



Uji Akurasi Peta Foto Tegak Menggunakan Pesawat Udara Nir Awak (PUNA) Dengan Metode *Direct Georeferencing* di Daerah Berbukit (Studi Kasus Foto Tegak di Desa Dadapan, Kecamatan Pringkuku, Kabupaten Pacitan)

Subekti Harto¹, Septa Erik Prabawa², Melisa Amalia Mahardianti³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Geomatika, Universitas Dr. Soetomo, Surabaya, Indonesia
e-mail: mr.president.sh@gmail.com

ABSTRAK. Pesawat Udara Nirawak (PUNA) wajib dalam pekerjaan Pendaftaran Tanah Sistematis Lengkap (PTSL) di Kementerian ATR-BPN. Permasalahannya ketika digunakan untuk pemotretan di daerah yang berbukit-bukit, apabila menggunakan metode konvensional akan memerlukan waktu yang lama dan biaya yang besar untuk pemasangan dan pengukuran Ground Control Point (GCP). Untuk meminimalkan pemasangan dan pengukuran GCP tersebut digunakan metode pengolahan data foto secara direct georeferencing. Lokasi penelitian dipilih daerah berbukit-bukit yang cukup ekstrim, difoto menggunakan PUNA jenis quadcopter, penentuan posisi kamera menggunakan metode Real Time Kinematik (RTK). Pada penelitian ini dilakukan analisa perbandingan terhadap data yang diolah menggunakan direct georeferencing (tanpa GCP), dan gabungan direct georeferencing ditambahkan GCP (1, 3, dan 4 GCP). Hasil pengolahan data berupa orthofoto dan digital surface model (DSM), dilakukan uji ketelitian geometrik berdasarkan SNI 8202:2019. Hasil uji ketelitian menunjukkan metode direct georeferencing layak digunakan untuk pembuatan peta foto tegak skala 1:1000 dengan interval kontur 0,4 m.

Kata kunci: gunakan huruf Garamond, 10pt, lower case; antara 4 - 8 katakunci. Kata kunci harus mereflesikan topik, subtopik, tema, desain penelitian dan konteks penelitian.

PENDAHULUAN

Penggunaan peta foto tegak hasil pemotretan menggunakan Pesawat Udara Nirawak (PUNA) pada saat ini merupakan keharusan sebagai peta dasar dalam pekerjaan Pendaftaran Tanah Sistematis Lengkap (PTSL). Penggunaan Pesawat Udara Nirawak ini dengan pertimbangan resolusinya sudah cukup bagus, pemotretan dapat dilakukan dengan luasan yang relative kecil, dan biaya yang lebih efisien dibandingkan dengan menggunakan pesawat berawak.

Penggunaan UAV untuk akuisisi data dan proses menggunakan metode Structure from Motion (SfM) photogrammetry menjadi trend untuk pembuatan ortofoto [P. E. Carbonneau and J. T. Dietrich., 2017]. Data UAV yang diolah menggunakan metode Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry dapat digunakan untuk pembuatan data tiga dimensi spasial yang resolusi tinggi dan berbiaya relatif murah [C. J. Iheaturu dkk., 2020]. Meningkatnya kapasitas komputasi di dunia komputer, metode SfM ini memberikan alternatif lain dalam pemodelan permukaan bumi, dengan konsep cepat dan murah.

Pada metode konvensional, georeferensi foto udara dilakukan dengan menggunakan Ground Control Points (GCP). Namun, kebutuhan GCP menimbulkan keterbatasan yang cukup besar dalam kegiatan pemotretan udara, karena membutuhkan waktu dan biaya yang cukup besar untuk menempatkan dan mengukur GCP sebelum misi. Tahapan georeferensing foto udara tanpa GCP dikenal sebagai direct georeferencing. Proses ini menggunakan informasi tentang posisi,

ketinggian, sensor foto dan karakteristik lensa untuk menghitung posisi titik pusat kamera pada suatu referensi koordinat [Correia., 2022]

