

# **KOMPARASI PRODUKTIVITAS DAN AKURASI PESAWAT UDARA NIRAWAK UNTUK SURVEI FOTOGRAMETRI PADA PROYEK JALAN (COMPARISON OF PRODUCTIVITY AND ACCURACY OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR PHOTOGRAMMETRY SURVEYS ON ROAD PROJECTS)**

**Ali Amirrudin Ahmad<sup>1\*)</sup>, Yosevel Lyhardo Sidabutar<sup>1)</sup>, Agnes Shelvira Herwieany<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>PT. Waskita Karya, Jakarta, Indonesia

<sup>\*)</sup>ali.amirrudin@waskita.co.id

Diterima: 01 April 2024; direvisi: 05 Juni 2024; disetujui: 24 Juni 2024.

## **ABSTRAK**

*Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau Pesawat Udara Nirawak (PUNA), biasa dikenal dengan drone, merupakan perangkat udara yang dilengkapi dengan kamera dan sensor digunakan untuk berbagai aplikasi termasuk survei pemetaan udara. Pertumbuhan teknologi PUNA telah memberi manfaat signifikan, termasuk di industri konstruksi dengan memungkinkan pengumpulan data spasial secara akurat dan efisien untuk pemodelan 3-dimensi, pemantauan progres, dan analisis volume pekerjaan. Perkembangan PUNA menyebabkan beragamnya berbagai jenis PUNA mencakup jenis sayap, ukuran, jangkauan, serta kemampuannya. Keanekaragaman jenis dan merek PUNA di pasar menjadi tantangan bagi organisasi untuk menentukan pilihan PUNA agar sesuai dengan kebutuhan dan tujuan penggunaannya. Penelitian bertujuan untuk memberikan rekomendasi PUNA dalam survei pemetaan dengan cara membandingkan produktivitas dan akurasi. Penelitian ini membandingkan 3 (tiga) jenis PUNA yang berbeda, yaitu DJI Phantom 4 ProV2, DJI Mavic 3 Enterprise+RTK, dan WingtraOne Gen II yang dikombinasikan dengan dua jenis metode geotagging, yaitu GCP (Ground Control Point) dan PPK (Post Processing Kinematic). Penelitian yang dilaksanakan pada 31 Januari 2023 di Proyek Jalan Tol Cimanggis-Cibitung Seksi 2 memperoleh hasil akurasi terbaik 0,08 m secara horizontal dan 0,07 m secara vertikal dari wahana WingtraOne Gen II metode PPK, sedangkan hasil perbandingan produktivitas terbaik didapatkan DJI Mavic 3 Enterprise RTK dengan produktivitas 2,90 ha/min. Secara umum untuk pemanfaatan teknologi survei fotogrametri pada proyek jalan yang memanjang direkomendasikan menggunakan PUNA portabel serta kemampuan metode PPK dan/atau RTK dengan pertimbangan utama akurasi dan produktivitas. Hasil penelitian dapat memberikan wawasan mengenai kombinasi PUNA dan metode geotagging yang optimal dalam pemanfaatan fotogrametri di industri konstruksi.*

**Kata Kunci :** PUNA, fotogrametri, geotagging, proyek konstruksi, jalan tol

## **ABSTRACT**

*Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), commonly known as drones, are aerial devices equipped with cameras and sensors for various applications, including aerial mapping surveys. The growth of UAV technology has provided significant benefits in the construction industry by enabling accurate and efficient spatial data collection for 3D modelling, progress monitoring and work volume analysis. Various characteristics of UAVs, including wing type, size, coverage and capabilities, accompany the development of UAVs. The diversity of types and brands of UAVs on the market is a challenge for organizations in determining the choice of UAVs that suit their needs and intended use. This research aims to provide recommendations for UAVs in mapping survey activities by comparing productivity and accuracy. In this research, we compare 3 (three) different types of UAV, namely DJI Phantom 4 Pro V2, DJI Mavic 3 Enterprise RTK, and WingtraOne Gen II, combined with two types of geotagging methods, namely GCP (Ground Control Point) and PPK (Post Processing Kinematic). Research carried out on 31 January 2023 at the Cimanggis-Cibitung Toll Road Project Section 2 location obtained the best accuracy results of 0.08 m horizontally and 0.07 m vertically from the WingtraOne Gen II PPK method, while DJI Mavic 3 RTK Enterprises obtained the best productivity comparison results with productivity of 2.90 ha/min. In general, for using photogrammetric survey technology on long continuous road projects, it is recommended to use portable UAVs and the capabilities of the PPK and RTK methods, with the primary consideration being accuracy and productivity. The research results can provide insight into the optimal combination of PUNA and geotagging methods in using photogrammetry in the construction industry.*

**Keywords:** UAV, photogrammetry, geotagging, construction project, toll road

## PENDAHULUAN

Konstruksi merupakan sektor penting yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian. Industri konstruksi harus bersifat dinamis agar mampu merespons perubahan yang terjadi di dunia, termasuk tantangan sosial, ekonomi, dan teknologi (Said 2011). Di mana waktu, biaya, kualitas, dan risiko merupakan empat bagian penting dalam manajemen konstruksi yang saling berkaitan (Rezaian 2011). Dalam manajemen konstruksi pemanfaatan teknologi dapat meningkatkan produktivitas, pertumbuhan, dan keberlanjutan jangka panjang (Chowdhury et al. 2019).

Perkembangan teknologi yang bersifat eksponensial (Diamandis 2012) menjadi pendorong utama dalam transformasi berbagai industri, termasuk industri konstruksi. Minat penggunaan teknologi dalam industri konstruksi juga terus meningkat, perusahaan konstruksi terus mencari cara terbaik dalam metode konstruksi untuk mencapai tujuan proyek Chen et al. (2022).

Dalam penelitian Chen et al. (2022) yang mengidentifikasi dari literatur menghasilkan 26 teknologi yang dapat dikelompokkan ke dalam 5 kategori berdasarkan fungsinya dalam proses konstruksi, yaitu akuisisi data, analisis, visualisasi, komunikasi, serta otomatisasi desain dan konstruksi. Kategori akuisisi data dan visualisasi secara umum mendukung dan memungkinkan inovasi dalam banyak aspek konstruksi. *Building Information Modelling* (BIM) merupakan teknologi yang paling umum digunakan, dikombinasikan dengan teknologi lain seperti PUNA, *Geographic Information System* (GIS) dan *Light Distance and Ranging* (LiDAR).

