

Integrasi Multisensor UAV (Kamera dan LiDAR) untuk Refinement Ortofoto Berketelitian Tinggi dalam Mendukung Peta Bidang Tanah di Desa Kanoman, Kulon Progo

Multisensor UAV Integration (Camera and LiDAR) for High-Precision Orthophoto Refinement in Support of Land Field Mapping in Kanoman Village, Kulon Progo

Nurrohmat Widjajanti¹, Iqbal Hanun Azizi¹, M Elya Lim Putraningtyas³, Trias Aditya¹, Heri Sutanta¹, Diyono¹, Ruli Andaru¹, Bambang Kun Cahyono¹, Yulaikhah¹, Leni Sophia Heliani¹, Dwi Lestari¹, Dedi Atunggal¹, Bilal Ma'ruf¹, Cecep Pratama¹, Siti Anisa Azzahro², Rahmat Fadhilah Gumelar², Andhika Prasista², Muhammad Naufal M², Andrew Wijaya²

¹Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika Bulaksumur, Kabupaten Sleman, 55281.

²Program Studi Sarjana Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika Bulaksumur, Kabupaten Sleman, 55281

³Kantor Pertanahan Kulon Progo, Jl. Kawijo, Pengasih, Kabupaten Kulon Progo, 55652

*Corresponding Author: nwidjajanti@ugm.ac.id

Article Info:

Received: 10 – 01 - 2026

Accepted: 01 – 05 - 2026

Published: 25 – 07 - 2026

Kata kunci: Peta Bidang Tanah, UAV, Ortofoto, PTSL

Keywords: Cadastral Parcel Map, UAV, Orthophoto, PTSL

Abstrak: Peta Bidang Tanah (PBT) pada pemetaan kadastral membutuhkan ortofoto berketelitian tinggi untuk mendukung delineasi bidang tanah secara akurat. Permasalahan muncul ketika ortofoto UAV menampilkan distorsi visual seperti *leaning*, *bending*, dan *meleyot* pada area permukiman sehingga kualitas citra tidak memadai untuk analisis spasial. Penelitian ini menawarkan solusi dengan mengintegrasikan data sensor pasif berupa foto udara dan sensor aktif berupa LiDAR, kemudian menerapkan teknik *refinement* ortofoto melalui *Fill Digital Elevation Model* (DEM) dan *Assign Images*. Data penelitian merupakan akuisisi UAV DJI Matrice 350 RTK di Desa Kanoman seluas 230 ha, dengan dukungan delapan GCP dan empat belas ICP sebagai kontrol geometrik. Hasil integrasi *point cloud* menghasilkan DEM yang stabil dan konsisten untuk ortorektifikasi, sedangkan proses *refinement* meningkatkan tampilan visual ortofoto pada area bangunan. Analisis ketelitian menunjukkan nilai CE90 sebesar 0,0844 m dan LE90 sebesar 0,0958 m yang berada jauh di bawah batas toleransi ketelitian PTSL. Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa pendekatan integratif antara fusi multisensor dan *refinement* ortofoto berbasis DEM korektif yang meningkatkan kualitas geometri dan visual secara simultan, sehingga ortofoto yang dihasilkan layak menjadi dasar pemetaan kadastral dan percepatan PTSL.

Abstract: A cadastral parcel map requires high-accuracy orthophoto to support the precise delineation of land parcels. Challenges arise when UAV orthophoto exhibits visual distortions such as *leaning*, *bending*, and *warping* in residential areas, which reduce spatial consistency and reliability. This study addresses these issues by integrating passive sensor data from aerial imagery with active sensor data from LiDAR and then refining orthophotos using the *Fill DEM* and *Assign Images* techniques. The dataset was acquired using a DJI Matrice 350 RTK UAV in Kanoman Village, covering 230 ha, supported by eight GCPs and fourteen ICPs to strengthen geometric control. The multisensor point cloud fusion produced a stable, consistent DEM for orthorectification. At the same time, the refinement process improved the visual quality of orthophoto in building-dense areas. Accuracy assessment yielded CE90 of 0.0844 m and LE90 of 0.09585 m, both of which are significantly below the tolerance thresholds required by the national PTSL standard. This study introduces a novel approach that combines an integrative method with multisensor fusion and DEM-guided orthophoto refinement, thereby enhancing both geometric accuracy and visual consistency simultaneously. The resulting orthophoto demonstrates high reliability and suitability as a fundamental spatial dataset for cadastral mapping and for accelerating PTSL.

How to Cite:

Widjajanti, N., Azizi, I.N., Putraningtyas M.E.L., ... (2026). Integrasi Multisensor UAV (Kamera dan LiDAR) untuk Refinement Ortofoto Berketelitian Tinggi dalam Mendukung Peta Bidang Tanah di Desa Kanoman, Kulon Progo. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 6(1), 15-29. <https://doi.org/10.31315/imagi.v6i1.16359>.

1. PENDAHULUAN

Peta Bidang Tanah (PBT) memegang peran penting dalam administrasi pertanahan karena menjamin kepastian hukum, mendukung pengelolaan aset, dan memperkuat perencanaan pembangunan berkelanjutan (Wibowo & Diyono, 2024). Pemerintah Indonesia terus mendorong percepatan pembuatan PBT untuk memenuhi kebutuhan legalisasi tanah yang semakin meningkat. Program Pendaftaran Tanah Sistematis Lengkap (PTSL) juga menuntut pemerintah menyediakan data spasial yang akurat, konsisten, dan dapat dipertanggungjawabkan. Kebutuhan percepatan tersebut mendorong pemerintah dan berbagai lembaga teknis mencari metode pemetaan yang lebih efisien dan berketelitian tinggi. Metode pemetaan konvensional membutuhkan waktu lama, biaya besar, dan tenaga kerja banyak, sehingga tidak mampu menyeimbangkan target penyelesaian PTSL nasional. Kondisi tersebut menuntut penerapan teknologi pemetaan yang mampu mempercepat akuisisi data sekaligus menjaga kualitas produk spasial secara konsisten.

Teknologi fotogrametri berbasis *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menawarkan solusi yang relevan untuk menjawab kebutuhan tersebut. UAV dapat mengakuisisi citra resolusi tinggi secara cepat, fleksibel, dan efisien pada berbagai kondisi topografi maupun pola permukiman (Fahrudin & Mujiburohman, 2024). Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa fotogrametri UAV mampu menghasilkan ketelitian yang memenuhi standar kadastral, sehingga layak menjadi dasar pembuatan PBT dan mempercepat proses PTSL (Fahrudin & Mujiburohman, 2024; Faza & Darmawan, 2025; Rijdsdijk dkk., 2021; Sandria dkk., 2025). Ortofoto menjadi produk utama dari pemetaan UAV dan berperan sebagai dasar interpretasi bidang tanah serta identifikasi objek fisik permukaan. Ortofoto yang baik harus memiliki skala seragam, geometri akurat, dan tampilan visual konsisten agar dapat mendukung proses delineasi batas secara presisi (Fahmi dkk., 2023). Peneliti dan praktisi perlu menjaga kualitas ortofoto karena variasi elevasi, geometri bangunan, atau kesalahan pemrosesan sering memunculkan distorsi seperti *leaning* atau *bending* yang dapat mengganggu proses identifikasi batas bidang.

Perkembangan *computer vision* memperkuat kemampuan fotogrametri UAV dalam menghasilkan model permukaan dan citra ortorektifikasi yang akurat. Algoritma seperti *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) dan *Speeded-Up Robust Features* (SURF) mengenali fitur citra secara otomatis sehingga perangkat lunak dapat merekonstruksi orientasi kamera dan permukaan objek dengan stabil melalui metode *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS) (Arslan, 2023; Pepe dkk., 2022). Implementasi algoritma tersebut memungkinkan sistem menghasilkan *dense point cloud*, DEM, dan ortofoto secara presisi dan efisien sehingga mendukung pemetaan kadastral dengan kualitas tinggi. Kualitas visual ortofoto tidak selalu memenuhi standar pemetaan pertanahan, terutama pada area yang memiliki bangunan tinggi atau struktur kompleks. Tim pemetaan perlu melakukan *refinement* ortofoto untuk memperbaiki area distorsi, blur, bayangan berlebih, atau geometri yang tidak sesuai kondisi lapangan (Lee & Lee, 2024). Proses ini mencakup teknik seperti *Assign Images*, *Fill DEM*, atau integrasi *point cloud* .las foto udara dan .las LiDAR sehingga ortofoto dapat menampilkan kondisi sebenarnya secara konsisten dan akurat.