Direct georeferencing ini membutuhkan informasi orientasi relatif antara pusat titik kamera dan GNSS. Masalah lainnya adalah bahwa produsen UAV dan perangkat lunak pengolah dapat menggunakan kerangka acuan yang berbeda sehingga menimbulkan kesulitan tambahan saat menerapkan direct georeferencing [Correia., 2022]. Perangkat dengan spesifikasi tinggi seperti dual frequency GPS receiver dan IMU kelas tinggi dapat meningkatkan akurasi hingga beberapa sentimeter. Kondisi lingkungan seperti topografi, cuaca, dan ketersediaan sinyal satelit juga berpengaruh pada akurasi

Metode direct georeferencing ini secara konsep tidak membutuhkan Ground Control Point (GCP) sebagai titik ikat. Metode ini jika menggunakan onboard positioning sensor dapat meningkatkan efisiensi pekerjaan, dan kelebihanannya dapat menjangkau daerah yang aksesnya sulit, dan hasilnya memiliki tingkat akurasi yang dapat diterima [X. Liu dkk., 2022]. Metode direct georeferencing layak digunakan untuk memetakan daerah perkotaan, dengan menggunakan minimal 1 GCP mampu menghasilkan peta skala 1:500 [López., 2022].

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Przybilla [2020] menunjukkan bahwa metode direct georeferencing membutuhkan minimal 1 GCP, jika tanpa GCP akan menghasilkan kesalahan elevasi hingga 30 kali Ground Spasial Distance (GSD). Sebaliknya jika menggunakan metode konvensional menggunakan GCP, penggunaan direct georeferencing menghasilkan akurasi posisi yang setara, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk pengumpulan dan pemrosesan data jauh lebih singkat. Metode ini dapat digunakan jika pengukuran GCP sulit dilakukan misalnya pada tebing, hutan, dan rawa [Zeybek., 2023]

Meskipun dalam spesifikasi teknis akurasi GNSS sudah disebutkan cukup teliti, tetapi penentuan posisi yang dihasilkan tidak cukup digunakan, karena posisi relatif antara GNSS dan pusat proyeksi kamera masih belum diketahui. Metode penentuan posisi dari pusat titik kamera dapat menggunakan metode Real Time Kinematik (RTK) atau Post Processed Kinematic (PPK) yang digunakan menentukan posisi teliti dari tiap ekposur foto sehingga diharapkan dapat mengurangi atau meniadakan GCP.

Tulisan ini mengkaji penggunaan direct georeferencing menggunakan penentuan posisi metode RTK. Sejauh mana penggunaan GCP jika dikombinasikan dengan direct georeferencing untuk meningkatkan akurasi. Tulisan ini juga memberikan analisis ketelitian peta orthophoto yang dihasilkan menggunakan Direct Georeferencing.

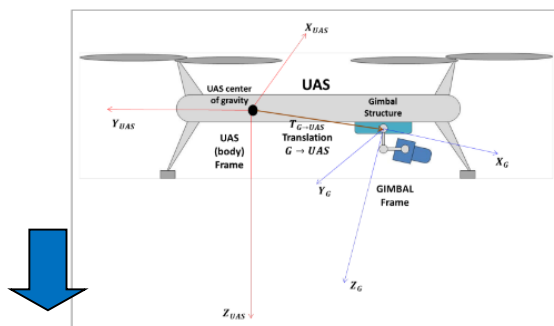
Lokasi penelitian adalah Desa Dadapan Kecamatan Pringkuku Kabupaten Pacitan yang merupakan Lokasi PTSL tahun 2024. Pemilihan lokasi ini karena mewakili daerah yang dianggap ekstrim topografinya. Elevasi berkisar mulai 0.00m sampai dengan 350 mdpl dengan kelerengan 0° s/d 90°. Topografinya secara umum berbukit-bukit dengan kelerengan yang cukup curam, sehingga jika menggunakan metode konvensional akan membutuhkan cukup banyak GCP untuk koreksi geometriknya, tentunya membutuhkan waktu dan biaya yang cukup besar.

