



Perbandingan Akurasi UAV Multirotor dan *Fixed Wing* Berbasis Post Processing Kinematic (PPK) untuk Pemetaan Skala Besar

Comparison of Post Kinematic (PPK)-Based Multirotor and Fixed Wing UAVs for Large Scale Mapping

Anbi Aziz¹, Monica Maharani^{1*}

¹Teknik Geomatika, Fakultas Teknologi Mineral, Jl. Ring Road Utara No.104, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283.

*Corresponding Author: monica.maharani@upnyk.ac.id

Article Info:

Received: 20 - 10 - 2025

Accepted: 01 - 12 - 2025

Published: 15 - 12 - 2025

Kata kunci: Ortofoto, UAV, Multirotor, Fixed-Wing, Peta Skala Besar

Keywords: Orthophoto, UAV, Multirotor, Fixed-Wing, Large-Scale Mapping

Abstrak: Perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) telah menghadirkan alternatif survei pemetaan yang lebih efisien dibandingkan metode terestrial konvensional. Namun demikian, akurasi hasil pemetaan sangat bergantung pada metode georeferencing, khususnya penggunaan *Ground Control Point* (GCP) dan pendekatan *Post Processing Kinematic* (PPK). Penelitian ini bertujuan membandingkan tingkat akurasi UAV tipe Multirotor (DJI Phantom 4 RTK) dan *Fixed Wing* (VTOL) berbasis PPK, baik dengan maupun tanpa kombinasi GCP, untuk menentukan efektivitasnya dalam pemetaan berskala besar. Lokasi penelitian berada di Kecamatan Badau, Kapuas Hulu, Kalimantan Barat dengan luas ± 24 hektar. Data dikumpulkan melalui akuisisi udara dan pengukuran GCP/ICP, kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Emlid Studio dan Agisoft Metashape. Hasil uji akurasi menunjukkan model UAV tipe Multirotor dengan 3 GCP menghasilkan ketelitian vertikal terbaik ($LE90 = 0,104$ m), sedangkan model tanpa GCP memiliki ketelitian horizontal tertinggi ($CE90 = 0,059$ m). Sementara itu, UAV *Fixed Wing* (VTOL) memberikan akurasi vertikal lebih baik dibanding UAV tipe Multirotor tanpa GCP. Analisis visual memperlihatkan perbedaan tajam tekstur dan ketajaman objek akibat variasi tinggi terbang dan spesifikasi kamera. Kesimpulannya, kombinasi metode PPK dengan tambahan minimal GCP mampu meningkatkan akurasi vertikal secara signifikan, sedangkan UAV Multirotor lebih unggul pada akurasi horizontal.

Abstract: The development of *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) technology has presented a more efficient alternative to mapping surveys compared to conventional terrestrial methods. However, the accuracy of the mapping results is highly dependent on georeferencing methods, especially the use of *Ground Control Point* (GCP) and the *Post Processing Kinematic* (PPK) approach. This study aims to compare the accuracy levels of PPK-based Multirotor (DJI Phantom 4 RTK) and *Fixed Wing* (VTOL) UAVs, both with and without a combination of GCP, to determine their effectiveness in detail-scale mapping. The research location is in Badau District, Kapuas Hulu, West Kalimantan with an area of ± 24 hectares. The data was collected through aerial acquisition and GCP/ICP measurements, then processed using Emlid Studio and Agisoft Metashape software. The accuracy test results showed that the PPK-based Multirotor model with 3 GCPs produced the best vertical accuracy ($LE90 = 0.104$ m), while the model without GCP had the highest horizontal accuracy ($CE90 = 0.059$ m). Meanwhile, the VTOL UAV provides better vertical accuracy than the PPK-based Multirotor without GCP. Visual analysis shows sharp differences in texture and sharpness of objects due to variations in flight height and camera specifications. In conclusion, the combination of the PPK method with the addition of a minimum of GCP is able to significantly increase vertical accuracy, while Multirotor UAVs are superior in horizontal accuracy.

How to Cite:

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>.

1. PENDAHULUAN

Saat ini, *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) telah bertransformasi menjadi instrumen vital dalam survei pemetaan modern. Akuisisi foto udara menggunakan wahana UAV berkembang pesat dan diadopsi secara luas di berbagai sektor, mulai dari kadastral, pesisir pantai, agrikultur, kehutanan, mitigasi bencana, arkeologi, hingga pemetaan skala besar (Taddia et al., 2020; Tsouros et al., 2019). Popularitas ini didorong oleh kemampuan UAV dalam menghasilkan citra resolusi tinggi dengan biaya operasional yang relatif rendah dibandingkan metode konvensional. Dalam praktiknya, dua tipe wahana yang paling dominan digunakan adalah UAV Multirotor dan UAV *Fixed Wing*, yang masing-masing memiliki karakteristik aerodinamika berbeda. UAV Multirotor menawarkan fleksibilitas tinggi dengan kemampuan *Vertical Take-Off and Landing* (VTOL) serta kemudahan manuver (Ulvi, 2021). Sebaliknya, UAV Fixed Wing memiliki keunggulan pada efisiensi aerodinamis yang memungkinkan durasi terbang lebih lama dan cakupan area yang jauh lebih luas dalam sekali misi. Namun, terlepas dari keunggulan operasional masing-masing wahana, validitas peta yang dihasilkan sangat bergantung pada akurasi geometrik, yang mana sangat ditentukan oleh metode georeferencing yang diterapkan (Cai et al., 2014).

Secara tradisional, proses georeferencing fotogrametri UAV sangat bergantung pada *Ground Control Point* (GCP) yang diukur menggunakan metode terestrial. Meskipun penggunaan GCP menjamin akurasi posisi yang tinggi, metode ini memiliki kelemahan berupa efisiensi waktu dan biaya, terutama di area yang sulit dijangkau (Putra & others, 2022; Suhadi et al., 2019). Kuantitas dan persebaran GCP menjadi variabel yang dapat menyebabkan ketidaksesuaian model 3D dan menurunkan akurasi *Digital Elevation Model* (DEM) serta ortofoto yang dihasilkan apabila distribusinya tidak baik (Dai et al., 2022; Ulvi, 2021; Maharani, M., 2018). Untuk mengatasi keterbatasan ini, teknologi UAV modern kini dilengkapi dengan sistem *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dan *Inertial Measurement Unit* (IMU) presisi tinggi yang memungkinkan penerapan metode *Post Processing Kinematic* (PPK).