Penelitian berbasis Pengabdian kepada Masyarakat (PPM) ini menawarkan konteks pemetaan kadastral di tingkat desa dengan mengintegrasikan pemetaan UAV dengan strategi *refinement* ortofoto berbasis analisis *point cloud* gabungan .las foto udara dan .las LiDAR. Meskipun fotogrametri UAV berbasis SfM-MVS telah banyak digunakan dalam pemetaan kadastral, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan. Keterbatasan metode fotogrametri berbasis SfM-MVS dalam merekonstruksi model elevasi secara stabil pada kawasan permukiman padat menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih komprehensif. Metode foto udara konvensional sangat bergantung pada tekstur permukaan dan distribusi sudut pandang kamera, sehingga berpotensi menghasilkan distorsi geometrik seperti efek *leaning building*, *bending surface*, serta ketidakstabilan DSM pada area dengan tekstur homogen. Kondisi ini dapat memengaruhi ketelitian dan berdampak pada akurasi delineasi batas bidang tanah dalam pemetaan kadastral.

Pendekatan integrasi multisensor UAV yang menggabungkan kamera optik dan LiDAR menjadi solusi potensial untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Sensor LiDAR mampu merekam informasi elevasi

secara langsung dan independen terhadap tekstur visual permukaan, sehingga meningkatkan stabilitas model elevasi yang digunakan dalam proses ortorektifikasi. Dengan mengintegrasikan data *point cloud* LiDAR dan citra foto udara, penelitian ini menguji hipotesis bahwa pendekatan multisensor mampu menurunkan kesalahan geometrik secara signifikan dibandingkan dengan metode fotogrametri tunggal. Oleh karena itu, penggunaan multisensor menjadi penting dalam meningkatkan ketelitian ortofoto dan memastikan kesesuaiannya dengan standar teknis pemetaan kadastral nasional.

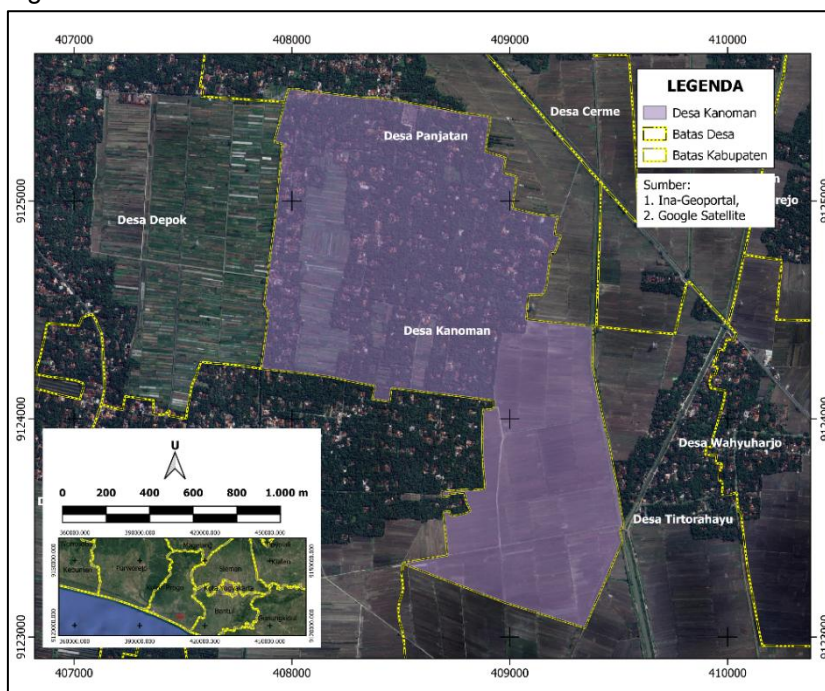
2. DATA DAN METODE

Tahapan penelitian berbasis PPM mulai dari pengumpulan data hingga evaluasi kualitas untuk menghasilkan ortofoto berketelitian tinggi. Seluruh proses mengikuti prinsip fotogrametri modern, integrasi sensor aktif dan pasif, serta teknik pemurnian *orthomosaic* yang mendukung kebutuhan pemetaan kadastral. Struktur metode disusun agar setiap tahapan menghasilkan keluaran yang konsisten dengan standar teknis PTSL Fisik 2025.

2.1 Studi Area dan Spesifikasi Pengukuran

Penelitian berbasis PPM berlangsung di Desa Kanoman, Kecamatan Panjatan, Kabupaten Kulon Progo dengan luas area sekitar 230 ha yang meliputi permukiman, lahan persawahan, serta ruang terbuka (Gambar 1). Wilayah ini memiliki topografi relatif datar sehingga mendukung akuisisi foto udara dan pemodelan elevasi secara stabil tanpa gangguan perubahan kontur yang ekstrem. Akuisisi data memanfaatkan UAV DJI Matrice 350 RTK dengan payload Zenmuse L2 yang berfungsi sebagai sensor pasif untuk pengambilan citra dan sensor aktif untuk pemindaian LiDAR, sehingga area studi memperoleh data permukaan yang kaya akan informasi tekstur serta elevasi.

Kegiatan pemotretan udara menggunakan pengaturan tinggi terbang 120 m, kecepatan 15 m/dt, *overlap* longitudinal 80%, *sidelap* 70%, dan margin 20% (Badan Informasi Geospasial, 2020). Pengaturan ini menghasilkan *Ground Sampling Distance* (GSD) sebesar 3,23 cm/piksel yang memungkinkan identifikasi objek permukaan secara detail. Sistem RTK pada UAV bekerja secara *real-time* untuk memperkuat akurasi posisi kamera, sehingga proses rekonstruksi geometri dapat berjalan stabil pada seluruh jalur terbang.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Desa Kanoman

Pengukuran titik kontrol tanah memanfaatkan *receiver* GNSS geodetik (Sokkia GRX3 dan Geomate SG7) untuk menghasilkan koordinat GCP dan ICP berketelitian tinggi. Pengukuran delapan GCP dilakukan dengan metode statik jaring selama dua jam, sedangkan empat belas ICP diukur dengan metode radial selama 60 menit per titik. Seluruh pengamatan menggunakan interval 1 detik, dan salah satu titik terikat pada jaringan CORS Badan Informasi Geospasial melalui layanan nrtk.big.go.id untuk memastikan kesesuaian referensi koordinat. Spesifikasi pengukuran tersebut memastikan seluruh data yang dikumpulkan pada area studi memenuhi standar teknis pemetaan kadastral dan siap diproses pada tahap fotogrametri serta *refinement* ortofoto.