Teknologi PUNA diterapkan dan diintegrasikan ke dalam dunia konstruksi secara cepat dan terus berkembang dalam berbagai tahapan siklus hidup konstruksi (Albeaino dan Gheisari 2021). Manfaat dalam penggunaan PUNA tersebut antara lain penghematan waktu, meminimalisir risiko, *monitoring* proyek, meningkatkan produktivitas, efisiensi metode kerja, meningkatkan komunikasi, informasi secara *real-time*, integrasi dengan data BIM, perhitungan volume material, pengukuran dan pemetaan, survei fotogrametri yang akurat, serta meningkatkan keamanan (Mahajan 2021).

Fotogrametri didefinisikan oleh American Society of Photogrammetry sebagai “seni, ilmu pengetahuan, dan teknologi untuk

memperoleh informasi yang dapat dipercaya tentang objek fisik dan lingkungan, melalui proses perekaman, pengukuran, dan interpretasi gambar dan pola energi radiasi elektromagnetik dan fenomena lainnya (Miller 1957). Definisi lain fotogrametri oleh Kaamin et al. (2017) adalah memperoleh pengukuran dan model 3D (3-dimensi) yang dapat diandalkan melalui foto. Survei fotogrametri dengan PUNA memberikan foto dengan resolusi tinggi yang tumpang tindih disusun menjadi sebuah mosaik yang membentuk model permukaan 3D dengan resolusi tinggi untuk digunakan pemetaan topografi, perhitungan volumetrik, atau representasi tiga dimensi lokasi kerja (Tatum and Liu 2017). Untuk keperluan konstruksi yang membutuhkan ketelitian dan akurasi yang tinggi, dibutuhkan pemilihan wahana dan metode yang tepat dalam akuisisi data survei fotogrametri (Martínez-Carricondo et al. 2018).

Penelitian terkait perbandingan akurasi antara PUNA dengan data RTK GPS dengan menggunakan 45 titik uji didapatkan nilai akurasi 44 mm secara horizontal dan 68 mm secara vertikal (Barry dan Coakley 2013). Penggantian metode konvensional Total Station dengan teknologi fotogrametri PUNA menggunakan GCP untuk proyek infrastruktur jalan menunjukkan hasil kesalahan elevasi sebesar 1,9 cm pada GCP (Eyoh, Ubom and Ekpa 2019).

Dari berbagai penelitian terdahulu yang membahas survei fotogrametri yang sudah dilaksanakan masih sedikit referensi yang membahas perbandingan wahana PUNA yang digunakan dari segi produktivitas dan akurasi, khususnya dalam industri konstruksi. Tantangan proyek konstruksi jalan dan jembatan umumnya memiliki lahan yang memanjang sehingga membutuhkan waktu yang lama dalam pengambilan data. Tidak jarang terdapat lokasi-lokasi yang kurang aman jika menggunakan metode terestris untuk menjangkau lokasi dengan medan yang terjal dan ekstrem. Dengan adanya kemajuan dan kecepatan informasi dalam internet, banyak pilot PUNA ataupun data prosesor sebagai praktisi dalam implementasi survei fotogrametri dalam berbagai keperluan, termasuk dalam industri konstruksi.

Peraturan terkait penggunaan survei fotogrametri dalam bidang konstruksi berdasarkan Peraturan Menteri PUPR Nomor 22 Tahun 2018 (DJBK 2021) tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara diperjelas melalui Surat Edaran Nomor

25.1/SE/Db/2023 (DJBM 2023) tentang Pedoman Implementasi BIM pada Lingkup Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan di Direktorat Jenderal Bina Marga dalam kegiatan *reality capture* secara periodik untuk mendapatkan kondisi lapangan menggunakan fotogrametri atau laser *scan*. Sedangkan regulasi terkait pedoman uji akurasi hasil survei fotogrametri mengacu pada Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 (Peraturan Badan Informasi Geospasial 2018) merevisi Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 (Kepala Badan Informasi Geospasial 2014) tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.

Penelitian ini memiliki batasan masalah lokasi studi kasus penelitian dan wahana survei. Lokasi penelitian dilakukan pada 31 Januari 2023 pada lokasi STA 30+000 Proyek Jalan Tol Cimanggis-Cibitung Seksi 2 dengan progress pekerjaan 95%. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan akurasi dan produktivitas tiga jenis PUNA yang berbeda dalam aplikasi fotogrametri. Tiga PUNA yang digunakan adalah WingtraOne Gen II, DJI Phantom 4 Pro, dan DJI Mavic 3 Enterprise. Metode *geotagging* yang digunakan adalah metode GCP (*Ground Control Point*) dan/atau PPK (*Post Processing Kinematic*). Melalui penelitian ini, akan dilakukan evaluasi kinerja relatif dari setiap PUNA dalam menghasilkan data fotogrametri yang akurat, serta membandingkan efisiensi dan produktivitasnya dalam pemetaan area tertentu. Penggunaan teknologi PUNA juga dapat mengukur volume pekerjaan secara akurat dapat membantu manajemen proyek dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan pengambilan keputusan yang lebih baik. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan wawasan yang berharga dalam pemilihan dan penggunaan PUNA untuk aplikasi fotogrametri pada proyek jalan.

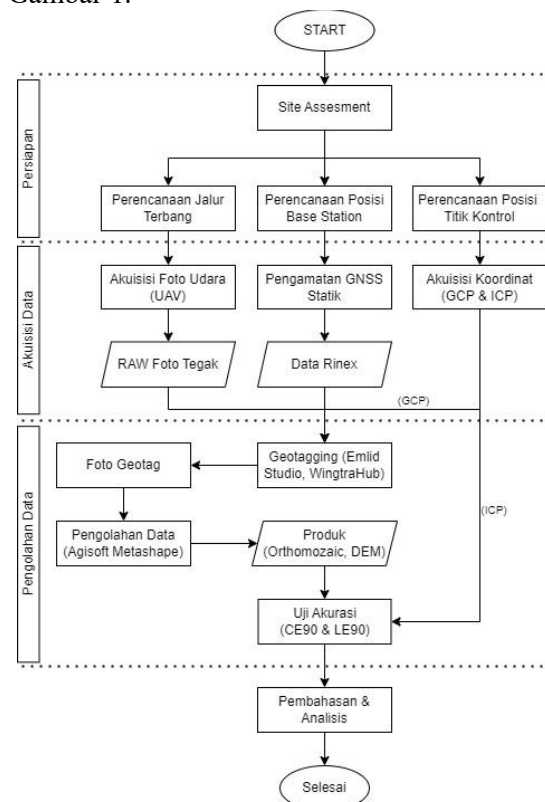
## HIPOTESIS

PUNA jenis *fixed-wing* memiliki spesifikasi yang relatif lebih unggul daripada jenis PUNA lainnya, yang kemungkinan besar akan menghasilkan akurasi dan produktivitas yang lebih tinggi dalam konteks pemanfaatan PUNA pada proyek-proyek pembangunan jalan dan jembatan.