Melalui pendekatan PPK, data posisi kamera dikoreksi setelah penerbangan dengan merujuk pada data observasi dari base station atau CORS, sehingga memungkinkan penerapan teknik *Direct Georeferencing*. Teknik ini menentukan parameter *Exterior Orientation* (EO) kamera secara langsung tanpa ketergantungan penuh pada GCP, di mana setiap pusat proyeksi foto dianggap sebagai titik kontrol (EKER et al., 2021; He et al., 2018). Hal ini menawarkan efisiensi signifikan untuk pemetaan skala besar.

Meskipun pergeseran dari ketergantungan GCP menuju *Direct Georeferencing* berbasis PPK semakin masif, literatur yang ada saat ini belum sepenuhnya mengeksplorasi pengaruh karakteristik wahana terhadap akurasi metode ini. Penelitian terdahulu cenderung terfragmentasi: sebagian fokus membandingkan akurasi Multirotor dan *Fixed Wing* namun masih berbasis GCP (Boon et al., 2017), sementara yang lain berfokus pada uji akurasi *Direct Georeferencing* pada satu jenis wahana saja (Susetyo et al., 2023). Hingga saat ini, belum terdapat studi komparatif yang mendalam mengenai bagaimana stabilitas terbang yang berbeda antara multirotor (yang cenderung lebih stabil namun rentan vibrasi motor) dan *Fixed Wing* (yang dinamis namun memiliki jangkauan luas) mempengaruhi konsistensi akurasi hasil PPK. Ketiadaan perbandingan empiris ini menciptakan celah pengetahuan yang krusial, mengingat pemilihan wahana seringkali menjadi dilema antara mengejar efisiensi cakupan area melalui *Fixed Wing* atau kemudahan pengoperasian melalui Multirotor. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan secara spesifik akurasi pemetaan antara UAV Multirotor dan *Fixed Wing* berbasis PPK untuk pemetaan skala besar. Penelitian ini memiliki urgensi tinggi untuk memberikan rujukan teknis yang valid bagi para praktisi dalam menentukan strategi pemilihan wahana yang paling efektif, menyeimbangkan antara efisiensi operasional dan standar ketelitian geometri yang dituntut dalam pemetaan skala detail.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat & Bahan

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan Pos Lintas Batas Negara (PLBN) Nanga Badau, yang secara administratif terletak di Kecamatan Badau, Kabupaten Kapuas Hulu, Provinsi Kalimantan Barat. Total luas area akuisisi data mencakup kurang lebih 24 hektar. Secara kartografis, lokasi penelitian berada pada sistem proyeksi *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 49N dengan datum referensi WGS 84. Berdasarkan tinjauan visual pada peta lokasi (Gambar 1), area penelitian memiliki karakteristik tutupan lahan yang heterogen yang ideal untuk uji akurasi fotogrametri. Area ini merepresentasikan kombinasi antara fitur buatan manusia (man-made features) dan fitur alam, yang terdiri dari:

1. Infrastruktur Bangunan: Kompleks bangunan PLBN dengan geometri tegas yang dapat digunakan untuk menganalisis ketajaman tepi (*edge sharpness*) pada model 3D.
2. Fitur Linear: Jaringan jalan aspal yang memanjang.
3. Vegetasi: Area di sekeliling infrastruktur didominasi oleh vegetasi kerapatan sedang hingga tinggi (hutan sekunder). Keberadaan vegetasi ini penting untuk menguji kemampuan penetrasi dan *matching* pada area dengan tekstur yang tidak teratur (*irregular textures*).
4. Topografi: Area cenderung datar namun memiliki variasi elevasi lokal pada area *cut and fill* di sekitar konstruksi bangunan.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua jenis wahana tanpa awak (UAV) dengan karakteristik aerodinamika yang berbeda untuk membandingkan performa akuisisi data berbasis PPK. Wahana *Fixed Wing* yang digunakan merupakan tipe *Hybrid Vertical Take-Off and Landing* (VTOL) yang dirakit secara *custom*. Material *fuselage* (badan pesawat) terbuat dari kombinasi komposit serat karbon (*carbon fiber*) dan plastik untuk memaksimalkan rasio kekuatan terhadap berat. Sistem propulsi menggunakan motor berdiameter 28 mm. Untuk sistem navigasi dan kontrol, wahana ini dilengkapi dengan Flight Control berbasis ARM yang terintegrasi dengan IMU serta modul GPS RTK/PPK L1/L2. Sistem telemetri memiliki jangkauan radius maksimal hingga 15 km, memungkinkan jangkauan area terbang yang luas. Sensor kamera yang digunakan adalah kamera mirrorless Sony Alpha 6000

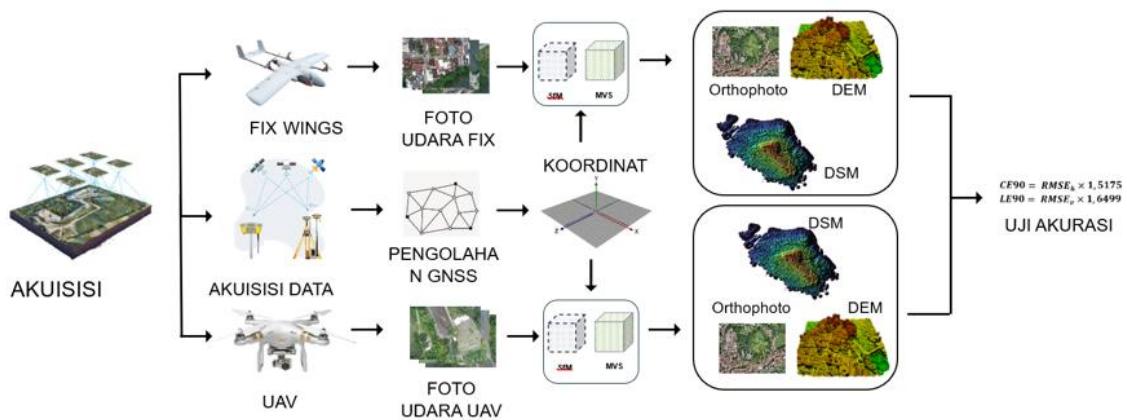
dengan resolusi 24 MP (sensor APS-C), yang dipasang secara nadir. Sebagai pembanding, digunakan UAV prosumer DJI Phantom 4 RTK. Wahana ini merupakan standar industri untuk pemetaan skala kecil-menengah yang telah terintegrasi pabrikan. Dilengkapi dengan modul RTK bawaan dan kamera 20 MP (sensor 1 inci) yang memiliki *mechanical shutter*, yang sangat krusial untuk meminimalkan *rolling shutter effect* pada pemetaan fotogrametri.