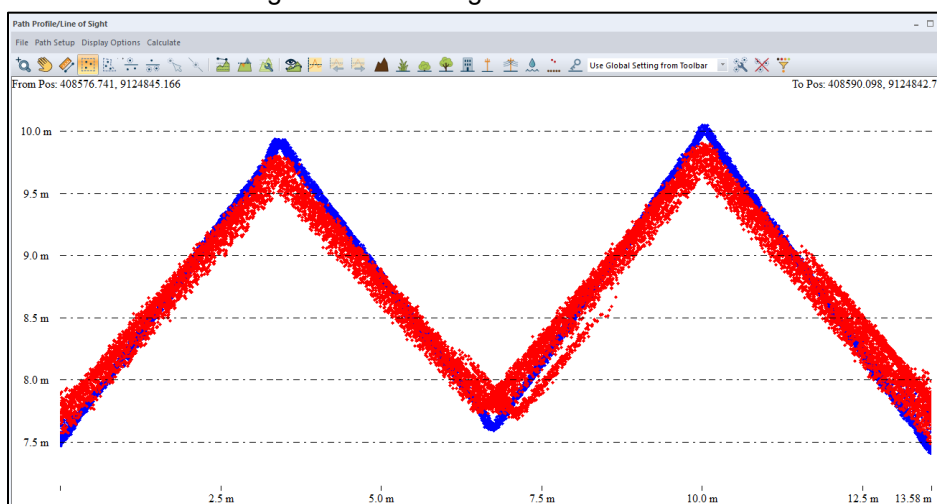
2.2 Computer Vision dalam Fotogrametri dan Integrasi Sensor Aktif-Pasif

Penerapan *computer vision* memperkuat proses fotogrametri modern karena algoritma vision mampu mengekstraksi, mengenali, dan mencocokkan fitur citra secara otomatis (Pepe dkk., 2022). Algoritma seperti SIFT dan SURF mengidentifikasi titik-titik fitur yang stabil pada permukaan objek, kemudian mencocokkannya pada citra lain sehingga sistem dapat membentuk hubungan geometrik antar-gambar (Kermarrec dkk., 2021). Proses tersebut memungkinkan perangkat lunak menyusun orientasi kamera, posisi objek, serta struktur permukaan secara presisi melalui pendekatan SfM dan MVS (Pepe dkk., 2022).

Metode SfM menghasilkan rekonstruksi orientasi kamera dan konfigurasi tiga dimensi yang konsisten berdasarkan hubungan antar-fitur citra. Setelah struktur kamera terbentuk, metode MVS meningkatkan model dengan menghasilkan *dense point cloud* yang merepresentasikan geometri permukaan secara detail. Integrasi kedua metode ini memungkinkan fotogrametri UAV menghasilkan titik permukaan dalam jumlah besar dengan ketelitian spasial tinggi sehingga ortofoto dan DEM dapat terbangun dengan baik.

Fotogrametri UAV memanfaatkan sensor pasif berupa kamera untuk menangkap tekstur, warna, dan tampilan permukaan secara visual. Namun demikian, sensor pasif sering mengalami keterbatasan pada area vegetasi rapat, bayangan pekat, atau bangunan tinggi yang memunculkan distorsi seperti *leaning* dan *bending*. Untuk mengatasi kondisi tersebut, integrasi sensor aktif seperti LiDAR Zenmuse L2 memberikan penopang geometri yang kuat karena LiDAR mampu memetakan elevasi tanah, atap bangunan, dan objek kompleks secara stabil tanpa terpengaruh variasi pencahayaan.

Integrasi data pasif dan aktif menghasilkan model permukaan yang lebih kaya informasi (Gambar 2). Kamera menghasilkan citra beresolusi tinggi yang mendukung segmentasi objek dan pengenalan batas, sedangkan LiDAR menyediakan geometri yang tegas sehingga sistem dapat memperbaiki ketidakstabilan rekonstruksi SfM. Kombinasi kedua sensor tersebut memungkinkan perangkat lunak menghasilkan *dense point cloud* yang lengkap, DEM yang stabil, dan ortofoto yang bebas distorsi. Pendekatan integratif ini sangat penting pada pemetaan kadastral karena ortofoto memerlukan ketelitian planimetris tinggi sekaligus konsistensi visual untuk mendukung delineasi bidang tanah.



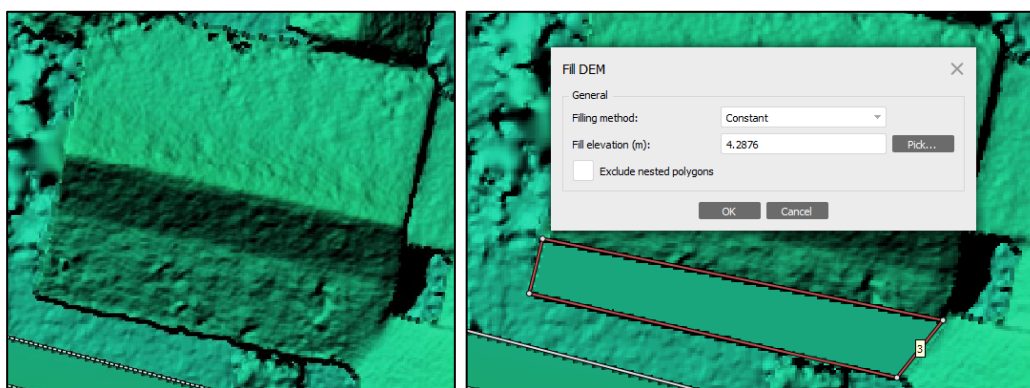
Gambar 2. Sampel integrasi *point cloud* sensor pasif (biru) dan sensor aktif (merah)

2.3 Refinement Ortofoto

Refinement ortofoto menjadi tahapan penting untuk memastikan *orthomosaic* menampilkan bentuk objek secara proporsional, bebas distorsi, dan sesuai dengan kondisi sebenarnya (Habib dkk., 2017; Ludwig dkk., 2020). Ortofoto awal sering menampilkan permasalahan visual seperti *leaning*, *meleyot*, *bending*, atau bayangan berlebih terutama pada permukiman dengan bangunan bergeometri kompleks. Permasalahan tersebut muncul karena perbedaan sudut bidik kamera, ketidakteraturan permukaan, atau kurangnya dukungan elevasi lokal sehingga ortofoto memerlukan perbaikan melalui teknik *refinement*.

Proses *refinement* pada penelitian ini hanya menggunakan dua pendekatan utama, yaitu *Fill DEM* dan *Assign Images*, dengan memanfaatkan DEM hasil integrasi sensor aktif dan pasif (Agisoft LLC, 2023). DEM yang telah diperbaiki oleh kombinasi data SfM-MVS dan LiDAR menyediakan dasar elevasi yang lebih stabil sehingga proses *refinement* dapat berjalan konsisten pada seluruh area yang bermasalah (Liu dkk., 2020; Pepe dkk., 2022). Dengan pemanfaatan DEM yang berkualitas, *orthomosaic* dapat diperbaiki tanpa menghasilkan artefak baru pada struktur bangunan maupun permukaan tanah.

Penggunaan teknik *Fill DEM* untuk memperbaiki permukaan elevasi pada area yang menampilkan elevasi tidak wajar atau distorsi permukaan (Habib dkk., 2017) (Gambar 3). Proses ini diawali dengan pembuatan *boundary polygon* pada area meleyot atau melengkung yang teridentifikasi pada ortofoto. Setelah batas area terbentuk, perangkat lunak memilih nilai elevasi referensi melalui fitur *Pick Elevation* sehingga sistem dapat mengisi permukaan tersebut menggunakan metode “*Constant*”. Dengan teknik ini, DEM menjadi lebih halus dan proporsional sehingga ortofoto yang dihasilkan mampu menampilkan objek tanah dan bangunan secara konsisten tanpa deformasi.



Gambar 3. Visualisasi teknik *Fill DEM*

Penggunaan *Assign Images* untuk menentukan citra utama dalam proses ortorektifikasi pada area yang mengalami distorsi visual (Habib dkk., 2017) (Gambar 4). Perangkat lunak menampilkan daftar citra yang menutupi area tersebut, kemudian operator memilih foto dengan sudut pandang terbaik, ketajaman tinggi, dan minim distorsi. Proses ini memastikan sistem memilih citra yang paling representatif sehingga *orthomosaic* dapat menampilkan atap bangunan, dinding, maupun objek kecil secara akurat. Pendekatan ini juga mengurangi artefak mosaik dan menghasilkan transisi yang lebih halus antar citra.



Gambar 4. Visualisasi teknik *Assign Images* (a) sebelum (b) sesudah

Penerapan kedua teknik tersebut menghasilkan ortofoto yang lebih stabil secara geometri dan visual. *Fill DEM* memperbaiki permukaan elevasi, sedangkan *Assign Images* memastikan kualitas tekstur dan tampilan citra. Kombinasi keduanya mendukung kebutuhan pemetaan kadastral dengan menampilkan objek permukaan yang sesuai dengan kondisi lapangan sehingga ortofoto layak digunakan sebagai dasar deliniasi bidang tanah pada kegiatan PTSL.

