meskipun tanpa titik kontrol sama sekali, menandakan bahwa jaringan fotogrametri yang kuat akibat overlap tinggi mampu menjaga stabilitas geometri model. Pada mode non-RTK GCP merata, ditemukan satu titik dengan residu relatif besar (GCP 07, total error 2,180 cm) yang diduga disebabkan oleh kesulitan identifikasi pusat premark pada piksel ortofoto akibat posisi patok yang menyatu dengan premark di lapangan.

Metode	RMSE GCP (cm)	RMSE ICP (cm)
Non-RTK GCP Merata	0,792	2,039
RTK Minimum GCP	0,077	1,359
RTK Non-GCP	–	0,679

Tabel 2 Ketelitian titik kontrol (GCP) dan titik uji (ICP) tiap metode

4.3. Ketelitian Horizontal (CE90) dan Vertikal (LE90)

Tabel 3 menunjukkan bahwa mode RTK non-GCP memberikan ketelitian terbaik pada kedua komponen, dengan CE90 sebesar 0,010 m dan LE90 sebesar 0,001 m. Mode non-RTK GCP merata menghasilkan CE90 sebesar 0,015 m namun LE90 paling besar (0,030 m), sedangkan mode RTK minimum GCP menghasilkan CE90 terbesar (0,019 m) namun LE90 yang cukup kecil (0,008 m). Pada mode RTK non-GCP, ditemukan pula satu titik uji dengan residu relatif besar (ICP 12, total error 1,89 cm) yang diduga dipengaruhi oleh akumulasi kesalahan posisi kamera RTK maupun distribusi titik uji yang kurang merata pada bagian tepi area kerja.

Metode	RMSEr (m)	RMSEz (m)	CE90 (m)	LE90 (m)
Non-RTK GCP Merata	0,010	0,018	0,015	0,030
RTK Minimum GCP	0,013	0,005	0,019	0,008
RTK Non-GCP	0,007	0,001	0,010	0,001

Tabel 3 Hasil RMSEr, RMSEz, CE90, dan LE90 tiap metode

Hasil ini sejalan dengan Forlani et al. (2018) yang menyatakan bahwa RTK mampu menghasilkan akurasi setara bahkan lebih baik dibandingkan penggunaan GCP pada kondisi sinyal GNSS yang baik. Hasil ini juga memperkuat kajian Cho dan Lee (2023) yang menempatkan kestabilan koneksi RTK sebagai faktor penentu utama keberhasilan pemetaan non-GCP. Namun demikian, temuan ini tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi lapangan, mengingat penelitian lain seperti Ulvi (2021) dan Garcia dan Oliveira (2020) menunjukkan bahwa GCP tetap memberikan kontrol geometrik terbaik pada area yang luas, topografi kompleks, atau ketika kualitas sinyal GNSS kurang baik akibat multipath maupun obstruksi bangunan dan vegetasi tinggi.

4.4. Klasifikasi Kelas Ketelitian Peta

Berdasarkan Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018, klasifikasi kelas ketelitian ditentukan dengan membandingkan nilai CE90 dan LE90 terhadap ambang batas skala peta. Tabel 4 menunjukkan bahwa ketiga metode memenuhi persyaratan Kelas 1 untuk peta skala 1:1.000 pada kedua parameter, horizontal maupun vertikal.

Metode	Param.	Hasil (m)	Batas K1 (m)	Status
Non-RTK GCP Merata	CE90	0,015	≤ 0,3	Memenuhi
	LE90	0,030	≤ 0,2	Memenuhi
RTK Minimum GCP	CE90	0,019	≤ 0,3	Memenuhi
	LE90	0,008	≤ 0,2	Memenuhi
RTK Non-GCP	CE90	0,010	≤ 0,3	Memenuhi
	LE90	0,001	≤ 0,2	Memenuhi