Seluruh data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer yang diakuisisi secara langsung di lapangan pada rentang waktu 30 September 2023 hingga 2 Oktober 2023. Data dan bahan yang digunakan meliputi:

1. Data foto udara format .JPG hasil akuisisi UAV Fixed Wing VTOL (Sony Alpha 6000).
2. Data foto udara format .JPG hasil akuisisi UAV Multirotor (DJI Phantom 4 RTK).
3. Data log GNSS dari *receiver* yang terpasang pada kedua wahana (*rover log*) selama misi penerbangan untuk keperluan pengolahan PPK.
4. Data pengamatan statik dari *Base Station* lokal yang didirikan di area studi sebagai referensi koreksi jarak pendek.
5. Koordinat *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) yang diukur menggunakan *receiver GNSS Geodetic type dual-frequency* dengan metode *rapid static*. GCP digunakan sebagai data tambahan simulasi dalam penelitian ini.
6. Data RINEX dari stasiun *Continuously Operating Reference Station* (CORS) milik Badan Informasi Geospasial (BIG). Stasiun yang digunakan adalah stasiun CKHU (Kapuas Hulu) dengan periode data 30 September 2023 s.d. 2 Oktober 2023. Data ini digunakan sebagai koreksi jarak jauh atau validasi terhadap *base station* lokal.

2.2 Metode

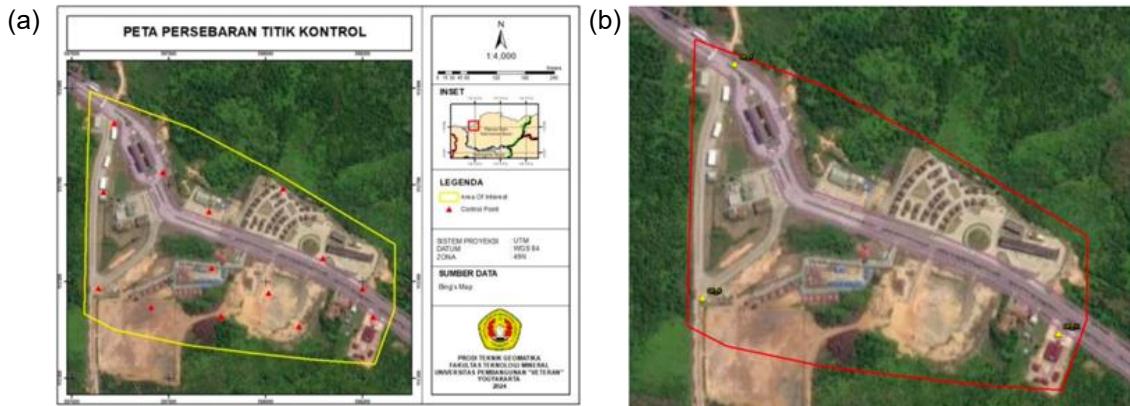
Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahapan utama secara sekvensial, yaitu: akuisisi data lapangan, pengolahan data GNSS dan fotogrametri, serta uji akurasi produk, sebagaimana diilustrasikan pada diagram alir Gambar 2. Secara simultan, akuisisi foto udara dilakukan menggunakan dua wahana berbeda yaitu UAV Fixed Wing (VTOL) dan UAV Multirotor (DJI Phantom 4 RTK) dengan ketinggian terbang kedua wahana disesuaikan sedemikian rupa agar menghasilkan nilai *Ground Sampling Distance* (GSD) yang setara yaitu 5 sentimeter per piksel. Nilai *overlap* dan *sidelap* yang digunakan untuk setiap akuisisi data foto udara adalah 80% dan 60%.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Pengukuran *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) dilakukan menggunakan GPS Geodetik metode survei GNSS *Rapid Static* dengan durasi pengamatan 15 menit per titik. Instrumen yang digunakan meliputi receiver Trimble R8s dan Trimble Net R9. Total titik yang diukur sebanyak 14 titik yang berupa *premark* dan fitur alami tegas seperti sudut marka jalan seperti

pada Gambar 3 (a). Pada penelitian ini terdapat simulasi penggunaan 14 titik ini sebagai ICP untuk menguji akurasi hasil peta foto yang dihasilkan dari metode PPK *direct georeferencing*, dan ada pula simulasi penggunaan 3 titik ini sebagai GCP dan 12 titik lainnya sebagai ICP untuk menguji akurasi hasil peta foto yang dihasilkan dari metode PPK *direct georeferencing* yang dikoreksi dengan 3 GCP. Ketiga titik yang digunakan sebagai GCP tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 (b).



Gambar 3. (a) Sebaran Titik Kontrol Keseluruhan (b) Sebaran GCP

Pengolahan data diawali dengan koreksi posisi kamera menggunakan metode PPK. *Data log* GNSS dari UAV diproses bersama data observasi stasiun referensi (CORS CKHU). Hasil pengolahan menunjukkan solusi *fixed* 100% untuk kedua wahana, yang kemudian digunakan untuk proses *geotagging* ulang pada metadata foto. Selanjutnya, pengolahan foto udara dilakukan menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape melalui tahapan *image matching*, *alignment*, pembentukan *dense* hingga membentuk DSM, dan Ortofoto. Penelitian ini menerapkan empat skenario pemrosesan (Model) untuk analisis komparatif, yaitu:

1. Model 1 (M1): UAV Multirotor (DJI Phantom 4 RTK) dengan metode *Direct Georeferencing* (Tanpa GCP).
2. Model 2 (M2): UAV Multirotor (DJI Phantom 4 RTK) dengan bantuan 3 GCP.
3. Model 3 (M3): UAV *Fixed Wing* (VTOL) dengan metode *Direct Georeferencing* (Tanpa GCP).
4. Model 4 (M4): UAV *Fixed Wing* (VTOL) dengan bantuan 3 GCP.