Pengolahan data dilakukan dengan metode direct georeferencing serta kombinasi antara direct georeferencing dan GCP. Analisa akurasi horizontal dan vertikal dilakukan terhadap Independent Check Point (ICP) untuk koordinat 3D (x, y, z). Sebagai acuan hasil akurasi adalah SNI 8202 tahun 2019 dan spesifikasi teknis yang digunakan di lingkungan ATR BPN untuk pembuatan foto tegak. Manfaat yang ingin diperoleh adalah rekomendasi dalam melakukan proses orthophoto dengan menggunakan metode yang lebih efisien. Selain itu penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu referensi untuk digunakan pada pekerjaan selanjutnya.

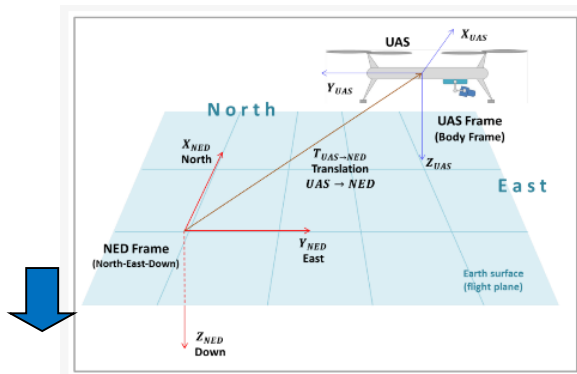
METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Direct Georeferencing* dan metode *Structure from Motion* (SfM). *Direct Georeferencing* adalah tahapan meletakkan obyek dalam suatu system referensi. Tahapan *georeferencing* diilustrasikan pada gambar 2. Secara konvensional proses ini membutuhkan titik sekutu yang diketahui koordinatnya dalam dua sistem, titik ini dalam fotogrametri disebut *Ground Control Point* (GCP). Sedangkan Proses *georeferensi* foto udara tanpa menggunakan GCP disebut *Direct Georeferencing*. Proses ini menggunakan informasi posisi, ketinggian, sensor kamera dan karekteristik lensa untuk menghitung titik pusat kamera.. [Zeybek., 2023]

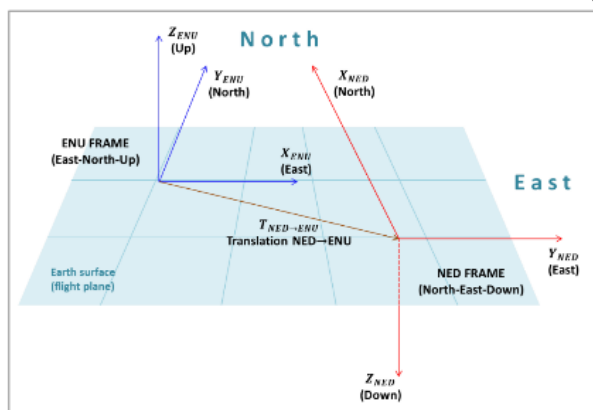
Transformasi Sistem Koordinat Gimbal ke Sistem Koordinat UAV



Transformasi Sistem Koordinat UAV ke Sistem Koordinat NED



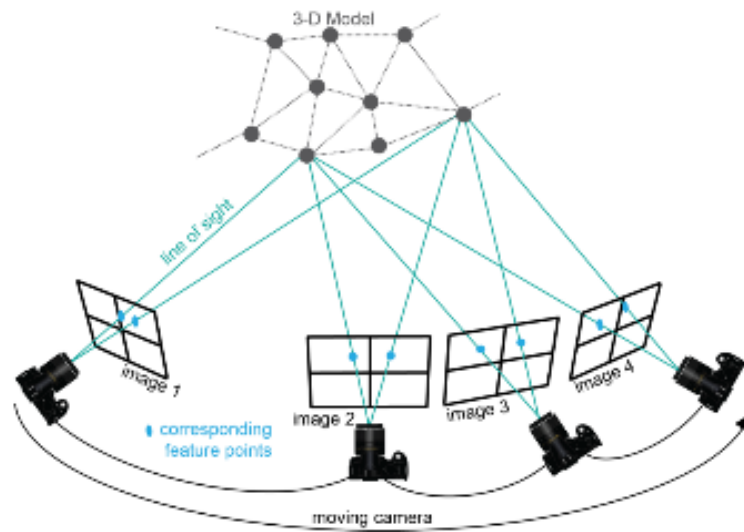
Transformasi Sistem Koordinat NED ke Sistem Koordinat ENU (Koordinat Tanah)