2.4 Evaluasi Kualitas

Evaluasi kualitas berguna untuk memastikan bahwa ortofoto dan model elevasi memenuhi ketelitian yang menjadi syarat dalam pemetaan bidang tanah PTSL. Pengujian ini dengan membandingkan koordinat ICP terhadap hasil rekonstruksi fotogrametri yang telah terikat dengan GCP berdasarkan Peraturan Badan Informasi Geospasial (Badan Informasi Geospasial, 2020). Pendekatan ini memberikan gambaran objektif mengenai ketelitian horizontal dan vertikal produk spasial yang dihasilkan oleh sistem UAV. Perhitungan akurasi ini menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk komponen horizontal dan vertikal (ASPRS, 2014; Badan Informasi Geospasial, 2020). Rumus RMSE menghitung deviasi antara posisi hasil pengolahan dan posisi referensi pada ICP, sehingga nilai tersebut merepresentasikan besaran kesalahan yang terjadi secara statistik. Nilai RMSE dirumuskan pada persamaan (1) dan (2) dan RMSE horizontal dievaluasi berdasarkan komponen X dan Y, sedangkan RMSE vertikal dievaluasi berdasarkan komponen Z (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015).

$$RMSE\ H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xdata_i - Xcek_i)^2 + (Ydata_i - Ycek_i)^2}{n}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$RMSE\ V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Zdata_i - Zcek_i)^2}{n}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Nilai RMSE yang telah dihitung kemudian dikonversi menjadi *Circular Error* 90% (CE90) untuk mengukur ketelitian posisi horizontal dari ortofoto dan *Linear Error* 90% (LE90) untuk mengukur ketelitian posisi vertikal dari DEM. Nilai CE90 dan LE90 dirumuskan dengan persamaan (3) dan (4). Berdasarkan Petunjuk Teknis Pengumpulan Data Fisik PTSL Terintegrasi 2025, nilai CE90 menunjukkan radius kesalahan posisi horizontal yang mencakup 90% titik, sedangkan LE90 menunjukkan batas kesalahan vertikal pada tingkat kepercayaan yang sama (Direktorat Jenderal Survei dan Pemetaan Pertanahan dan Ruang, 2025).

$$CE90 = 1,5175 \times RMSE\ H \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSE\ V \quad \dots\dots\dots (4)$$

Evaluasi kualitas tidak berhenti pada analisis geometrik, sehingga pengujian visual ortofoto dilakukan untuk menilai integritas tampilan citra. Pemeriksaan visual mencakup identifikasi area blur, *ghosting*, sambungan mosaik yang tidak seragam, serta distorsi pada objek bangunan. Pemeriksaan ini memastikan seluruh hasil *refinement* pada *Fill DEM* maupun *Assign Images* meningkatkan kualitas ortofoto tanpa menimbulkan artefak baru.

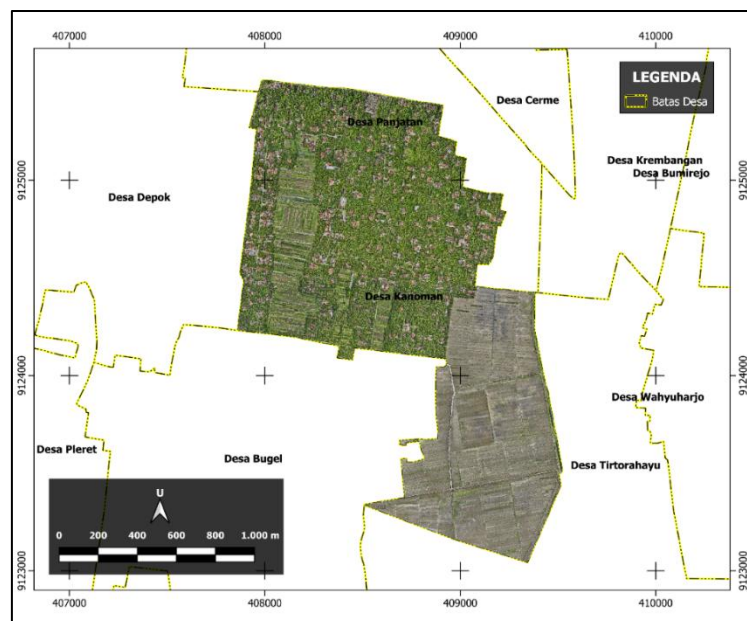
Hasil uji kualitas produk ortofoto memenuhi standar PTSL Fisik 2025, yaitu $CE90 \leq 0,40$ m untuk ketelitian horizontal dan $LE90 \leq 2$ m untuk ketelitian vertikal. Apabila nilai CE90 dan LE90 berada di bawah batas tersebut, ortofoto dinyatakan layak menjadi peta dasar untuk deliniasi bidang tanah. Pendekatan evaluasi ini memastikan bahwa seluruh tahapan pemotretan, pengolahan citra, integrasi sensor aktif-pasif, dan *refinement* menghasilkan produk yang akurat dan dapat diandalkan untuk keperluan kadastral.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemrosesan data fotogrametri dan integrasi multisensor berguna untuk menganalisis dampaknya terhadap kualitas ortofoto dan ketelitian geometrik. Proses akuisisi UAV menghasilkan citra beresolusi tinggi dan jaring kontrol yang kuat, sehingga seluruh tahapan rekonstruksi mampu membangun model tiga dimensi yang stabil. Integrasi *point cloud* kamera dan LiDAR memperkuat struktur permukaan dan menghasilkan DEM yang konsisten sebagai dasar ortorektifikasi. Tahapan *refinement* melalui *Fill DEM* dan *Assign Images* meningkatkan kesesuaian visual ortofoto, terutama pada area permukiman dengan objek bergeometri kompleks. Analisis ketelitian menunjukkan kinerja geometrik ortofoto yang memenuhi standar PTSL, sehingga produk akhir mampu mendukung delineasi bidang tanah secara akurat. Seluruh hasil tersebut menegaskan bahwa pendekatan multisensor dan *refinement* berbasis DEM memberikan kontribusi signifikan terhadap kualitas pemetaan kadastral.

3.1 Karakteristik Hasil Akuisisi Data UAV dan Titik Kontrol

Akuisisi data UAV menghasilkan citra beresolusi tinggi dengan GSD sebesar 3,37 cm/piksel yang diperoleh dari konfigurasi terbang pada ketinggian 120 m dan *overlap* 80/70. Jalur terbang menunjukkan distribusi lintasan yang stabil tanpa penyimpangan signifikan sehingga sistem mampu menangkap variasi permukaan secara konsisten. Distribusi GCP dan ICP menyebar merata pada seluruh area permukiman dan persawahan sehingga jaring kontrol memberikan kekuatan geometrik yang memadai untuk proses rekonstruksi fotogrametri. Hasil ortofoto memperlihatkan tekstur permukaan yang jelas, kontras atap bangunan yang baik, serta ketajaman batas objek dengan konsistensi kualitas citra pada seluruh jalur terbang (Gambar 5). Karakteristik data tersebut memperkuat keseluruhan proses pemodelan sehingga pada tahap selanjutnya sistem dapat menghasilkan *point cloud*, DEM, dan ortofoto yang stabil dan sesuai untuk kebutuhan pemetaan kadastral.