Evaluasi kualitas produk dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil Ortofoto dan DSM terhadap titik ICP yang diukur dengan GPS Geodetik. Jumlah ICP disesuaikan dengan skenario model: 14 ICP digunakan untuk uji model *Direct Georeferencing*, dan 11 ICP digunakan untuk uji model kombinasi (karena 3 titik dialokasikan sebagai GCP). Akurasi horizontal dan vertikal dihitung menggunakan standar ketelitian Circular Error 90% (CE90) dan Linear Error 90% (LE90) sesuai dengan persamaan berikut:

$$CE90 = RMSE_h \times 1,5175 \quad (2.1)$$

$$LE90 = RMSE_v \times 1,6499 \quad (2.2)$$

Di mana $RMSE_h$ adalah *Root Mean Square Error* horizontal dan $RMSE_v$ adalah *Root Mean Square Error* vertikal. Selain analisis statistik, dilakukan pula analisis visual pada ortofoto untuk menilai kualitas interpretasi objek dari masing-masing metode.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengolahan Post Processing Kinematic (PPK)

Sebelum dilakukan pengolahan fotogrametri, evaluasi terhadap kualitas data posisi pusat kamera (camera center) hasil koreksi PPK dilakukan untuk memastikan keandalan data input. **Tabel 1** menyajikan ringkasan nilai standar deviasi (σ) dari koordinat *Easting*, *Northing*, dan *Height* setelah dilakukan koreksi diferensial terhadap data stasiun referensi. Nilai standar deviasi ini merepresentasikan tingkat presisi atau konsistensi nilai posisi yang direkam oleh *receiver GNSS* pada masing-masing wahana. Berdasarkan data yang tertera pada **Tabel 1**, proses pengolahan PPK pada kedua wahana menunjukkan performa yang sangat baik dengan tercapainya solusi *Fixed* pada seluruh *epoch* pemotretan. Indikator ini terlihat dari nilai standar deviasi posisi yang berada pada orde milimeter. Secara spesifik, UAV Multirotor menghasilkan ketelitian horizontal pada rentang 0,0037 m hingga 0,0040 m, serta ketelitian vertikal sebesar 0,0095 m. Sementara itu, UAV *Fixed Wing* menunjukkan tingkat presisi yang sedikit lebih unggul, dengan ketelitian horizontal berkisar antara 0,0030 m hingga 0,0037 m dan ketelitian vertikal sebesar 0,0075 m.

Tabel 1. Hasil Pemrosesan Post Processing Kinematic (PPK)

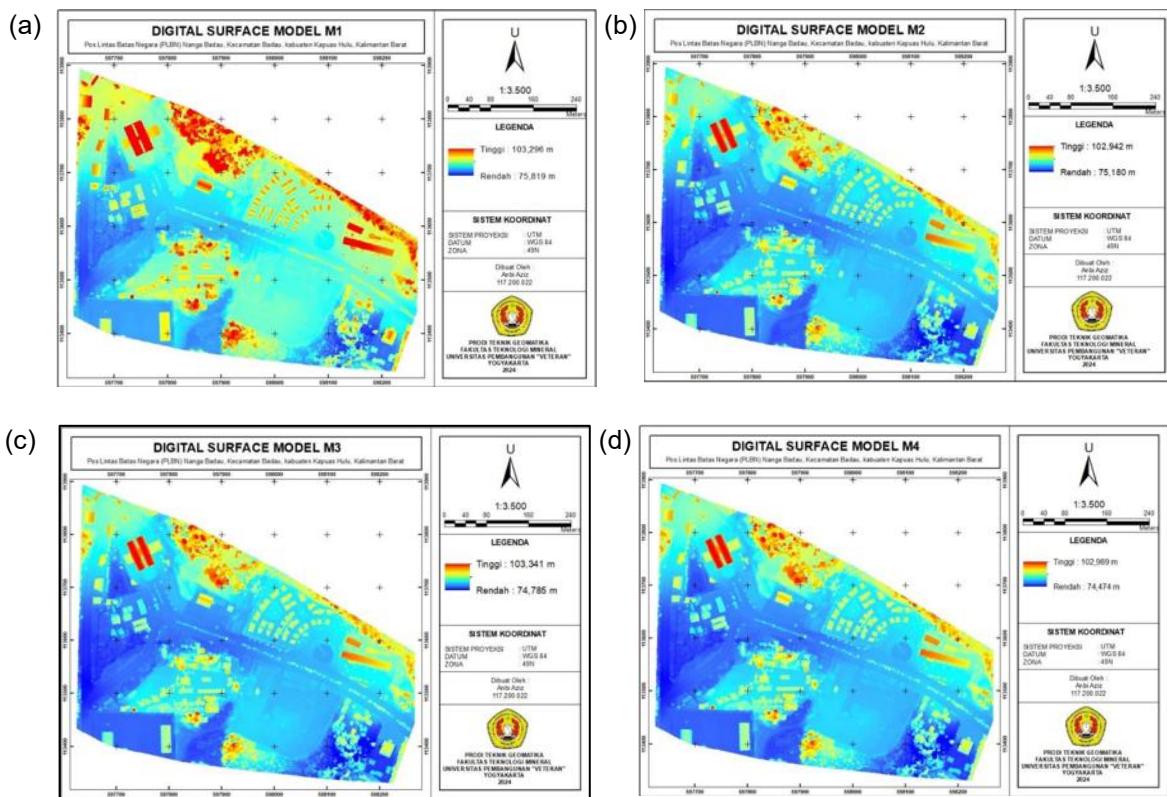
Wahana	$\sigma_{easting}$	$\sigma_{northing}$	$\sigma_{up/height}$
DJI Phantom 4 RTK	0,0037 m	0,0040 m	0,0095 m
UAV <i>Fixed Wing</i> (VTOL)	0,0030 m	0,0037 m	0,0075 m

Keunggulan presisi pada wahana *Fixed Wing* ini, meskipun selisihnya relatif kecil (dalam orde milimeter), mengindikasikan stabilitas penerimaan sinyal yang lebih baik. Hal ini kemungkinan dipengaruhi oleh penempatan antena GNSS pada *Fixed Wing* yang lebih terisolasi dari interferensi elektromagnetik motor dibandingkan pada desain wahana multirotor. Nilai standar deviasi vertikal pada kedua wahana yang konsisten berada di bawah 1 cm (< 0,01 m). Kualitas posisi geotagging yang presisi ini menjadi parameter fundamental dalam penerapan metode *Direct Georeferencing*, di mana akurasi geometrik peta yang dihasilkan akan sangat bergantung pada seberapa akurat posisi kamera ditentukan saat momen eksposur, terutama ketika jumlah titik kontrol tanah (GCP) diminimalkan atau ditiadakan.