Gambar 1. Konsep tahapan tranformasi koordinat pada *georeferencing* (Modifikasi dari Correia et al., 2022)

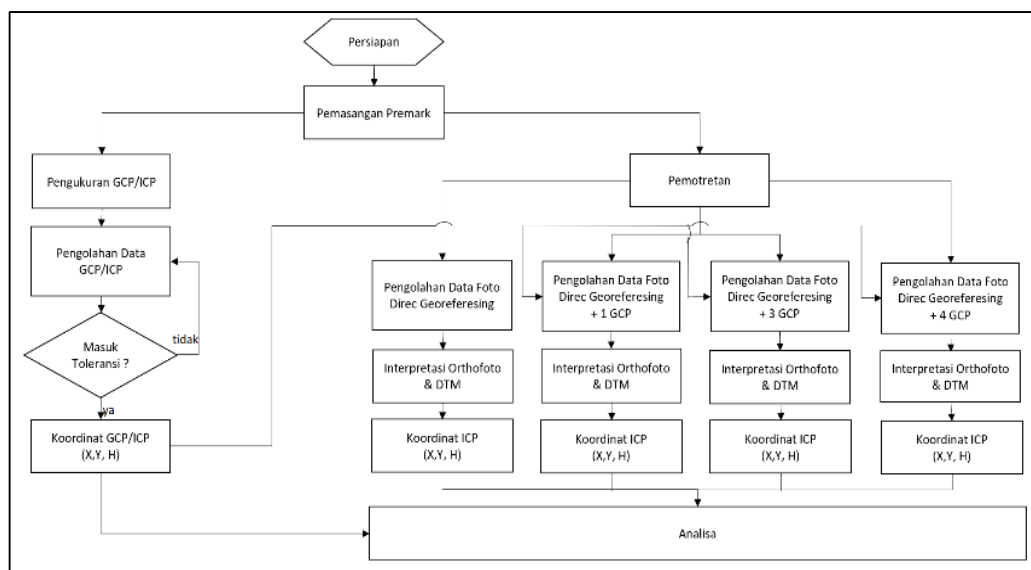
Structure from Motion (SfM), adalah suatu teknik penginderaan jauh yang menggunakan beberapa foto dari suatu objek untuk menciptakan sekumpulan titik tiga dimensi yang sesuai dengan permukaan obyek tersebut (X, Y, Z coordinates) yang dinamakan *point cloud* sesuai dengan warna RGB. [Shervais., 2023]. Setelah melakukan proses *georeferensi* terhadap *point cloud* tersebut

menggunakan titik *Ground Control Point* (GCP) data dapat diubah menjadi *Digital Elevation Model* (DEM). Prinsip dari SfM digambarkan sebagai berikut



Gambar 2. Skema metode *Structure from Motion* (SfM) [10]

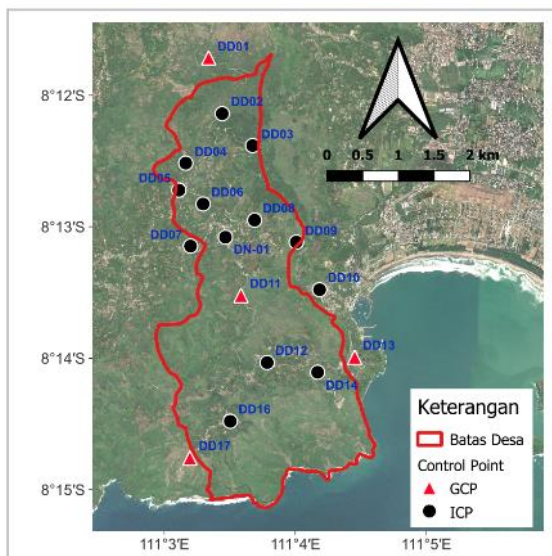
Lokasi penelitian adalah di Desa Dadapan Kecamatan Pringkuku Kabupaten Pacitan. Pemilihan Lokasi ini dianggap ideal untuk mewakili kondisi topografi yang cukup bervariasi dan berbukit-bukit. Elevasi 0.0⁰ m sampai dengan 350m dpl dan kelerengnya mulai 0° hingga di beberapa tempat mencapai 90°. Alur penelitian digambarkan sebagai berikut :