Gambar 5. Ortofoto Desa Kanoman

Karakteristik data akuisisi tersebut menunjukkan bahwa sistem UAV berhasil menyediakan landasan spasial yang kuat untuk proses rekonstruksi tiga dimensi dan pembentukan ortofoto berketelitian tinggi. Untuk peningkatan kemudahan distribusi dan pemanfaatan produk, ortofoto kemudian dikonversi ke format MBTiles dengan perangkat lunak Global Mapper sehingga pengguna dapat menampilkan citra secara interaktif pada perangkat Sistem Informasi Geografi maupun *platform* pemetaan berbasis *web*. Format ini memungkinkan pengguna melakukan pembesaran, identifikasi objek, dan *overlay* dengan data spasial lain seperti batas administrasi atau bidang tanah, sehingga ortofoto dapat mendukung kegiatan

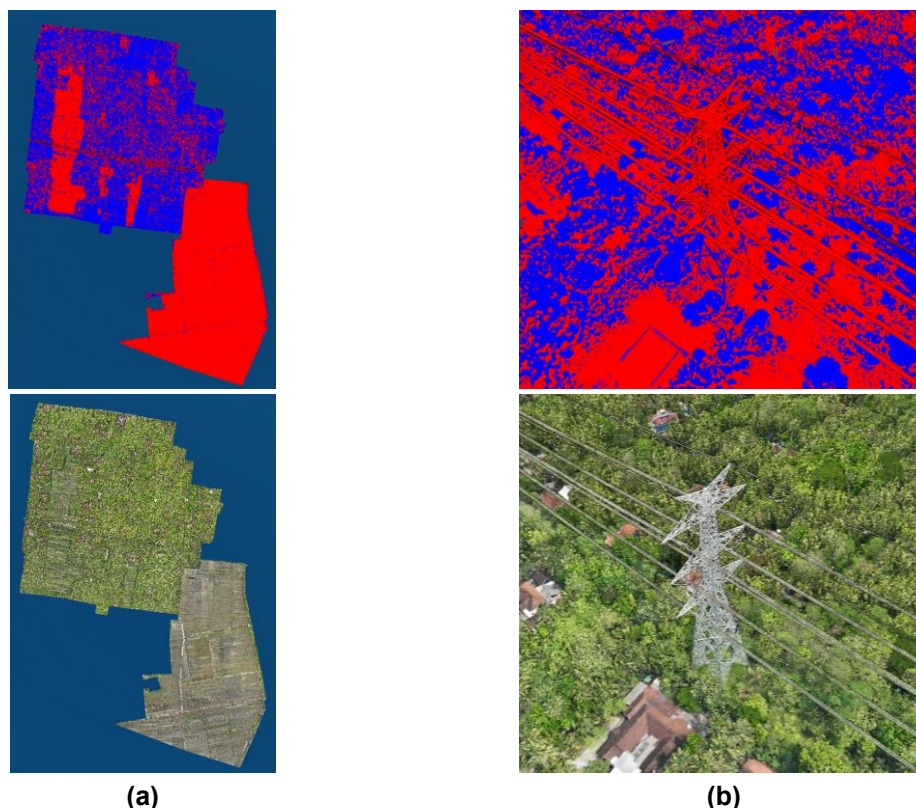
validasi batas dan penyusunan data pertanahan. Secara keseluruhan, ortofoto yang dihasilkan memiliki kualitas visual yang baik, mampu menampilkan informasi spasial secara detail dan akurat, serta layak menjadi dasar pemetaan kadastral dan perencanaan tata ruang di Desa Kanoman.

3.2 Kualitas Fusi *Point Cloud* Multisensor (Kamera dan LiDAR)

Integrasi *point cloud* dari kamera dan LiDAR menghasilkan model permukaan yang lebih stabil dibandingkan hasil rekonstruksi tunggal berbasis foto udara. *Point cloud* dari kamera menyediakan detail tekstur yang rapat, tetapi rekonstruksi SfM-MVS sering menghasilkan ketidakstabilan geometri pada area bervegetasi dan permukiman padat. Sebaliknya, *point cloud* LiDAR memberikan struktur elevasi yang tegas dan konsisten pada permukaan tanah maupun atap bangunan. Fusi kedua sumber data tersebut menyatukan keunggulan sensor pasif dan aktif sehingga model tiga dimensi lebih lengkap, lebih tajam, dan lebih bebas *noise* (Grasso dkk., 2023).

Proses fusi memperlihatkan peningkatan ketelitian terutama pada area permukiman tempat bangunan memiliki bentuk atap kompleks. Hasil penggabungan memperlihatkan permukaan atap yang lebih rata, bidang dinding yang lebih konsisten, serta pengurangan artefak seperti bidang melengkung atau tonjolan elevasi yang sering muncul pada *point cloud* hasil SfM. Kombinasi tersebut juga memperkuat representasi elevasi tanah pada area persawahan dan halaman rumah, yang sebelumnya rentan menghasilkan permukaan tidak rata akibat keseragaman tekstur pada citra udara.

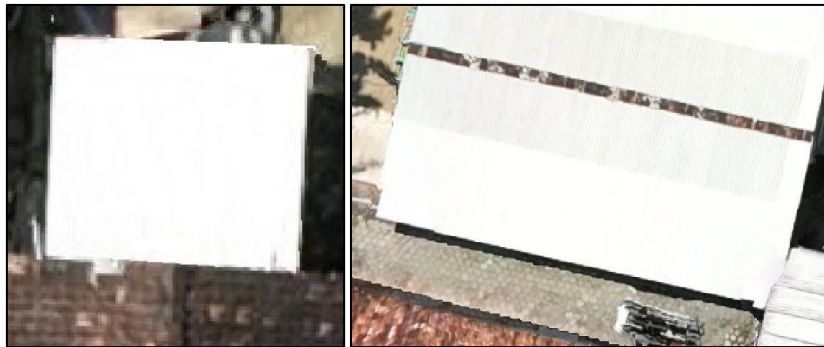
Kualitas *point cloud* hasil fusi meningkatkan ketelitian DEM secara signifikan, karena sistem memperoleh elevasi yang stabil dari LiDAR dan detail objek dari rekonstruksi foto udara (Gambar 6). Model permukaan yang lebih akurat ini mendukung tahap *refinement* ortofoto pada bagian berikutnya, terutama *Fill DEM* dan *Assign Images*, karena perangkat lunak bekerja pada permukaan yang sudah diperkuat oleh data multisensor. Dengan demikian, fusi *point cloud* multisensor berperan langsung dalam meningkatkan kualitas akhir ortofoto dan relevansinya untuk pemetaan kadastral.



Gambar 6. Integrasi *point cloud* sensor pasif (biru) dan sensor aktif (merah) pada hasil keseluruhan Desa Kanoman (a) dan area sampel (b)

3.3 Dampak Refinement Ortofoto terhadap Kualitas Tampilan Citra

Penerapan teknik *refinement* ortofoto memberikan peningkatan signifikan terhadap kualitas visual citra pada area permukiman, khususnya bangunan bergeometri kompleks yang sebelumnya menunjukkan distorsi *leaning* dan *bending*. *Fill DEM* memperbaiki ketidakwajaran elevasi pada permukaan atap dan tanah sehingga sistem menghasilkan permukaan ortorektifikasi yang lebih stabil. Perbaikan ini terlihat jelas pada perubahan bentuk atap yang semula melengkung atau meleyot menjadi lurus dan proporsional sesuai kondisi lapangan. Peningkatan kualitas DEM tersebut berkontribusi langsung terhadap kejelasan objek pada ortofoto dan mengurangi risiko salah interpretasi pada saat delineasi bidang tanah.