3.2. Hasil Pengolahan Foto Udara

Setelah tahap *alignment foto* dan pembangunan *dense point cloud*, rekonstruksi permukaan bumi dari data foto udara menghasilkan *Digital Surface Model* (DSM). **Gambar 4** menyajikan visualisasi DSM yang diperoleh dari tiga skenario model: UAV Multirotor dengan metode *Direct Georeferencing* (M1), UAV Multirotor dengan 3 GCP (M2), UAV *Fixed Wing* dengan metode *Direct Georeferencing* (M3), dan UAV *Fixed Wing* dengan 3 GCP (M4). Secara visual, hasil rekonstruksi DSM pada ketiga model memperlihatkan pola topografi yang identik dan konsisten. Gradasi warna pada peta merepresentasikan variasi ketinggian, di mana spektrum warna merah menunjukkan area dengan elevasi tertinggi (objek bangunan dan vegetasi tinggi), sedangkan spektrum warna biru merepresentasikan area dengan elevasi terendah (permukaan tanah dan jalan). Tidak ditemukan adanya deformasi geometri yang signifikan seperti cekungan maupun gundukan pada model hasil *Direct Georeferencing* (M1 dan M3) meskipun tidak menggunakan titik kontrol tanah sebagai pengikat utama. Hal ini mengindikasikan bahwa kualitas parameter orientasi eksterior (EO) hasil koreksi PPK sudah cukup kuat untuk membentuk blok fotogrametri yang stabil. Model M1 (Multirotor - *Direct Georeferencing*): Menghasilkan rentang elevasi 75,819 m hingga 103,296 m. Model M2 (Multirotor - 3 GCP): Menghasilkan rentang elevasi 75,180 m hingga 102,942 m. Model M3 (*Fixed Wing* - *Direct*

Georeferencing): Menghasilkan rentang elevasi 74,785 m hingga 103,341 m. Model M4 (Fixed Wing – 3 GCP): 74,474 m hingga 102,989 m. Perbandingan nilai elevasi maksimum dan minimum antar model menunjukkan selisih yang relatif kecil (kurang dari 1 meter). Konsistensi nilai elevasi ini menegaskan bahwa penggunaan metode PPK (*Direct Georeferencing*), baik pada wahana Multirotor maupun *Fixed Wing*, mampu menghasilkan model permukaan yang sebanding dengan metode konvensional yang melibatkan GCP.

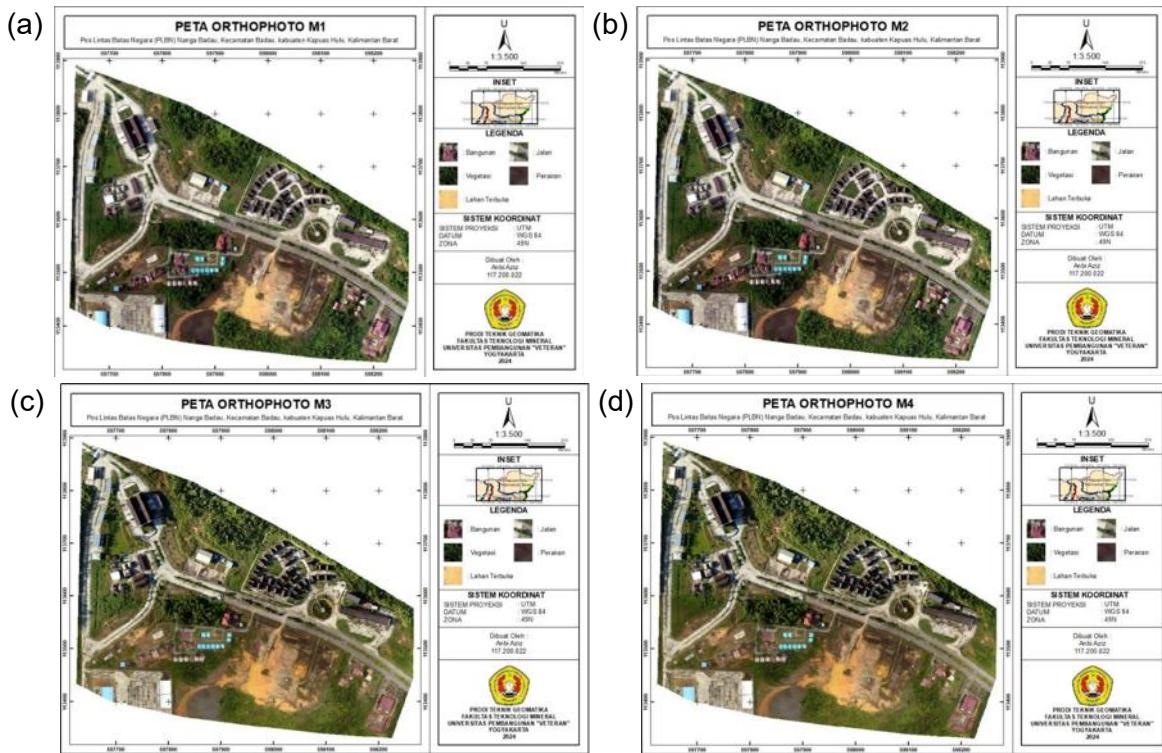


Gambar 4. Digital Surface Model (DSM) (a) UAV Multirotor *Direct Georeferencing* (b) UAV Multirotor 3 GCP (c) UAV *Fixed Wing Direct Georeferencing* (d) UAV *Fixed Wing* 3 GCP

Produk akhir dari pemrosesan fotogrametri adalah ortofoto tegak yang telah tergeoreferensi. **Gambar 5** menyajikan hasil ortofoto dari keempat skenario model: UAV Multirotor dengan metode *Direct Georeferencing* (M1), UAV Multirotor dengan 3 GCP (M2), UAV *Fixed Wing* dengan metode *Direct Georeferencing* (M3), dan UAV *Fixed Wing* dengan 3 GCP (M4). Secara umum, hasil mosaik ortofoto dari seluruh model menunjukkan kualitas visual yang konsisten dan kontinuitas spasial yang baik. Tidak ditemukan adanya cacat visual yang signifikan seperti efek *blurring*, atau ketidaksesuaian pada garis sambungan (seamlines) antar foto, baik pada area dengan tekstur homogen (jalan aspal) maupun tekstur heterogen (vegetasi). Hal ini mengindikasikan bahwa parameter orientasi eksterior hasil solusi PPK memiliki akurasi yang memadai untuk menjamin proses stitching foto berjalan sempurna tanpa memerlukan koreksi geometri masif dari GCP.