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini titik GCP/ICP diukur menggunakan GNSS metode static differential. Baseline diukur secara radial, pengamatan dilakukan selama + 30 menit. Di titik DN-01 didirikan base station (EMLID RS3) untuk pengukuran titik-titik GCP/ICP juga sekaligus secara bersamaan digunakan sebagai base station untuk koreksi terhadap UAV (DJI Mavic 3 enterprise) selama pemotretan. Koordinat base station ditentukan dari pengikatan NRTK ke jaringan InaCORS. Pemotretan dilakukan di bulan Juli 2024 overlap 80 %, sidelap 70 % dengan ketinggian 200 m. Pengolahan data GNSS hasil ukuran GCP/ICP diolah menggunakan perangkat lunak GNSS

komersial, sedangkan untuk data foto diolah menggunakan aplikasi Agisoft Metashape versi 1.8 Distribusi titik GCP/ICP adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Sebaran titik-titik GCP/ICP

Tabel 1. Koordinat GCP/ICP

No	ID	Koordinat TM3° (Zone 49.2)		Ketinggian (Ellipsoid)	Ket
		X(m)	Y(m)	H(m)	
1	DD01	40870.018	593555.069	333.181	GCP
2	DD02	41060.117	592771.940	334.189	ICP
3	DD03	41486.065	592324.494	283.027	ICP
4	DD04	40549.255	592078.850	324.909	ICP
5	DD05	40452.717	591700.040	284.227	ICP
6	DD06	40791.820	591504.789	319.293	ICP
7	DD07	40615.813	590914.619	297.510	ICP
8	DD08	41514.127	591278.491	280.553	ICP
9	DD09	42098.337	590970.660	254.888	ICP
10	DD10	42425.225	590303.020	74.609	ICP
11	DD11	41323.022	590221.399	281.694	GCP
12	DD12	41690.065	589280.681	188.927	ICP
13	DD13	42917.096	589355.241	114.689	GCP
14	DD14	42396.413	589145.546	150.881	ICP
15	DD16	41173.203	588457.461	217.583	ICP
16	DD17	40607.099	587942.932	210.067	GCP
17	DN-01	41105.397	591038.764	296.220	ICP

Pengolahan data foto dilakukan dengan empat metode *direct georeferencing* yaitu :

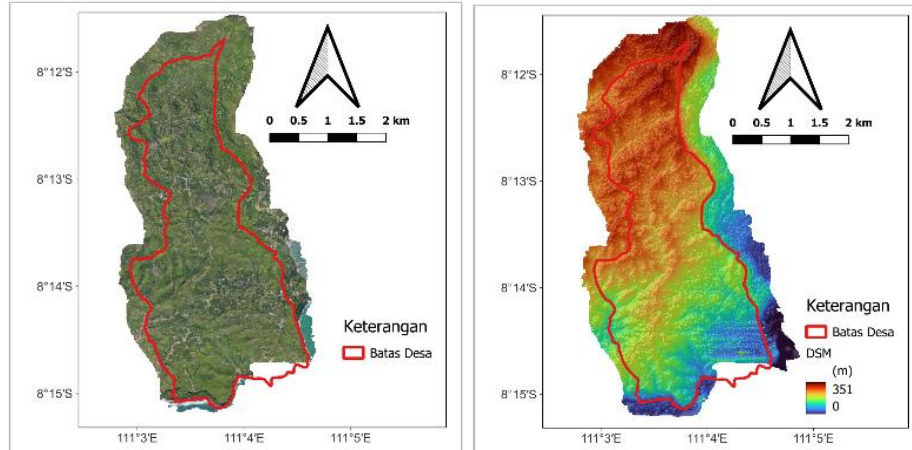
1. *Direct Georeferencing*
2. *Direct Georeferencing* + 1 GCP
3. *Direct Georeferencing* + 3 GCP
4. *Direct Georeferencing* + 4 GCP