Gambar 7. Hasil Assign Images dan Fill DEM



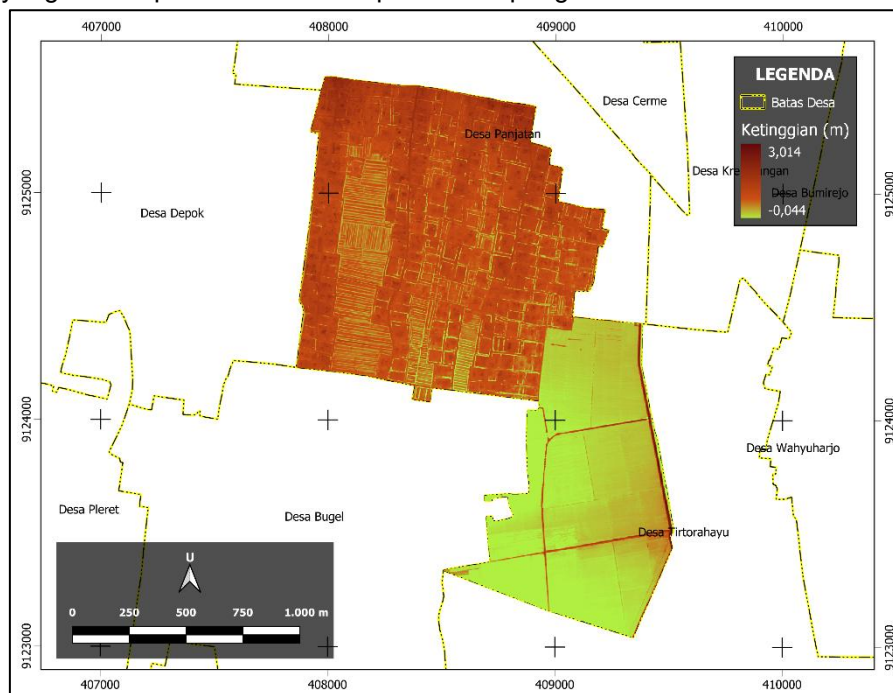
Gambar 8. Perbandingan kualitas ortofoto pada area permukiman (a) sebelum *refinement* (b) sesudah *refinement*

Assign Images juga memberikan dampak signifikan dengan memastikan citra yang digunakan sebagai sumber ortorektifikasi berasal dari foto terbaik pada area yang mengalami distorsi. Proses pemilihan foto utama yang mempertimbangkan ketajaman, sudut pandang, dan kualitas tekstur menghasilkan mosaik yang lebih halus dan seragam. Teknik ini mengurangi artefak mosaik seperti bayangan ganda, objek ganda (*ghosting*), dan tepi bangunan yang kabur. Hasil perubahan tersebut terlihat pada peningkatan ketegasan kontur atap, kejelasan tepi bangunan, serta konsistensi warna permukaan pada ortofoto akhir (Gambar 7).

Kombinasi *Fill DEM* dan *Assign Images* menghasilkan ortofoto yang lebih stabil secara geometri maupun visual. Ortofoto awal menampilkan beberapa distorsi pada atap rumah, permukaan tanah yang bergelombang, dan area buram pada sudut bangunan. Kondisi tersebut berhasil diperbaiki pada ortofoto hasil *refinement*. Peningkatan kualitas tersebut dapat diamati secara visual yang memperlihatkan perbandingan tampilan permukaan antara ortofoto awal dan ortofoto hasil perbaikan (Gambar 8). Dengan kualitas tampilan yang lebih akurat, ortofoto hasil *refinement* memberikan dasar visual yang lebih kuat dalam proses delineasi batas bidang tanah, validasi fisik lapangan, dan kegiatan pemetaan kadastral pada skala desa.

3.4 Evaluasi Permukaan DEM Hasil Integrasi Sensor

Integrasi *point cloud* kamera dan LiDAR menghasilkan permukaan DEM yang memiliki stabilitas elevasi lebih baik dibandingkan dengan hasil pemodelan tunggal berbasis SfM. Permukaan yang terbentuk memperlihatkan kontur tanah yang lebih halus, elevasi bangunan yang lebih konsisten, serta pengurangan artefak rekonstruksi pada area permukiman yang sebelumnya rentan mengalami *bending* atau *warping*. Integrasi sensor aktif-pasif ini menghasilkan distribusi elevasi yang seragam pada area datar maupun pada objek bergeometri kompleks seperti atap, sehingga DEM dapat mendukung proses ortorektifikasi secara lebih akurat dengan menunjukkan pola elevasi yang konsisten. Evaluasi permukaan juga memperlihatkan bahwa fusi data LiDAR memperkuat definisi objek vertikal, sedangkan kontribusi kamera mempertahankan keseragaman detail tekstur permukaan (Gambar 9). Dengan kualitas DEM yang stabil dan bebas distorsi tersebut, proses *refinement* ortofoto pada tahap selanjutnya dapat berjalan lebih optimal dan menghasilkan tampilan citra yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan.



Gambar 9. Digital Terrain Model Desa Kanoman

Pengolahan awal berbasis SfM-MVS tanpa integrasi LiDAR menunjukkan kecenderungan distorsi pada area bangunan bergeometri kompleks, terutama pada atap miring dan struktur bertingkat. Permukaan DEM yang dihasilkan memperlihatkan ketidakstabilan elevasi lokal yang berpengaruh terhadap proses ortorektifikasi. Setelah integrasi *point cloud* LiDAR dilakukan, struktur permukaan menjadi lebih konsisten dan artefak rekonstruksi berkurang secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan multisensor memberikan peningkatan stabilitas geometri dibandingkan dengan metode fotogrametri tunggal, terutama pada area permukiman padat.

3.5 Analisis Ketelitian Geometrik (RMSE, CE90, dan LE90)

Hasil evaluasi ketelitian geometrik menunjukkan bahwa integrasi foto udara dan LiDAR memberikan peningkatan akurasi yang signifikan setelah dilakukan *refinement* ortofoto. Perhitungan residu pada kondisi awal menghasilkan RMSE H sebesar 11,35 cm dan RMSE V sebesar 25,08 cm (Tabel 1). Konversi nilai tersebut ke parameter standar ketelitian menghasilkan CE90 sebesar 0,1722 m dan LE90 sebesar 0,4138 m. Nilai ini masih memenuhi batas toleransi yang ditetapkan dalam Petunjuk Teknis Pengumpulan Data Fisik PTSL Terintegrasi 2025, yaitu $CE90 \leq 0,40$ m untuk ketelitian horizontal dan $LE90 \leq 2,00$ m untuk ketelitian vertikal. Meskipun demikian, besarnya residu vertikal menunjukkan bahwa model elevasi masih mengalami ketidakstabilan lokal, terutama pada area permukiman dengan bangunan bergeometri kompleks dan perbedaan elevasi yang tajam. Kondisi tersebut berpotensi memengaruhi kualitas ortorektifikasi dan ketepatan representasi objek vertikal pada *orthomosaic*.

Hasil pengolahan setelah integrasi multisensor dan penerapan teknik *Fill DEM* serta *Assign Images* menunjukkan penurunan residu yang signifikan. Nilai RMSE H menurun menjadi 5,56 cm dan RMSE V menjadi 5,81 cm (Tabel 2). Konversi terhadap parameter ketelitian menghasilkan CE90 sebesar 0,0844 m dan LE90 sebesar 0,0958 m. Penurunan residu horizontal sekitar 51% dan residu vertikal sekitar 77% dibandingkan dengan kondisi awal menunjukkan bahwa integrasi sensor aktif dan pasif berkontribusi langsung terhadap peningkatan stabilitas geometri model. Penurunan paling dominan terjadi pada komponen vertikal, yang mengindikasikan bahwa data LiDAR memperkuat struktur elevasi dan mengurangi distorsi akibat keterbatasan rekonstruksi SfM-MVS pada area dengan tekstur homogen atau sudut pandang kamera terbatas.