Jika dilihat dari kualitas radiometrinya, meskipun kedua wahana menggunakan sensor yang berbeda (Sony Alpha 6000 pada Fixed Wing dan sensor bawaan 1 inci pada Phantom 4 RTK), tone warna dan kontras yang dihasilkan relatif seimbang setelah proses *color balancing*. Objek vegetasi, lahan terbuka, dan perairan dapat diidentifikasi dan dibedakan dengan jelas (delineasi) untuk keperluan interpretasi tutupan lahan. Secara khusus, perbandingan visual antara Model M1/M3 (tanpa GCP) dengan Model M2/M4 (dengan GCP) tidak memperlihatkan perbedaan yang kasat mata pada

skala peta 1:3.500. Kesamaan kualitas visual ini menegaskan bahwa untuk keperluan inspeksi visual dan interpretasi kualitatif, metode Direct Georeferencing berbasis PPK sudah sangat mumpuni dan dapat diandalkan untuk menghasilkan peta dasar yang informatif tanpa ketergantungan mutlak pada survei terestrial yang padat.



Gambar 5. Ortofoto (a) UAV Multirotor Direct Georeferencing (b) UAV Multirotor 3 GCP (c) UAV Fixed Wing Direct Georeferencing (d) UAV Fixed Wing 3 GCP

3.3. Analisis Akurasi

Ketelitian yang diperoleh dapat diketahui dengan menguji akurasi DSM dan ortofoto yang dihasilkan dari setiap metode. Uji akurasi menggunakan ICP untuk mengetahui selisih koordinat dari model dan koordinat lapangan. Berdasarkan SNI 8202:2019 tentang Ketelitian Peta Dasar, hasil uji akurasi untuk ketelitian horizontal dan vertikal menghasilkan angka yang berbeda seperti pada **Tabel 2**. Model M1 memperoleh ketelitian horizontal 0,059 meter dan ketelitian vertikal 0,995 meter sehingga kelas ketelitian model ini adalah ketelitian horizontal kelas 1 dengan skala 1 : 1000 dan ketelitian vertikal kelas 1 dengan interval kontur 2 meter, model M2 memperoleh ketelitian horizontal 0,064 meter dan ketelitian vertikal 0,104 meter sehingga kelas ketelitian model ini adalah ketelitian horizontal kelas 1 dengan skala 1 : 1000 dan ketelitian vertikal kelas 1 dengan interval kontur 0,4 meter, model M3 memperoleh ketelitian horizontal 0,085 meter dan ketelitian vertikal 0,288 meter sehingga kelas ketelitian model ini adalah ketelitian horizontal kelas 1 dengan skala 1 : 1000 dan ketelitian vertikal kelas 1 dengan interval kontur 1 meter, dan model M4 memperoleh ketelitian horizontal 0,092 meter dan ketelitian vertikal 0,282 meter sehingga kelas ketelitian model ini adalah ketelitian horizontal kelas 1 dengan skala 1 : 1000 dan ketelitian vertikal kelas 1 dengan interval kontur 1 meter.

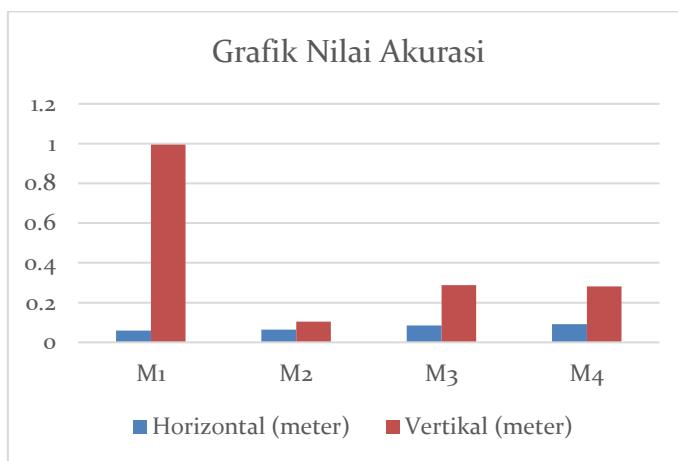
Berdasarkan parameter CE90, UAV Multirotor (M1 dan M2) menunjukkan performa akurasi horizontal yang lebih unggul dibandingkan UAV *Fixed Wing*. Model M1 mencatatkan nilai CE90 terbaik sebesar 0,059 m, sedangkan Model M3 (*Fixed Wing*) menghasilkan nilai 0,085 m. Selisih akurasi sekitar 2-3 cm ini kemungkinan dipengaruhi oleh kestabilan wahana saat pemotretan. Wahana multirotor memiliki kemampuan *hovering* yang membuat posisi kamera lebih statis saat shutter terbuka,

dibandingkan *Fixed Wing* yang terus bergerak (*cruising*) sehingga rentan terhadap *motion blur* yang mempengaruhi ketajaman penentuan posisi piksel.

Tabel 2. Nilai Uji Akurasi

Model	CE90 (m)	LE90 (m)
M1	0,059	0,995
M2	0,064	0,104
M3	0,085	0,288
M4	0,092	0,282

Fenomena lain ditemukan di mana penambahan GCP (M2 dan M4) justru memberikan nilai CE90 yang sedikit lebih besar (kurang teliti) dibandingkan metode *Direct Georeferencing* murni (M1 dan M3). Hal ini mengindikasikan bahwa solusi koordinat pusat kamera hasil PPK sudah memiliki konsistensi internal yang sangat tinggi. Penambahan GCP yang jumlahnya sedikit (3 titik) dengan distribusi yang mungkin belum optimal, justru berpotensi membuat model untuk bergeser menyesuaikan titik kontrol, yang mengakibatkan sedikit distorsi pada geometri horizontal global. Namun, seluruh nilai CE90 masih berada di bawah 0,15 m, yang memenuhi standar ketelitian peta skala besar kelas 1 (skala 1:1.000 maupun 1:2.500).