## METODOLOGI

Penelitian diawali dengan kajian literatur yang relevan untuk memahami tren dan konsep terkini dalam teknologi PUNA secara umum dan dalam lingkup industri konstruksi. Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data primer melalui survei fotogrametri dengan menggunakan tiga jenis wahana PUNA yang berbeda. Data yang terkumpul kemudian diolah dan dianalisis hasil produk dari setiap wahana PUNA yang berupa produktivitas dan uji akurasi. Hasil analisis dari setiap wahana dibandingkan sebelum dilakukan pembahasan dan analisis penelitian. Terakhir, penarikan kesimpulan berupa rekomendasi pemilihan PUNA berdasarkan akurasi dan produktivitas yang sesuai dengan kebutuhan pada proyek jalan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

Penelitian komparasi PUNA untuk survei fotogrametri yang merupakan bagian dari implementasi *digital construction* dilakukan dengan empat pekerjaan utama untuk mencapai kesimpulan, yaitu (1) persiapan; (2) akuisisi; (3) pengolahan data foto udara; dan (4) perhitungan akurasi vertikal dan horizontal pada produk foto udara. Uraian langkah-langkah dalam pelaksanaan survei fotogrametri dijelaskan pada Gambar 1.

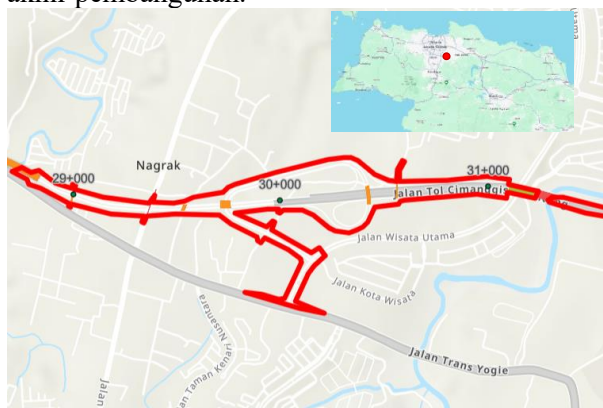


Gambar 1. Alur kerja survei fotogrametri

## Persiapan

Dalam upaya memastikan kelancaran penelitian, diperlukan serangkaian langkah persiapan yang memiliki peran krusial dalam menentukan kualitas hasil serta pencapaian tujuan penelitian. Langkah-langkah persiapan tersebut mencakup beberapa aspek penting yang secara signifikan akan memengaruhi proses dan hasil penelitian. Di antaranya adalah penentuan titik terbang dan titik acuan yang tepat, pemilihan alat *Global Navigation Satellite System* (GNSS) yang sesuai untuk memastikan akurasi geospasial data, serta pemilihan wahana PUNA yang memiliki kapabilitas dan spesifikasi yang cocok dengan kebutuhan survei. Selain itu, persiapan *marker* sebagai titik kontrol atau titik uji juga merupakan langkah penting dalam memastikan kualitas data yang diperoleh dari survei fotogrametri. Dengan melaksanakan persiapan ini secara cermat, diharapkan penelitian akan berjalan dengan lancar dan menghasilkan data yang akurat serta dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut.

Pelaksanaan penelitian di lokasi Proyek Pembangunan Jalan Tol Cimanggis-Cibitung Seksi 2, yang berlokasi di Kabupaten Bogor, Jawa Barat (Gambar 2). Lokasi penelitian mencakup segmen jalan tol sepanjang 1,6 kilometer, yang terletak di antara STA 29+500 hingga 31+100. Luas area yang menjadi fokus penelitian ini mencapai sekitar 35 hektar. Kondisi lokasi penelitian tersebut merupakan bagian dari proyek jalan tol yang terletak di simpang susun, dengan mayoritas lahan yang terbuka. Proyek tersebut hampir selesai, tetapi belum beroperasi pada saat penelitian dilakukan. Dengan demikian, lokasi penelitian memberikan gambaran yang representatif tentang kondisi aktual proyek konstruksi jalan tol dalam tahap akhir pembangunan.



**Gambar 2.** Lokasi Penelitian

*Base station* dalam penelitian ini menggunakan GNSS Trimble R8s yang ditempatkan di titik *Bench Mark* (BM) dengan nilai koordinat yang digunakan dalam proses konstruksi (Gambar 3). Dalam survei fotogrametri, *base station* memiliki peran penting sebagai titik kontrol yang menyediakan referensi koordinat yang akurat, yang sangat penting untuk memastikan kualitas hasil pemetaan, baik itu melalui penggunaan koreksi diferensial GNSS maupun dalam mode *Real-Time Kinematic* (RTK). GNSS Trimble R8s memiliki konfigurasi dual frekuensi untuk *base* dan *rover*. Dalam spesifikasi alat menunjukkan dalam penggunaan mode PPK (*Post-Processing Kinematic*) mempunyai presisi survei horizontal mencapai 8 mm + 1 ppm RMS, sedangkan untuk survei vertikal mencapai 15mm + 1 ppm RMS. Sedangkan dalam mode RTK presisi horizontal mencapai 8mm + 0,5 ppm RMS, sementara presisi vertikal mencapai 15mm + 0,5 ppm RMS. Waktu inisialisasi biasanya kurang dari 8 detik, dengan reliabilitas inisialisasi lebih dari 99,9%.






**Gambar 3.** GNSS Trimble R8s

PUNA yang digunakan untuk akuisisi data fotogrametri dipilih berdasarkan kebiasaan penggunaan dalam proyek konstruksi jalan serta kemampuan dengan keunggulan masing-masing.

DJI Phantom 4 Pro, DJI Mavic 3 Enterprise, dan WingtraOne Gen II dipilih karena popularitas dan reputasi yang baik dalam industri konstruksi. Setiap PUNA memiliki keunggulan tersendiri, seperti kemudahan penggunaan, harga, akurasi, dan fitur-fitur tambahan yang relevan. Informasi terperinci mengenai spesifikasi dan keunggulan setiap PUNA akan disajikan dalam Tabel 1. Dengan menggunakan kombinasi PUNA yang beragam ini, diharapkan dapat mencakup berbagai aspek survei fotogrametri yang diperlukan dalam penelitian ini dengan hasil yang optimal.