Tabel 4 Klasifikasi kelas ketelitian peta skala 1:1.000

Pencapaian Kelas 1 pada ketiga metode menunjukkan bahwa pemanfaatan mode RTK, baik dengan GCP minimum maupun tanpa GCP, sangat efektif dan efisien untuk pemetaan area persawahan di Kabupaten Bone karena mampu memangkas waktu operasional dan biaya pemasangan GCP di lapangan tanpa mengorbankan ketelitian geometrik peta yang dihasilkan. Secara praktis, temuan ini memberikan justifikasi kuantitatif bagi penyedia jasa survei pertanahan untuk mempertimbangkan pengurangan jumlah GCP pada pekerjaan pemetaan lahan terbuka seperti persawahan, sepanjang kondisi sinyal RTK terjaga stabil sepanjang misi penerbangan.

5. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi ketelitian horizontal (CE90) dan vertikal (LE90) ortofoto dari tiga skenario akuisisi UAV, yaitu mode non-RTK dengan GCP tersebar merata, mode RTK dengan GCP minimum, dan mode RTK tanpa GCP, pada lokasi pemetaan ILASP di Desa Tadang Palie, Kabupaten Bone. Hasil menunjukkan bahwa ketiga metode menghasilkan ortofoto dengan ketelitian yang sangat tinggi dan seluruhnya memenuhi klasifikasi Kelas 1 untuk peta dasar skala 1:1.000 sesuai Peraturan BIG Nomor 6 Tahun 2018, dengan mode RTK non-GCP memberikan CE90 dan LE90 terkecil (0,010 m dan 0,001 m), diikuti mode non-RTK GCP merata (0,015 m dan 0,030 m), dan mode RTK minimum GCP (0,019 m dan 0,008 m).

Temuan ini menjawab kedua rumusan masalah penelitian, yaitu bahwa metode minimum GCP maupun non-GCP mode RTK terbukti mampu menyamai bahkan melampaui ketelitian metode konvensional dengan GCP tersebar merata pada kondisi lapangan terbuka, dan seluruh metode tersebut layak digunakan untuk pembuatan peta dasar hingga skala 1:1.000 Kelas 1. Secara

teoretis, hasil ini memperkuat argumentasi Forlani et al. (2018) bahwa kualitas georeferensi langsung dari RTK dapat menggantikan peran GCP pada kondisi sinyal GNSS yang baik, sekaligus melengkapi kajian Ulvi (2021) yang sebelumnya hanya menyoroti pengaruh distribusi GCP pada wahana non-RTK. Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi RTK pada UAV merupakan alternatif yang efektif dan efisien untuk pemetaan area persawahan, karena mampu memangkas waktu operasional dan biaya pemasangan GCP di lapangan tanpa mengorbankan kualitas akurasi peta yang dihasilkan, sehingga dapat menjadi pertimbangan metodologis pada pekerjaan pemetaan pertanahan skala besar seperti ILASP.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini bersifat spesifik-lokasi dan belum dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi topografi maupun kualitas sinyal GNSS, mengingat pengujian hanya dilakukan pada lahan terbuka dengan obstruksi minimal. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji variasi jarak baseline antara base station dan drone guna mengetahui batas ambang degradasi ketelitian akibat kelengkungan bumi dan gangguan atmosfer, membandingkan ketiga metode pada area bertopografi ekstrem atau kawasan urban dengan banyak obstruksi sinyal, menambah kepadatan titik uji ICP untuk memperkuat validitas statistik evaluasi model elevasi digital, serta memperbaiki desain premark agar pusat titik lebih mudah diidentifikasi secara visual pada ortofoto.