Gambar 6. Grafik Nilai Ketelitian

Berbeda dengan akurasi horizontal, seperti yang tampak pada **Gambar 6** parameter vertikal menunjukkan anomali yang signifikan pada Model M1. Model M1 (Multirotor tanpa GCP) menghasilkan *error* vertikal terbesar yaitu 0,995 m. Kesalahan sistematis pada sumbu Z ini umum terjadi pada metode *Direct Georeferencing* akibat ketidakpastian parameter internal kamera (*focal length*) atau *lever-arm offset*. Peran Krusial GCP pada Multirotor dengan penambahan 3 GCP pada Model M2 secara drastis memperbaiki akurasi vertikal dari 0,995 m menjadi 0,104 m. Ini membuktikan bahwa pada UAV Multirotor konsumen, penggunaan minimal GCP masih sangat disarankan untuk menghilangkan bias vertikal (sifat *datum shift*), meskipun metode PPK digunakan.

Sebaliknya, UAV *Fixed Wing* menunjukkan konsistensi yang lebih baik pada sumbu vertikal dalam mode *Direct Georeferencing*. Model M3 menghasilkan LE90 sebesar 0,288 m, dan penambahan GCP pada M4 hanya mengubahnya sedikit menjadi 0,282 m. Hal ini menunjukkan bahwa geometri penerbangan dan kalibrasi kamera pada sistem *Fixed Wing* yang digunakan relatif lebih stabil terhadap kesalahan vertikal dibandingkan sistem Multirotor dalam mode tanpa GCP.

3.4. Analisis Visual Ortofoto

Validasi kualitas produk fotogrametri tidak hanya bergantung pada uji statistik akurasi koordinat, tetapi juga memerlukan pengamatan visual yang komprehensif untuk memastikan produk bebas dari cacat radiometrik maupun distorsi geometrik lokal. Berdasarkan perbandingan potongan detail ortofoto pada **Tabel 3**, fitur linear buatan manusia (*man-made features*), seperti marka jalan putus-putus dan batas tepi perkerasan aspal, terekam dengan tepi yang tajam (*sharp edge definition*) pada seluruh model. Fenomena ini menunjukkan ketajaman pada hasil ortofoto UAV *Fixed Wing* (M3 dan M4) dengan pengaturan shutter speed pada kamera Sony Alpha 6000 mampu mengkompensasi kecepatan terbang (*cruising speed*) wahana yang jauh lebih tinggi dibandingkan multirotor. Tidak terdeteksi adanya efek *motion blur* atau *smearing* yang sering menjadi kendala pada pemetaan menggunakan *Fixed Wing* di ketinggian rendah. Selain itu pada wahana multirotor (M1 dan M2), ketajaman citra mengonfirmasi stabilitas gimbal dalam meredam vibrasi motor, sehingga resolusi spasial asli tetap terjaga tanpa degradasi kualitas piksel.

Tabel 3. Perbandingan Visual Area Jalan

M1	M2
	
M3	M4
	

Selain evaluasi terhadap akurasi posisi absolut menggunakan ICP, validasi geometrik juga dilakukan melalui pengukuran dimensi fitur di lapangan. Parameter yang diuji adalah lebar jalan utama, diukur secara tegak lurus dari batas tepi perkerasan (*curb*) ke batas tepi seberangnya pada lokasi sampel yang sama di keempat model ortofoto. Hasil pengukuran dimensi lebar jalan pada masing-masing model adalah sebagai berikut: Model M1 (Multirotor - Direct Geo): 10,08 meter; Model M2 (Multirotor - 3 GCP): 10,06 meter; Model M3 (Fixed Wing - Direct Geo): 10,02 meter; dan Model M4 (Fixed Wing -

3 GCP): 10,04 meter. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa selisih dimensi antar model sangatlah kecil. Rentang variasi pengukuran hanya sebesar 0,06 meter (6 cm), yaitu selisih antara nilai tertinggi pada M1 (10,08 m) dan nilai terendah pada M3 (10,02 m). Temuan ini mengindikasikan stabilitas skala model. Hal ini ditunjukkan dengan kedekatan nilai ukur antar model (terutama antara metode tanpa GCP dan dengan GCP) yang membuktikan bahwa faktor skala yang dihasilkan dari proses PPK sudah sangat akurat. Metode *Direct Georeferencing* (M1 dan M3) terbukti mampu menjaga proporsi geometrik objek dengan fidelitas yang setara dengan metode yang diikat oleh GCP.

Meskipun pada **Tabel 2** sebelumnya terlihat adanya variasi akurasi posisi absolut (koordinat global), hasil pengukuran lebar jalan ini menegaskan bahwa akurasi relatif (hubungan jarak antar titik dalam satu model) tetap terjaga dengan baik. Artinya, meskipun posisi peta mungkin bergeser beberapa sentimeter secara global, bentuk dan ukuran objek di dalamnya tidak mengalami distorsi atau penyusutan/pemekaran (*shrinking/stretching*). Dengan deviasi pengukuran dimensi yang berada pada orde sentimeter (< 10 cm), produk ortofoto dari kedua wahana—baik dengan maupun tanpa GCP—memenuhi syarat untuk keperluan ekstraksi data sipil, seperti perhitungan volume awal, perencanaan lebar jalan, atau inventarisasi aset infrastruktur.