**Tabel 1.** Spesifikasi PUNA yang dibandingkan

PUNA	DJI Phantom 4 Pro	DJI Mavic 3 Enterprise	WingtraOne
<i>Wahana</i>			
<i>Dimensi (mm)</i>	250x250x200	347.5x283x107.7	1.250x68x12
<i>Berat (gr)</i>	468	1.050	3.700
<i>Flight Time (min)</i>	15	30	36
<i>Flight Speed (m/s)</i>	10	15	16
<i>Max Flight Distance (km)</i>	14	32	10
<i>GNSS</i>	GPS+GLONASS	GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS	GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou
<i>Kamera</i>	1-inch CMOS 20MP	4/3 CMOS Wide Camera 20MP	SONY RX1R II 42MP
<i>Akurasi untuk Pemetaan</i>	H: ±0.3 m; V: ±0.5 m (GNSS)	H: ±0.5 m; V: ±0.5 m (GNSS) H: ±0.1 m; V: ±0.1 m (RTK) H: 1 cm + 1ppm; V: 1.5 cm + 1ppm (RTK Fix)	3-5 m (tanpa PPK dan/atau GCP) H: 1 cm; V: 3 cm (PPK)
<i>GSD – 100m (cm/px)</i>	2.73	2.69	1.30
<i>Luas Area per flight (Ha)</i>	20	70	100
<i>Metode Geotag</i>	Navigasi atau GCP	RTK atau PPK	PPK

Titik referensi lapangan (*premark*) yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai *Ground Control Points* (GCP) dan *Independent Check Points* (ICP) dalam pengujian akurasi dari produk survei fotogrametri. *Premark* tersebut ditempatkan secara merata di seluruh area penelitian untuk memastikan representasi yang baik dari keseluruhan lokasi. *Premark* yang digunakan dibuat dengan menggunakan cat berwarna terang yang membentuk tanda plus (+) dengan ukuran 1 meter. Desain ini dipilih untuk memudahkan interpretasi dan identifikasi *premark* dalam proses pengolahan data dan analisis uji akurasi.

### Akuisisi Data Foto Udara

Rangkaian akuisisi data foto udara dalam survei fotogrametri meliputi pengukuran nilai koordinat dan elevasi titik *premark* menggunakan GNSS RTK Radio, pengamatan

GNSS *Static* pada titik *Bench Mark* untuk pengolahan data PPK, dan akuisisi data fotogrametri menggunakan 3 wahana PUNA dalam penelitian.

Pengukuran nilai koordinat dan elevasi pada titik *premark* menggunakan GNSS dengan metode RTK Radio. Metode ini memanfaatkan sinyal radio untuk mentransfer koreksi nilai pengukuran dari *base station* yang didirikan BM proyek ke GNSS Rover. Jumlah *premark* yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada standar SNI 8202:2019 (BSN 2019) tentang Ketelitian Peta Dasar, yang berisi syarat dan ketentuan dalam standar ketelitian peta dasar yang mencakup ketelitian geometri dan ketelitian atribut/tematik. Persebaran titik *premark* di lokasi penelitian dapat dilihat dalam Gambar 4. yang memberikan gambaran visual tentang lokasi dan distribusi titik kontrol di area proyek.



**Gambar 4.** Persebaran titik premark

*Premark* yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 15 titik. Detail dari nilai-nilai koordinat dan elevasi titik *premark* diuraikan dalam Tabel 2, yang digunakan untuk

titik kontrol pengolahan data sebagai GCP dan perhitungan nilai uji akurasi sebagai ICP dalam survei fotogrametri.

**Tabel 2.** Nilai koordinat dan elevasi premark

No.	X	Y	Z	Kode
1.	714782.279	714782.279	76.644	GCP_10L
2.	714785.397	714785.404	76.788	GCP_10R
3.	714912.021	714912.066	77.825	GCP_11L
4.	714914.496	714914.498	77.810	GCP_11R
5.	715157.834	715157.826	73.216	GCP_12L
6.	715160.122	715160.137	73.044	GCP_12R
7.	715406.861	715406.861	67.293	GCP_13L
8.	715656.525	715656.561	63.559	GCP_14L
9.	715643.369	715643.381	71.804	GCP_15L
10.	715628.398	715628.398	71.377	GCP_15R
11.	715855.989	715856.013	61.307	GCP_16L
12.	715858.408	715858.421	61.558	GCP_16R
13.	716106.875	716106.890	54.144	GCP_17L
14.	716107.823	716107.838	53.931	GCP_17R
15.	715447.932	715447.965	67.783	GCP_15C

Tahap selanjutnya adalah pengamatan GNSS metode *static* dengan interval 1 detik sebagai *base station*. *Base station* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai koordinat (X;Y;Z) 715834,570; 9293860,462; 69,686 dengan ilustrasi posisi dengan bentuk segitiga berwarna oranye seperti dalam Gambar 6. Titik pengamatan *base* GNSS, perlu mempertimbangkan jarak cakupan dengan titik terluar lokasi survei fotogrametri. Hal ini penting agar sinyal GNSS mencakup area proyek konstruksi secara keseluruhan sehingga

data yang diperoleh dari PUNA dapat dikoreksi secara lengkap.

Pengamatan GNSS dilaksanakan 15 menit sebelum waktu pengambilan data fotogrametri menggunakan PUNA. Untuk memastikan bahwa perangkat GNSS mencapai tingkat akurasi yang stabil sebelum memulai pengambilan data udara oleh PUNA agar setiap foto mendapatkan nilai koreksi yang akurat sesuai dengan referensi dari nilai BM proyek.

Selanjutnya, sebelum membuat rencana terbang, dilakukan impor data AOI (*Area of*

Interest) ke dalam perangkat remot setiap wahana. Hal ini bertujuan untuk memudahkan dalam menentukan batasan area objek survei yang ingin dipetakan. Informasi detail rencana terbang dari setiap wahana mencakup beberapa parameter penting seperti durasi terbang, tinggi

terbang, *sidelap*, *overlap*, nilai GSD, dan sebagainya. Gambar 5 menampilkan hasil tangkapan layar dari *remote control* setiap wahana, yang menggambarkan rencana terbang yang telah disiapkan sebelum terbang.



Jalur terbang DJI Phantom 4 pro



Jalur terbang DJI Mavic 3 Enterprise



Jalur terbang WingtraOne Gen II

**Gambar 5.** Tangkapan layar remot rencana jalur terbang dari 3 PUNA

Hasil data mentah yang diperoleh dari setiap PUNA memberikan gambaran awal tentang kualitas foto yang dihasilkan oleh setiap wahana. Pada Gambar 6, terlihat bahwa foto dari PUNA WingtraOne Gen II memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan dua PUNA lainnya, yaitu DJI Phantom 4 Pro dan DJI Mavic 3 Enterprise. Kualitas foto dari WingtraOne Gen II memiliki ketajaman detail dan kejernihan gambar yang lebih tinggi, serta minimnya distorsi atau gangguan visual lainnya.