Tabel 1. RMSE ortofoto hanya foto udara

Titik	ΔX (cm)	ΔY (cm)	$\Delta X^2 + \Delta Y^2$	ΔZ (cm)	ΔZ^2 (cm)
ICP1A	13,60	-17,96	507,34	30,34	920,35
ICP1B	13,09	-5,62	202,99	17,32	299,83
ICP2A	10,39	-9,81	204,19	19,31	372,84
ICP3A	7,88	1,88	65,66	16,33	266,83
ICP3B	17,79	2,73	324,08	31,09	966,50
ICP4A	6,85	-6,57	90,03	17,65	311,42
ICP4B	10,03	-0,16	100,63	21,09	444,85
ICP5A	6,77	-10,09	147,74	23,03	530,17
ICP6A	4,85	-7,61	81,48	19,55	382,06
ICP6B	-1,17	1,94	5,15	31,26	977,29
ICP7A	-0,62	6,30	40,03	20,73	429,68
ICP7B	-0,72	0,45	0,73	16,91	285,92
ICP8A	4,58	-0,82	21,64	25,84	667,62
ICP8B	0,58	3,26	10,94	44,14	1948,36
		Jumlah	1802,64	Jumlah	8803,70
		Rata-rata	128,76	Rata-rata	628,84
		RMSE H	11,35	RMSE V	25,08

Tabel 2. RMSE ortofoto kombinasi foto udara dengan LiDAR

Titik	ΔX (cm)	ΔY (cm)	$\Delta X^2 + \Delta Y^2$	ΔZ (cm)	ΔZ^2 (cm)
ICP1A	-2,48	-10,81	122,98	8,77	76,98
ICP1B	3,10	-4,41	29,09	6,61	43,67
ICP2A	0,79	-3,54	13,18	-1,97	3,89
ICP3A	2,96	2,96	17,49	3,88	15,04
ICP3B	10,81	-0,01	116,90	-1,66	2,75
ICP4A	0,49	-3,25	10,78	-6,43	41,35
ICP4B	4,16	-0,12	17,30	1,26	1,58
ICP5A	1,02	-3,69	14,65	-2,17	4,72
ICP6A	-0,26	-6,43	41,46	5,93	35,19
ICP6B	-1,85	0,52	3,70	1,68	2,83
ICP7A	-2,11	3,76	18,56	-11,97	143,17
ICP7B	-1,04	-0,12	1,09	-6,62	43,79
ICP8A	0,48	-0,93	1,10	7,56	57,19
ICP8B	-4,87	1,06	24,84	0,53	0,28
	Jumlah		433,09	Jumlah	472,42
	Rata-rata		30,94	Rata-rata	33,74
	RMSE H		5,56	RMSE V	5,81

Perbandingan terhadap standar teknis BIG dan Petunjuk Teknis Pengumpulan Data Fisik PTSL Terintegrasi 2025 menunjukkan bahwa nilai CE90 hanya sekitar 21% dari batas maksimum yang diperkenankan, sedangkan nilai LE90 hanya sekitar 4,8% dari ambang toleransi vertikal. Capaian tersebut menegaskan bahwa ortofoto hasil integrasi multisensor tidak hanya memenuhi standar minimum regulatif, tetapi juga berada pada tingkat presisi tinggi untuk pemetaan kadastral tingkat desa. Ketelitian horizontal sebesar 0,0844 m memberikan tingkat kepercayaan tinggi dalam proses delineasi batas bidang tanah, sedangkan ketelitian vertikal sebesar 0,0958 m memastikan bahwa model elevasi yang digunakan dalam ortorektifikasi telah stabil dan konsisten.

Secara keseluruhan, pendekatan integrasi multisensor UAV yang dikombinasikan dengan *refinement* berbasis DEM korektif terbukti meningkatkan kualitas geometrik ortofoto secara kuantitatif dan terukur. Hasil ini memperlihatkan bahwa fusi kamera dan LiDAR tidak hanya memperbaiki tampilan visual citra, tetapi juga menurunkan kesalahan posisi secara signifikan hingga berada jauh di bawah batas toleransi nasional. Dengan demikian, ortofoto yang dihasilkan layak digunakan sebagai peta dasar PBT dan mendukung percepatan pelaksanaan PTSL di tingkat desa secara lebih presisi dan andal.

3.6 Relevansi Ortofoto Hasil *Refinement* terhadap Pemetaan Kadastral Desa Kanoman

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pendekatan multisensor memberikan keunggulan signifikan dibandingkan dengan metode fotogrametri tunggal dalam konteks pemetaan kadastral. Penurunan RMSE horizontal sebesar 51% dan RMSE vertikal sebesar 77% secara langsung meningkatkan ketelitian delineasi batas bidang tanah. Integrasi DSM LiDAR menghasilkan stabilitas elevasi yang lebih baik sehingga mengurangi distorsi ortorektifikasi yang berpotensi menyebabkan pergeseran posisi objek batas seperti pagar, dinding, dan tepi bangunan. Nilai CE90 sebesar 0,0844 m, yang jauh berada di bawah batas toleransi 0,40 m, menunjukkan bahwa metode multisensor tidak hanya memenuhi Petunjuk Teknis Pengumpulan Data Fisik PTSL Terintegrasi 2025, tetapi juga menyediakan margin presisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendekatan berbasis foto udara saja.

Ortofoto hasil *refinement* menyediakan dasar visual yang stabil untuk proses delineasi karena citra menampilkan bangunan, pagar, jalan, dan elemen fisik lainnya secara proporsional tanpa distorsi geometrik. Teknik *Fill DEM* menghasilkan permukaan elevasi yang konsisten, sedangkan *Assign Images*

mempertahankan ketajaman tekstur. Kombinasi kedua teknik tersebut menghasilkan *orthomosaic* yang lebih halus dan bebas dari artefak *leaning*, *bending*, maupun *ghosting* yang umum muncul pada area permukiman padat. Secara geometrik, integrasi *point cloud* kamera dan LiDAR memperkuat struktur elevasi objek vertikal seperti atap dan dinding bangunan, yang pada pendekatan SfM-MVS tunggal sering mengalami ketidakstabilan akibat keterbatasan sudut pandang dan homogenitas tekstur. Ketidakstabilan tersebut berpotensi menimbulkan distorsi planimetris yang memengaruhi interpretasi batas fisik bidang tanah. Dengan dukungan sensor aktif, model elevasi menjadi lebih konsisten sehingga kualitas ortorektifikasi meningkat secara signifikan dibandingkan dengan metode fotogrametri tunggal.

Kegiatan PPM ini selaras dengan penelitian oleh Liang dkk. (2023) dan Zhang dkk. (2022) menunjukkan bahwa fusi LiDAR dan SfM-MVS meningkatkan ketajaman model tiga dimensi pada kawasan urban dengan objek kompleks. Penggabungan metode ini menambah akurasi terutama pada elevasi (Maskeliūnas dkk., 2025). Cogliati et al. (2017) menekankan bahwa kestabilan DEM berperan penting dalam menentukan kualitas *orthomosaic*. Berbeda dengan studi terdahulu yang umumnya berfokus pada peningkatan model tiga dimensi, penelitian ini menekankan implikasi langsung terhadap ketelitian planimetris untuk pemetaan kadastral desa melalui kombinasi fusi multisensor dan teknik *refinement* ortofoto.

Dengan demikian, pendekatan multisensor yang diterapkan dalam penelitian ini lebih adaptif dan efektif dibandingkan dengan metode fotogrametri tunggal dalam mendukung kebutuhan ketelitian geometrik pada pemetaan kadastral tingkat desa. Ortofoto yang telah melalui proses *refinement* meningkatkan keandalan interpretasi batas eksisting sehingga PBT dapat tersusun dengan ketelitian planimetris yang lebih tinggi. Pada konteks implementatif, Pemerintah Desa Kanoman dan Kantor Pertanahan Kulon Progo memperoleh manfaat langsung karena ortofoto yang stabil mempermudah verifikasi lapangan, validasi batas klaim warga, dan harmonisasi antara data spasial desa, dan basis data pertanahan. Kualitas geometrik dan visual yang lebih baik tersebut turut mendukung efisiensi pelaksanaan program PTSL serta meningkatkan kualitas basis data kadastral desa sebagai referensi spasial untuk perencanaan jangka panjang.

4. KESIMPULAN

Penelitian berbasis PPM ini menghasilkan ortofoto berketelitian tinggi melalui integrasi data UAV, pengolahan fotogrametri berbasis *computer vision*, serta kombinasi sensor aktif-pasif yang memberikan dasar geometri dan tekstur permukaan yang kuat pada wilayah Desa Kanoman. Sistem akuisisi yang stabil, jaring kontrol yang kuat, dan kualitas citra yang baik memungkinkan rekonstruksi tiga dimensi berlangsung secara konsisten sehingga seluruh objek fisik di desa terwakili dengan jelas. Integrasi *point cloud* kamera dan LiDAR memperkuat model elevasi, memungkinkan DEM menampilkan struktur atap, permukiman, lahan terbuka, dan jaringan jalan secara stabil di seluruh bagian desa. Penerapan teknik *refinement Fill* DEM dan *Assign Images* meningkatkan kualitas ortofoto dengan menghilangkan distorsi pada bangunan, memperhalus relief permukaan, dan menghasilkan mosaik yang lebih bersih.