Tabel 4. Perbandingan Visual Area Bangunan

M1	M2
M3	M4

Berbeda dengan area jalan yang memiliki karakteristik tekstur cenderung homogen dan datar, area bangunan pada Tabel 4 menyajikan tantangan visual yang lebih kompleks berupa variasi ketinggian dan tekstur atap yang heterogen. Skenario M1 dan M2 terbukti mampu mempertahankan detail tinggi tidak hanya pada objek datar (jalan), tetapi juga pada objek 3D (bangunan). Hal ini membuktikan

bawa stabilitas multirotor memberikan dampak positif yang merata pada berbagai fitur topografi. Namun demikian pada skenario M3 dan M4 hasil pemotretan UAV *Fixed Wing* belum mampu mempertahankan detil tekstur.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian mengenai perbandingan akurasi UAV Multirotor dan Fixed Wing berbasis Post Processing Kinematic (PPK) untuk pemetaan skala besar, dapat dilihat bahwa penerapan metode PPK pada kedua jenis wahana terbukti sangat andal, ditandai dengan tercapainya solusi *Fixed* pada seluruh epoch pemotretan. Wahana *Fixed Wing* menunjukkan stabilitas penerimaan sinyal GNSS yang sedikit lebih presisi (ketelitian posisi $< 0,0075$ m) dibandingkan Multirotor, kemungkinan disebabkan oleh isolasi antena yang lebih baik dari interferensi motor. Namun, secara umum, kedua wahana menghasilkan data posisi pusat kamera dengan presisi tinggi dalam orde milimeter. Secara horizontal, UAV Multirotor menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan *Fixed Wing*. Model M1 (Multirotor - *Direct Georeferencing*) mencatatkan akurasi horizontal terbaik ($CE90 = 0,059$ m). Stabilitas *hovering* pada multirotor memberikan keuntungan dalam meminimalkan *motion blur*, menghasilkan penentuan posisi piksel yang lebih tajam. Secara vertikal terdapat perbedaan karakteristik yang signifikan. Metode *Direct Georeferencing* pada Multirotor (M1) mengalami kesalahan sistematis (bias vertikal) yang besar hingga 0,995 m. Penambahan titik kontrol (GCP) pada M2 mutlak diperlukan untuk mengoreksi kesalahan ini menjadi 0,104 m. Sebaliknya, UAV Fixed Wing (M3) menunjukkan konsistensi vertikal yang jauh lebih baik dalam mode *Direct Georeferencing* ($LE90 = 0,288$ m) dan tidak terlalu bergantung pada GCP untuk mencapai akurasi vertikal sub-meter. Pada aspek horizontal, penambahan jumlah GCP yang minim (3 titik) justru terindikasi sedikit menurunkan ketelitian dibandingkan metode PPK murni, akibat adanya penyesuaian model terhadap distribusi GCP yang mungkin belum optimal.

Secara visual, kedua wahana mampu menghasilkan ortofoto yang baik dengan *stitching* yang sempurna dan *tone* warna yang seimbang. Pada objek datar (jalan), kedua wahana memiliki ketajaman yang setara dan mampu menjaga konsistensi skala (akurasi relatif) dengan deviasi pengukuran lebar jalan yang sangat kecil (< 6 cm). Pada objek 3D yang kompleks (bangunan/permukiman), Multirotor lebih unggul dalam mempertahankan detail tekstur dan ketajaman tepi atas dibandingkan *Fixed Wing* yang mengalami sedikit degradasi detail pada permukaan heterogen. Implikasi Pemetaan Skala Besar Seluruh skenario pengujian (M1 hingga M4) menghasilkan nilai $CE90$ di bawah 0,15 m, yang memenuhi standar ketelitian peta dasar Kelas 1 untuk skala 1:1.000. Untuk pemetaan yang menuntut detail visual tinggi dan akurasi vertikal ketat pada area terbatas, penggunaan Multirotor dengan minimal GCP (M2) adalah pilihan terbaik. Sedangkan untuk pemetaan area yang sangat luas dengan efisiensi waktu, *Fixed Wing* dengan metode Direct Georeferencing (M3) merupakan solusi yang efektif karena mampu memberikan akurasi geometrik yang memadai tanpa ketergantungan mutlak pada survei GCP di lapangan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan penelitian ini. Segala bantuan berupa ilmu, masukan, maupun semangat yang diberikan sangat berarti hingga penelitian ini dapat terselesaikan. Semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca, peneliti, maupun praktisi yang berkecimpung di bidang fotogrametri dan pemetaan. Penulis juga berharap penelitian ini menjadi salah satu kontribusi kecil untuk perkembangan ilmu pengetahuan dan dapat mendorong penelitian-penelitian lanjutan di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Boon, M. A., Drijfhout, A. P., & Tesfamichael, S. (2017). COMPARISON OF A FIXED-WING AND MULTI-ROTOR UAV FOR ENVIRONMENTAL MAPPING APPLICATIONS: A CASE STUDY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W6, 47–54. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>
- Cai, G., Dias, J., & Seneviratne, L. (2014). A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends. *Unmanned Systems*, 02(02), 175–199. <https://doi.org/10.1142/S2301385014300017>
- Dai, D., Zheng, L., Yuan, G., Zhang, H., Zhang, Y., Wang, H., & Kang, Q. (2022). Real-time and high precision feature matching between blur aerial images. *PLOS ONE*, 17(9), e0274773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274773>
- EKER, R., ALKAN, E., & AYDIN, A. (2021). A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types. *European Journal of Forest Engineering*, 7(1), 12–25. <https://doi.org/10.33904/ejfe.938067>
- He, F., Zhou, T., Xiong, W., Hasheminassab, S., & Habib, A. (2018). Automated Aerial Triangulation for UAV-Based Mapping. *Remote Sensing*, 10(12), 1952. <https://doi.org/10.3390/rs10121952>
- Maharani, M., & Kuncoro, H. (2018). Analisis Pengaruh Jumlah dan Sebaran Ground Control Point (GCP) dalam Proses Ortorektifikasi Citra Satelit Resolusi Tinggi (CSRT). *Indonesian Journal of Geospatial*, 5(2).
- PUTRA, B. L., & others. (2022). *PENGARUH JUMLAH DAN SEBARAN GCP HASIL PENGAMATAN METODE DIFERENSIAL RAPID STATIC UNTUK PROSES ORTOREKTIFIKASI FOTO UDARA*.
- Suhadi, S., Dwiatmoko, 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), 147–150.
- Susetyo, D. B., Harintaka, & Rizaldy, A. (2023). *The application of mask R-CNN for building extraction*. 030001. <https://doi.org/10.1063/5.0182754>
- Taddia, Y., Stecchi, F., & Pellegrinelli, A. (2020). Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. *Drones*, 4(2), 9. <https://doi.org/10.3390/drones4020009>
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- 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>