**Gambar 6.** Kualitas data mentah foto dari 3 PUNA: Phantom 4 Pro; Mavic 3E; WingtraOne Gen II

Data mentah akuisisi dari setiap wahana kemudian diuraikan dalam Tabel 3. Tabel tersebut memberikan gambaran yang komprehensif tentang parameter-parameter akuisisi data yang digunakan oleh setiap wahana, serta hasil yang diperoleh dari proses akuisisi tersebut.

**Tabel 3.** Informasi data mentah dari 3 PUNA

PUNA	DJI Phantom 4 Pro	DJI Mavic 3 Enterprise	WingtraOne
<b>Jumlah Misi Terbang</b>	2	1	1
<b>Jumlah Foto</b>	223	340	223
<b>Durasi Terbang</b>	24 menit	12 menit	27 menit
<b>Tinggi Terbang</b>	100 m	100 m	120 m
<b>Sidelap</b>	70%	70%	70%
<b>Overlap</b>	70%	70%	70%
<b>GSD</b>	2.73 cm/px	2.69 cm/px	1.6 cm/px
<b>Luas Area/misi terbang</b>	20 ha	35 ha	77.19 ha

## Pengolahan Fotogrametri

Proses pengolahan fotogrametri meliputi beberapa tahapan, yaitu konversi data mentah pengamatan GNSS, *geotagging*, dan pengolahan menggunakan perangkat lunak. Data pengamatan GNSS dikonversi ke format *RINEX (The Receiver Independent Exchange Format)* sebagai langkah pertama dalam pengolahan data fotogrametri, kemudian data tersebut digunakan untuk melakukan koreksi posisi foto udara dari PUNA. Setelah *geotagging* selesai, data foto tersebut diproses menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape untuk menghasilkan produk akhir berupa *orthomosaic* (ortofoto) dan *Digital Elevation Model (DEM)*.

Tahap *geotagging* adalah proses penambahan informasi posisi dan elevasi pada foto dalam bentuk koordinat dan elevasi yang diperoleh dari pengamatan GNSS. *Geotagging* berpengaruh terhadap tingkat akurasi produk fotogrametri yang dihasilkan. Terdapat 3 metode *geotagging* pada fotogrametri yaitu metode *Ground Control Point (GCP)*, metode *Real-Time Kinematic (RTK)*, dan metode *Post-Processing Kinematic (PPK)*.




Metode GCP (*Ground Control Point*) merupakan teknik *geotagging* yang melibatkan penggunaan titik-titik acuan di permukaan bumi dengan koordinat yang diketahui secara akurat. Titik-titik acuan ini berperan sebagai referensi koordinat dan elevasi yang digunakan untuk meningkatkan akurasi dalam proses pengolahan fotogrametri. Metode GCP dilaksanakan saat proses pengolahan data di perangkat lunak survei fotogrametri.

Metode RTK (*Real-Time Kinematic*) adalah teknik yang digunakan dalam *geotagging* untuk memberikan koreksi posisi secara *real-time* terhadap data GNSS yang terdapat di wahana PUNA. Dalam metode ini, data posisi yang diterima oleh perangkat GNSS pada PUNA dikoreksi secara langsung dengan menggunakan informasi yang diperoleh dari stasiun referensi yang terdekat secara *real-time*. Penting untuk dicatat bahwa selama proses akuisisi, PUNA harus tetap terkoneksi dengan *ground station* agar hasil yang dihasilkan mempertahankan tingkat akurasi. Dengan menggunakan metode RTK, data mentah foto dapat langsung diolah dalam perangkat lunak survei fotogrametri karena telah terkoreksi saat pengambilan data.

Metode PPK (*Post Processing Kinematic*) adalah teknik pemrosesan data dalam *geotagging* yang dilakukan setelah data GNSS direkam selama proses pengumpulan data. Dalam metode ini, data posisi yang direkam oleh perangkat GNSS pada PUNA dan *base station* diproses lebih lanjut setelah selesai pengumpulan data untuk mendapatkan informasi posisi citra atau foto.

Penelitian ini menggunakan metode *geotagging* GCP, PPK dan kombinasi GCP dengan PPK yang diuraikan dalam Tabel 4. Metode *geotagging* GCP digunakan dalam PUNA DJI Phantom Phantom 4 Pro dengan 3 GCP, WingtraOne Gen II menggunakan metode *geotagging* PPK tanpa GCP, sedangkan PUNA DJI Mavic 3 Enterprise menggunakan metode kombinasi GCP dan PPK dengan 3 GCP.

**Tabel 4.** Metode *geotagging*.

UAV	 DJI Phantom 4 Pro V2	 DJI Mavic 3 Enterprise	 WingtraOne Gen II
Metode <i>Geotagging</i>	GCP	PPK + GCP	PPK
Jumlah GCP	3	13	0
Jumlah ICP	12	12	15

Data foto mentah yang telah dilakukan *geotagging* yang telah diperoleh dari ketiga PUNA akan diolah menggunakan perangkat lunak survei fotogrametri. Beberapa perangkat lunak yang umum digunakan dalam survei fotogrametri antara lain Pix4D, ContextCapture, Agisoft Metashape, dan perangkat lunak lainnya. Dalam penelitian ini, data foto yang telah di-*geotagging* dari ketiga PUNA akan diolah menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape dengan parameter pengolahan yang sama. Penggunaan parameter yang sama dipilih dengan tujuan agar perbandingan produk hasil dari setiap PUNA dapat dilakukan secara objektif dan adil.

Dengan harapan hasil pengolahan data dari ketiga PUNA akan dapat dibandingkan dengan akurat untuk mendapatkan pemahaman yang mendalam mengenai akurasi dan kualitas produk survei fotogrametri yang dihasilkan oleh setiap wahana PUNA.

Setelah data diolah, laporan produk survei fotogrametri dibuat dalam format peta yang mencakup data *orthomosaic* dan *Digital Elevation Model (DEM)*. Peta memberikan gambaran visual komprehensif tentang area survei, menampilkan detail seperti struktur jalan, topografi, dan kontur permukaan bumi.



Informasi yang disajikan dalam laporan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dan perencanaan lanjutan dalam proyek konstruksi jalan dan jembatan.

### Perhitungan Akurasi Produk Fotogrametri

Dalam penelitian ini, penulis menghitung akurasi produk fotogrametri berdasarkan Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 yang merevisi Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial

Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknik Ketelitian Peta Dasar. Ketentuan untuk standar ketelitian geometri Peta RBI (Rupabumi Indonesia) dapat dilihat pada Tabel 5. Analisis akurasi posisi menggunakan RMSE (*Root Mean Square Error*) yang menggambarkan nilai perbedaan antara titik uji dan titik sebenarnya. Nilai CE90 dan LE90 diperoleh dengan rumus mengacu pada standar US NMAS (*United States National Map Accuracy Standards*).