6. Pernyataan Konflik Kepentingan

Pendanaan penelitian bersumber dari kegiatan akademik penulis dan tidak melibatkan sponsor komersial dari produsen perangkat keras maupun perangkat lunak yang digunakan, seperti DJI, Comnav, maupun Agisoft, sehingga tidak terdapat kepentingan finansial yang dapat memengaruhi objektivitas perancangan skenario penelitian, pengolahan data, maupun interpretasi hasil. Data foto udara dan koordinat lapangan diperoleh melalui kerja sama akademik dalam konteks pekerjaan Integrated Land Administration Spatial Planning (ILASP), namun analisis, interpretasi, dan kesimpulan yang disampaikan sepenuhnya merupakan hasil kajian independen penulis untuk kepentingan ilmiah, bukan untuk kepentingan komersial pihak penyedia pekerjaan. Dengan demikian, hasil evaluasi ketelitian yang disajikan dapat dipertanggungjawabkan secara objektif dan bebas dari tekanan pihak mana pun.

7. Referensi

- Badan Informasi Geospasial. (2018). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Badan Informasi Geospasial.
- Cho, J. M., & Lee, B. K. (2023). GCP and PPK utilization plan to deal with RTK signal interruption in RTK-UAV photogrammetry. *Sensors*.
- Eisenbeiss, H. (2009). UAV photogrammetry [Doctoral dissertation, ETH Zurich].
- Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., di Cella, U. M., Roncella, R., & Santise, M. (2018). Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. *Remote Sensing*, 10(2), 311. <https://doi.org/10.3390/rs10020311>
- Garcia, M. V. Y., & Oliveira, H. C. (2020). The influence of ground control points configuration and camera calibration for DTM and orthomosaic generation using imagery obtained from a low-cost UAV. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(1), 239–244. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-1-2020-239-2020>
- Honkavaara, E., Arbiol, R., Markelin, L., Martinez, L., Cramer, M., Bovet, S., Chandelier, L., Ilves, R., Klonus, S., Marshal, P., Schl pfer, D., Tabor, M., Thom, C., & Veje, N. (2009). Digital airborne photogrammetry—a new tool for quantitative remote sensing? A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. *Remote Sensing*, 1(3), 577–605. <https://doi.org/10.3390/rs1030577>
- Husna, S. N., Subiyanto, S., & Hani'ah. (2016). Penggunaan parameter orientasi eksternal (EO) untuk optimalisasi triangulasi digital fotogrametri untuk keperluan ortofoto. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(2), 188–195.
- Linder, W. (2016). *Digital photogrammetry: A practical course* (4th ed.). Springer.
- Prayogo, I. P. H., Manoppo, F. J., & Rindengan, L. I. (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.
- Setyawan, D. (2020). High-quality UAV-based orthophotos for cadastral mapping: Guidance for optimal flight configurations. *Geomatics Research*.
- Seo, D. M., Woo, H., Hong, W., & Seo, H. (2024). Optimization of number of GCPs and placement strategy for UAV photogrammetric orthophoto production. *Applied Sciences*, 14(6), 2456.
- Ulvi, A. (2021). The effect of the distribution and numbers of ground control points on the precision of producing orthophoto maps with an unmanned aerial vehicle. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(6), 806–817. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1973479>
- van der Spoel, E., Rozing, M. P., Houwing-Duistermaat, J. J., Slagboom, P. E., Beekman, M., de Craen, A. J. M., Westendorp, R. G. J., & van Heemst, D. (2015). Siamese standards? Descriptive congruence and biological similarity in ageing research classifications. *Ageing Research Reviews*.
- Verykokou, S., & Ioannidis, C. (2018). A photogrammetry-based structure from motion algorithm using robust iterative bundle adjustment techniques. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2, 1–2.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). "Structure-from-Motion"

photogrammetry: A novel, low-cost tool for geomorphological applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of photogrammetry with applications in GIS* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Yuwono, B. D., & Apsandi, O. A. (2018). Analisis pengukuran GNSS metode statik. *Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 1(2), 7–13.

Remondino, F., & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266–272.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2011 tentang Informasi Geospasial.

Nugroho, S. B. (2026). Evaluasi ketelitian ortofoto dari hasil pemotretan drone menggunakan minimum GCP dan non-GCP (mode RTK) terhadap hasil ortofoto dengan GCP tersebar merata [Skripsi, Institut Teknologi Nasional Malang].