Ortofoto yang telah melalui proses perbaikan menunjukkan konsistensi visual yang memadai untuk kebutuhan delineasi batas bidang tanah di Desa Kanoman. Evaluasi akurasi menghasilkan CE90 sebesar 0,0844 m dan LE90 sebesar 0,0958 m, nilai yang berada jauh di bawah batas toleransi Petunjuk Teknis Pengumpulan Data Fisik PTSL Terintegrasi 2025 dan memenuhi standar pemetaan kadastral yang diterapkan oleh Kantor Pertanahan Kulon Progo. Hasil ini menegaskan bahwa ortofoto dan DEM hasil integrasi sensor layak menjadi dasar spasial dalam penyusunan PBT, validasi batas fisik, serta integrasi informasi pertanahan dengan data administrasi desa.

Secara keseluruhan, produk spasial yang dihasilkan pada penelitian ini memberikan dukungan teknis yang kuat bagi Pemerintah Desa Kanoman dan Kantor Pertanahan Kulon Progo dalam meningkatkan kualitas data pertanahan, mempercepat proses PTSL, serta memperkuat keandalan peta dasar yang digunakan dalam pelayanan pertanahan dan perencanaan ruang di tingkat desa.

Funding

Penelitian ini didanai oleh dana hibah kegiatan PPM Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Dukungan pendanaan ini memungkinkan pelaksanaan akuisisi data lapangan, pemrosesan fotogrametri, serta penyusunan analisis teknis yang disajikan dalam studi ini

Ucapan Terima Kasih

Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada Pemerintah Desa Kanoman dan Kantor Pertanahan Kulon Progo atas dukungan, akses data, serta fasilitasi kegiatan lapangan yang berperan penting dalam kelancaran penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada yang menyediakan sarana pemrosesan dan pendampingan teknis selama pelaksanaan studi. Pemanfaatan perangkat lunak Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2023), DJI Terra (DJI, 2023), QGIS (Bozon & Rieux, 2018), dan Global Mapper Pro (Blue Marble Geographics, 2023) berkontribusi secara signifikan dalam pengolahan data fotogrametri, integrasi multisensor, serta penyusunan produk spasial penelitian ini. Apresiasi juga diberikan kepada rekan-rekan tim PPM atas dukungan teknis dan kolaborasi yang memperkaya kualitas analisis dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape Professional User Manual*.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2015). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*.
- Arslan, O. (2023). Bir Fotogrametrik Bilgisayarlı Görü Tekniği olarak İHA Fotogrametrisi TT - UAV Photogrammetry as a Photogrammetric Computer Vision Technique. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 5(2), 59–71. <https://doi.org/10.51534/tiha.1392600>
- ASPRS. (2014). *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*.
- Badan Informasi Geospasial. (2020). *Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 1 Tahun 2020 tentang Spesifikasi Teknis Peta Dasar*. Badan Informasi Geospasial.
- Blue Marble Geographics. (2023). *Global Mapper Pro User Guide*.
- Bozon, N. & Rieux, F. (2018). *QGIS Training Manual*.
- Cogliati, M., Tonelli, E., Battaglia, D., & Scaioni, M. (2017). Extraction of DEMs and Orthoimages from Archive Aerial Imagery to Support Project Planning in Civil Engineering. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(5W1), 9–16. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-9-2017>
- Direktorat Jenderal Survei dan Pemetaan Pertanahan dan Ruang. (2025). *Petunjuk Teknis Pengumpulan Data Fisik PTSL Terintegrasi*. Kementerian Agraria dan Tata Ruang/Badan Pertanahan Nasional.
- DJI. (2023). *DJI Terra User Manual*.
- Fahmi, K., Rizqi, M., & Kamal, S. (2023). *Journal Widya Bhumi*. 3(1), 31–45.
- Fahrudin, Muh. F., & Mujiburohman, D. A. (2024). Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dalam Peningkatan Kualitas Data Spasial Pertanahan. *Kadaster: Journal of Land Information Technology*, 2(1), 35–49. <https://doi.org/10.31292/kadaster.v2i1.29>
- Faza, M. I. & Darmawan, S. (2025). Pembuatan Peta Dasar Pendaftaran Tanah 3D Menggunakan UAV untuk Keperluan Proses Pendaftaran Tanah di Kota Cirebon. *Prosiding FTSP Series*, 413–425.
- Grasso, N., Spadavecchia, C., Pietra, V. Di, & Belcore, E. (2023). *LiDAR and SfM-MVS Integrated Approach to Build a Highly Detailed 3D Virtual Model of Urban Areas*. (Gistam), 128–135. <https://doi.org/10.5220/0011760800003473>

- Habib, A., Xiong, W., He, F., Yang, H. L., & Crawford, M. (2017). Improving Orthorectification of UAV-Based Push-Broom Scanner Imagery Using Derived Orthophotos from Frame Cameras. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(1), 262–276. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2520929>
- Kermarrec, G., Lösler, M., & Hartmann, J. (2021). Analysis of the Temporal Correlations of TLS Range Observations from Plane Fitting Residuals. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 119–132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.012>
- Lee, K. & Lee, W. (2024). Thermal Infrared Orthophoto Geometry Correction using RGB Orthophoto for Unmanned Aerial Vehicle. in *Aerospace* (Vol. 11, Number 10, 817). <https://doi.org/10.3390/aerospace11100817>
- Liang, Y., Yang, Y., Mu, Y., & Cui, T. (2023). Robust Fusion of Multi-Source Images for Accurate 3D Reconstruction of Complex Urban Scenes. *Remote Sensing*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/rs15225302>
- Liu, K., Li, Q., & Qiu, G. (2020). PoseGAN: A Pose-to-image Translation Framework for Camera Localization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 308–315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.010>
- Ludwig, M., Runge, C., Friess, N., Koch, T. L., Richter, S., Seyfried, S., Wraase, L., Lobo, A., Sebastià, M.-T., Reudenbach, C., & Nauss, T. (2020). Quality Assessment of Photogrammetric Methods—A Workflow for Reproducible UAS Orthomosaics. in *Remote Sensing* (Vol. 12, Number 22, p. 3831). <https://doi.org/10.3390/rs12223831>
- Maskeliūnas, R., Maqsood, S., Vaškevičius, M., & Gelšvartas, J. (2025). Fusing LiDAR and Photogrammetry for Accurate 3D Data: A Hybrid Approach. *Remote Sensing*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/rs17030443>
- Pepe, M., Alfio, V. S., & Costantino, D. (2022). UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field. in *Applied Sciences* (Vol. 12, Number 24, p. 12886). <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Rijsdijk, M., Koster, R., & Hendriks, B. (2021). Assessing UAV-Based Photogrammetry Accuracy for Parcel Mapping. *Land Use Policy*, 104, 105–125.
- Sandria, R., Cordova, K., & Rassarandi, F. D. (2025). *Uji Akurasi Peta Foto Udara Skala 1 : 5000 Sebagai Peta Dasar Berdasarkan Juknis PTSL Tahun 2023 (Studi Kasus : Tanjung Piayu , Batam , Kepulauan Riau)*. 17(2), 117–121.
- Wibowo, H. Y. & Diyono. (2024). Implementasi Data Geospasial Bidang Tanah dalam Standar Administrasi Pertanahan. *Jurnal Pertanahan*, 14(2), 174–185. <https://doi.org/10.53686/jp.v14i2.230>
- Zhang, P., He, H., Wang, Y., Liu, Y., Lin, H., Guo, L., & Yang, W. (2022). 3D Urban Buildings Extraction based on Airborne LiDAR and Photogrammetric Point Cloud Fusion According to U-Net Deep Learning Model Segmentation. *IEEE Access*, 10, 20889–20897. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152744>