**Tabel 5.** Ketelitian Geometri Peta RBI

No.	Skala	Inteval Kontur (m)	Keteletian Peta RNI					
			Kelas 1		Kelas 2		Kelas 3	
			Horosontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horosontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horosontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)
1.	1:1.000.000	400	300	200	600	300	900,0	400
2.	1:500.000	200	150	100	300	150	450,0	200
3.	1:250.000	100	75	50	150	75	225,0	100
4.	1:100.000	40	30	20	60	30	90,0	40
5.	1:50.000	20	15	10	30	15	45,0	20
6.	1:25.000	10	7,5	5	15	7,5	22,5	10
7.	1:10.000	4	3	2	6	3	9,0	4
8.	1:5000	2	1,5	1	3	1,5	4,5	2
9.	1:2500	1	0,75	0,5	1,5	0,75	2,3	1
10.	1:1000	0.4	0,3	0,2	0,6	0,3	0,9	0,4

Penghitungan akurasi dengan cara menghitung nilai CE90 (*Circular Error 90*) sebagai ukuran ketelitian geometrik horizontal dan LE90 (*Linear Error 90*) sebagai ukuran ketelitian geometrik vertikal, menggunakan perbandingan antara nilai koordinat dan elevasi titik kontrol yang telah ditentukan pada Tabel 2 dengan nilai koordinat yang diperoleh dari produk fotogrametri (*orthomosaic* dan DEM). Jumlah titik uji akurasi atau ICP pada setiap

wahana secara terperinci diuraikan pada Tabel 4.

Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang komprehensif terhadap ketepatan dan keakuratan produk fotogrametri dalam merepresentasikan informasi spasial di lapangan. Penghitungan nilai uji akurasi secara horizontal diuraikan dalam Tabel 6, sedangkan penghitungan nilai uji akurasi vertikal diuraikan dalam Tabel 7.

**Tabel 6.** Penghitungan uji akurasi horisontal

No Titik	Nama Titik	X		D X	D X) <sup>2</sup>	Y		D Y	D Y) <sup>2</sup>	(D X) <sup>2</sup> + (D Y) <sup>2</sup>
		(Koordinat ICP)	(Koordinat Mosaik Ortofoto)			(Koordinat ICP)	(Koordinat Mosaik Ortofoto)			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	GCP_10L	714782.279	714782.279	0.000	0.000	9293843.909	9293843.909	0.000	0.000	0.000
2	GCP_10R	714785.397	714785.404	0.007	0.000	9293819.513	9293819.440	-0.073	0.005	0.005
3	GCP_11L	714912.021	714912.066	0.045	0.002	9293852.801	9293852.834	0.033	0.001	0.003
4	GCP_11R	714914.496	714914.498	0.002	0.000	9293821.550	9293821.485	-0.065	0.004	0.004
5	GCP_12L	715157.834	715157.826	-0.008	0.000	9293866.817	9293866.795	-0.022	0.000	0.001
6	GCP_12R	715160.122	715160.137	0.015	0.000	9293833.101	9293833.004	-0.097	0.009	0.010
7	GCP_13L	715406.861	715406.861	0.000	0.000	9293890.199	9293890.199	0.000	0.000	0.000
8	GCP_14L	715656.525	715656.561	0.036	0.001	9293904.113	9293904.102	-0.011	0.000	0.001
9	GCP_15L	715643.369	715643.381	0.012	0.000	9293830.575	9293830.505	-0.070	0.005	0.005
10	GCP_15R	715628.398	715628.398	0.000	0.000	9293831.829	9293831.736	-0.093	0.009	0.009
11	GCP_16L	715855.989	715856.013	0.024	0.001	9293918.685	9293918.680	-0.005	0.000	0.001
12	GCP_16R	715858.408	715858.421	0.013	0.000	9293897.961	9293897.907	-0.054	0.003	0.003
13	GCP_17L	716106.875	716106.890	0.015	0.000	9293923.931	9293923.953	0.022	0.001	0.001
14	GCP_17R	716107.823	716107.838	0.015	0.000	9293906.413	9293906.408	-0.005	0.000	0.000
15	GCP_15C	715447.932	715447.965	0.033	0.001	9294040.048	9294040.080	0.032	0.001	0.002
<b>Jumlah</b>										<b>0.045</b>
<b>Rerata</b>										<b>0.003</b>
<b>RMSE</b>										<b>0.055</b>
<b>Akurasi</b>										<b>0.083</b>

**Tabel 7.** Penghitungan uji akurasi vertikal

Nomor Titik	Nama Titik	Z (Koordinat ICP)	Z (Koordinat DSM)	(D Z)	(D Z) <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F
1	GCP_10L	76.644	76.650	0.006	0.000
2	GCP_10R	76.788	76.792	0.004	0.000
3	GCP_11L	77.825	77.815	-0.010	0.000
4	GCP_11R	77.81	77.803	-0.007	0.000
5	GCP_12L	73.216	73.215	-0.001	0.000
6	GCP_12R	73.044	73.048	0.004	0.000
7	GCP_13L	67.293	67.280	-0.013	0.000
8	GCP_14L	63.559	63.599	0.040	0.002
9	GCP_15L	71.804	71.813	0.009	0.000
10	GCP_15R	71.377	71.384	0.007	0.000
11	GCP_16L	61.307	61.372	0.065	0.004
12	GCP_16R	61.558	61.611	0.053	0.003
13	GCP_17L	54.144	54.233	0.089	0.008
14	GCP_17R	53.931	54.016	0.085	0.007
15	GCP_15C	67.783	67.793	0.010	0.000
<b>Jumlah</b>					0.024
<b>Rerata</b>					0.002
<b>RMSE</b>					0.040
<b>Akurasi</b>					0.067

## HASIL DAN ANALISIS

### Produktivitas

Dalam perbandingan antara tiga jenis PUNA yang berbeda, yaitu DJI Phantom 4 Pro V2, DJI Mavic 3 Enterprise, dan WingtraOne Gen II, terdapat perbedaan yang mencolok dalam durasi terbang dan produktivitasnya yang ditampilkan di Tabel 7. Detail DJI Phantom 4 Pro V2 memiliki durasi terbang yang mencapai 24 menit, dengan kemampuan mencakup area sebesar 20 hektar dalam satu misi terbang sehingga menghasilkan produktivitas sekitar 0,83 hektar per menit. Sementara itu, DJI Mavic 3 Enterprise memiliki durasi terbang 12 menit, namun mampu mencakup area yang lebih luas, yakni 35 hektar, yang berarti memiliki produktivitas sekitar 2,92 hektar per menit. Di sisi lain, WingtraOne Gen II menampilkan rasio produktivitas tidak jauh berbeda dengan DJI Mavic 3 Enterprise dengan durasi terbang 27 menit dan kemampuan mencakup area sebesar 77,19 hektar, menghasilkan produktivitas sekitar 2,86 hektar per menit.

Dengan demikian, pemilihan PUNA akan sangat bergantung pada kebutuhan spesifik misi

termasuk kualitas dan akurasi data, dengan pertimbangan antara durasi terbang dan luas area yang dapat dicakup dalam menyelesaikan keseluruhan misi terbang pada proyek jalan.

### Uji Akurasi

Hasil uji akurasi akurasi horizontal dan vertikal dari ketiga wahana PUNA diuraikan dalam Tabel 7. Phantom 4 Pro v2 menggunakan metode *geotagging* GCP menghasilkan akurasi horizontal sebesar 0,61 meter dan akurasi vertikal sebesar 1,56 meter. Dengan demikian, produk dari Phantom 4 Pro v2 memenuhi standar kelas 3 Skala 1:5.000 mengacu pada PerBIG Nomor 6 Tahun 2018. Sementara itu, DJI Mavic 3 Enterprise menggunakan metode *geotagging* PPK dan GCP menghasilkan akurasi horizontal sebesar 0,09 meter dan akurasi vertikal sebesar 0,11 meter. Produk dari DJI Mavic 3 Enterprise juga memenuhi standar kelas 1 Skala 1:1.000. Selanjutnya, WingtraOne Gen II menggunakan metode *geotagging* PPK menghasilkan akurasi horizontal sebesar 0,08 meter dan akurasi vertikal sebesar 0,07 meter.

Dengan hasil ketelitian tersebut, produk dari WingtraOne Gen II juga memenuhi standar kelas 1 skala 1:1.000.

Dari hasil ini terdapat dua wahana yang mampu menghasilkan produk dengan akurasi kelas 1 skala 1:1.000, yaitu WingtraOne Gen II dan DJI Mavic 3 Enterprise. Sementara itu, wahana PUNA DJI Phantom 4 Pro v2 membutuhkan pengolahan ulang dengan menambahkan GCP menjadi 6 titik untuk memenuhi standar kelas 1 skala 1:1.000 ( $CE_{90}=0,15$  meter dan  $LE_{90}=0,22$  meter).

Hal tersebut menunjukkan keandalan dan kualitas dari ketiga wahana tersebut untuk memenuhi standar tertinggi dari PerBIG Nomor 6 Tahun 2018.

**Tabel 8.** Perbandingan produktivitas dan hasil uji akurasi

PUNA	DJI Phantom 4 Pro V2	DJI Mavic 3 Enterprise	WingtraOne Gen II
Produktivitas (ha/menit)	0,83	2,92	2,86
CE 90% (meter)	0,61	0,09	0,08
LE 90% (meter)	1,56	0,11	0,07
Kelas Peta	Kelas 3, Skala 1:5.000	Kelas 1, Skala 1:1.000	Kelas 1, Skala 1:1.000

## PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini dilakukan perbandingan antara 3 jenis PUNA untuk survei fotogrametri di proyek jalan. Fokus utama penelitian adalah produktivitas dan akurasi dari PUNA yang dievaluasi. Setelah melakukan analisis terhadap beberapa faktor utama, dapat direkomendasikan bahwa PUNA yang portabel dan mempunyai kemampuan untuk metode *geotagging* PPK dan/atau RTK adalah PUNA yang paling sesuai untuk proyek jalan. Dengan pertimbangan dari portabilitas, tampilan antarmuka, serta metode *geotagging*.

### Portabilitas

Dalam konteks proyek jalan yang memanjang dan mungkin memiliki keterbatasan jalan akses, portabilitas menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan PUNA. PUNA dengan dimensinya yang ringkas dan desain yang mudah dibawa, memungkinkan mobilitas yang lebih fleksibel di sepanjang proyek jalan yang panjang. Dengan dimensi yang ringkas, PUNA

jenis ini dapat dengan mudah dipindahkan dari satu lokasi survei ke lokasi survei lainnya tanpa memerlukan banyak waktu dan upaya. Di sisi lain, meskipun memiliki dimensi yang lebih besar, PUNA *fixed-wing* memiliki radius terbang yang lebih luas dan akurasi yang tinggi. Oleh karena itu, PUNA jenis ini lebih cocok untuk digunakan pada fase awal konstruksi di mana lahan belum terbuka dengan keterbatasan jalan akses. Dengan jangkauan terbang yang lebih luas, PUNA *fixed-wing* dapat mencakup area survei yang lebih besar dengan akurasi yang tinggi, yang penting untuk kebutuhan perhitungan volume yang akurat. Dengan demikian, pemilihan PUNA tergantung pada kondisi spesifik proyek dan kebutuhan mobilitas serta akurasi.

### Tampilan antarmuka

Tampilan antarmuka meliputi *user interface* (UI) dan *user experience* (UX) produk yang sudah familier dan banyak digunakan di pasar menawarkan keunggulan yang signifikan. Pengguna yang sudah banyak ditemukan di industri konstruksi akan merasa lebih nyaman dan terbiasa dengan tampilan antarmuka yang telah mereka kenal sebelumnya. Dengan demikian, pengguna dengan cepat beradaptasi tanpa memerlukan waktu yang lama untuk mempelajari tampilan baru. Familiaritas ini memungkinkan pengguna untuk langsung fokus pada tugas survei dan analisis, meningkatkan efisiensi dan produktivitas dalam penggunaan PUNA untuk proyek konstruksi jalan. Dengan demikian, keberadaan tampilan antarmuka yang familier menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan PUNA untuk memastikan adaptasi yang cepat dan efektif oleh pengguna di lapangan.

### Metode *geotagging*

PUNA akan lebih efisien jika memiliki kemampuan metode *geotagging* yang lengkap, meliputi *Post Processing Kinematic* (PPK), *Real-Time Kinematic* (RTK), dan kombinasi PPK dengan *Ground Control Points* (GCP) atau RTK dengan GCP. Hal ini memungkinkan untuk melakukan pemetaan dengan tingkat akurasi yang tinggi tanpa memerlukan personel tambahan untuk pemasangan dan pengukuran titik kontrol (GCP). Sebagai perbandingan, DJI Phantom 4 Pro hanya mendukung metode *geotagging* menggunakan GCP, sementara WingtraOne hanya dapat melakukan *geotagging*

menggunakan metode PPK dan kombinasi PPK dengan GCP. Kemampuan DJI Mavic 3 Enterprise (+RTK) dalam mengadopsi berbagai metode *geotagging* GCP, RTK dan PPK memberikan fleksibilitas yang lebih besar dan memungkinkan untuk meningkatkan akurasi data yang diperoleh dalam survei fotogrametri. Hal ini tidak hanya menghemat waktu dan tenaga, tetapi juga meminimalkan biaya tambahan yang terkait dengan pelaksanaan proyek survei.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dengan batasan studi kasus yang digunakan, diperoleh hasil akurasi terbaik 0,08 m secara horizontal dan 0,07 m secara vertikal dari wahana WingtraOne Gen II metode PPK, sedangkan hasil perbandingan produktivitas terbaik didapatkan DJI Mavic 3 Enterprise RTK dengan produktivitas 2,90 ha/min.

Berdasarkan hasil akurasi dan produktivitas yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa PUNA dengan portabilitas dan kemampuan *geotagging* yang lengkap adalah pilihan terbaik untuk digunakan dalam survei fotogrametri pada fase konstruksi proyek jalan. PUNA ini memiliki keseimbangan yang baik dalam berbagai aspek, meliputi portabilitas yang baik, antarmuka pengguna yang familier, dan metode *geotagging* yang lengkap sehingga memberikan solusi yang efisien dan efektif dalam survei fotogrametri yang akurat untuk mencapai keberhasilan proyek konstruksi jalan dengan koridor memanjang.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya. Pertama, dengan batasan studi kasus yang dilaksanakan pada medan yang relatif rata dan kondisi terbuka, dapat dilakukan penelitian lanjutan pada lokasi studi kasus lain agar menambah referensi pengujian akurasi dan produktivitas PUNA. Kedua, penggunaan titik kontrol dan titik uji yang tereferensi dengan titik *base*. Untuk meningkatkan akurasi dan konsistensi data yang diperoleh dari survei fotogrametri, disarankan untuk menggunakan titik kontrol dan titik uji yang nilainya tereferensi dengan *bench mark* (BM) yang digunakan sebagai titik referensi saat

akuisisi data. Hal ini akan membantu memastikan bahwa data yang dihasilkan dapat diandalkan untuk analisis lanjutan dan pengambilan keputusan yang akurat dalam proyek konstruksi jalan. Ketiga, melakukan akuisisi data dengan misi terbang dan titik terbang yang sama. Penting untuk memastikan konsistensi dalam akuisisi data dengan menjaga kesamaan dalam misi terbang dan titik terbang. Dengan melakukan kedua misi ini dengan parameter yang sama, seperti ketinggian penerbangan dan jarak *overlap*, akan memastikan konsistensi dalam cakupan area dan resolusi gambar yang diperoleh dari setiap misi, yang pada gilirannya akan meningkatkan kualitas dan akurasi hasil survei.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan naskah dan kontribusi dalam penelitian ini. Terima kasih kepada tim Digital Survey & GIS Divisi Infrastruktur II PT. Waskita Karya atas kerjasama dan dedikasi mereka dalam proses penelitian. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada tim survei Proyek Jalan Tol Cimanggis-Cibitung Seksi 2 serta seluruh tim proyek atas izin yang diberikan sebagai lokasi penelitian serta bantuan selama pengambilan data. Tanpa kerja sama dan dukungan dari semua pihak terkait, penelitian ini tidak akan terwujud. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat yang nyata dan kontribusi positif dalam pengembangan industri konstruksi. Terima kasih atas kerja sama dan dukungan yang telah diberikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Albeaino, Gilles und Masoud Gheisari. 2021. Trends, benefits, and barriers of unmanned aerial systems in the construction industry: A survey study in the united states. *Journal of Information Technology in Construction* 26 (1. März): 84–111. doi:10.36680/j.itcon.2021.006, .
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2019. Ketelitian Peta Dasar. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id).
- Barry, P und R Coakley. Accuracy of UAV Photogrammetry Compared With Network RTK GPS.
- Chen, Xichen, Alice Yan Chang-Richards, Antony Pelosi, Yaodong Jia, Xuesong Shen, Mohsin K. Siddiqui und Nan Yang. 2022. Implementation of technologies in the

- construction industry: a systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management* 29, Nr. 8 (16. August): 3181–3209. doi:10.1108/ECAM-02-2021-0172, .
- Chowdhury, Tabinda, Johnson Adafin und Suzanne Wilkinson. 2019. Review of digital technologies to improve productivity of New Zealand construction industry. *Journal of Information Technology in Construction* 24: 569–587. doi:10.36680/J.ITCON.2019.032, .
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBMM). 2021. Penerapan BIM Pada Perencanaan Teknis, Konstruksi dan Pemeliharaan Jalan dan Jembatan di Direktorat Jenderal Bina Marga (19. Juli).
- . 2023. Pedoman Implementasi Building Information Modelling (BIM) Pada Lingkup Pekerjaan Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Diamandis, Peter. 2012. *Abundance: The Future is Better Than You Think*.
- Eyoh, Aniekan, Okon Ubom und Akwaowo Ekpa. 2019. Comparative Analysis of UAV Photogrammetry and Total Station Traversing on Route Survey. *European Journal of Engineering and Technology* 7, Nr. 4. www.idpublications.org.
- Kaamin, Masiri, Siti Nooraiin Mohd Razali, Nor Farah Atiqah Ahmad, Saifullizan Mohd Bukari, Norhayati Ngadiman, Aslila Abd Kadir und Nor Baizura Hamid. 2017. The application of micro UAV in construction project. In: *AIP Conference Proceedings*, 1891: American Institute of Physics Inc., 3. Oktober. doi:10.1063/1.5005403, .
- Kepala Badan Informasi Geospasial. 2014. Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.
- Mahajan, Gayatri. 2021. Applications of Drone Technology in Construction Industry: A Study 2012-2021. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 11, Nr. 1 (30. Oktober): 224–239. doi:10.35940/ijeat.A3165.1011121, https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v11i1/A31651011121.pdf.
- Martínez-Carricondo, Patricio, Francisco Agüera-Vega, Fernando Carvajal-Ramírez, Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Alfonso García-Ferrer und Fernando Juan Pérez-Porras. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72 (1. Oktober): 1–10. doi:10.1016/j.jag.2018.05.015, .
- Miller, C L. 1957. The Spatial Model Concept of Photogrammetry.
- Peraturan Badan Informasi Geospasial. 2018. Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.
- Rezaian, Amin. 2011. Time-Cost-Quality-Risk of Construction and Development Projects or Investment. *Middle-East Journal of Scientific Research* 10, Nr. 2: 218–223.
- Said, Hidayat, Najmi Supervisors, Nabil Dmaidid und Husam Arman. 2011. Project Management for Construction Projects.
- Tatum, Mark C. und Junshan Liu. 2017. Unmanned Aircraft System Applications in Construction. In: *Procedia Engineering*, 196:167–175. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.proeng.2017.07.187, .