Hasil pengolahan dari masing-masing metode dilakukan analisa perbandingan koordinat model 3D (Orthofoto dan DTM) terhadap koordinat ICP hasil pengukuran GNSS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengolahan

Hasil pengolahan pada penelitian ini berupa orthofoto dengan Ground Spasial Distance (GSD) 6,3 cm/pixel dan Digital Surface Model (DSM) dengan densitas 25,1 cm/pixel.



Gambar 7. (a) Orthofoto (b) DSM hasil pengolahan direct georeferencing

Uji Akurasi

Uji Akurasi horisontal dan vertikal dilakukan pada setiap metode yaitu :

1. Metode *direct georeferencing* (tanpa GCP)
2. Metode *direct georeferencing* + 1 GCP
3. Metode *direct georeferencing* + 3 GCP
4. Metode *direct georeferencing* + 4 GCP

Hitungan Uji akurasi berdasarkan SNI 8202 adalah CE90 dan LE90. Hasil uji akurasi adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Tabel Uji Akurasi Horizontal Metode *Direct Georeferencing*

No	Nama Titik	X (m)	X' (m)	ΔX (m)	$(\Delta X)^2$ (m)	Y (m)	Y' (m)	ΔY (m)	$(\Delta Y)^2$ (m)	$(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2$ (m)
		ICP	OrthoFoto			ICP	OrthoFoto			
1	DD02	41060.117	41060.170	0.053	0.003	592771.940	592771.986	0.046	0.002	0.005
2	DD03	41486.065	41486.027	-0.038	0.001	592324.494	592324.533	0.039	0.002	0.003
3	DD04	40549.255	40549.240	-0.015	0.000	592078.850	592078.867	0.017	0.000	0.001
4	DD05	40452.717	40452.694	-0.023	0.001	591700.040	591700.134	0.094	0.009	0.009
5	DD06	40791.820	40791.843	0.023	0.001	591504.789	591504.868	0.079	0.006	0.007
6	DD07	40615.813	40615.777	-0.036	0.001	590914.619	590914.579	-0.041	0.002	0.003
7	DD08	41514.127	41514.175	0.047	0.002	591278.491	591278.447	-0.045	0.002	0.004
8	DD09	42098.337	42098.355	0.018	0.000	590970.660	590970.690	0.030	0.001	0.001
9	DD10	42425.225	42425.321	0.095	0.009	590303.020	590303.050	0.030	0.001	0.010
10	DD12	41690.065	41690.055	-0.010	0.000	589280.681	589280.696	0.015	0.000	0.000
11	DD14	42396.413	42396.538	0.125	0.016	589145.546	589145.577	0.031	0.001	0.017
12	DD16	41173.203	41173.255	0.052	0.003	588457.461	588457.399	-0.062	0.004	0.007
13	DN-01	41105.397	41105.432	0.036	0.001	591038.764	591038.704	-0.060	0.004	0.005
Jumlah										0.071
Rata-rata										0.005
RMSE										0.074
Akurasi (CE90)										0.112

Tabel 3. Tabel Uji Akurasi Vertikal Metode Direct Georeferencing

No	Nama Titik	H (m)	H' (m)	ΔH (m)	ΔH^2 (m)
		Ellipsoid	Elevasi DSM		
1	DD02	334.189	334.323	0.134	0.018
2	DD03	283.027	283.219	0.191	0.037
3	DD04	324.909	325.026	0.117	0.014
4	DD05	284.227	284.239	0.012	0.000
5	DD06	319.293	319.328	0.035	0.001
6	DD07	297.510	297.567	0.057	0.003
7	DD08	280.553	280.525	-0.028	0.001
8	DD09	254.888	254.961	0.073	0.005
9	DD10	74.609	74.750	0.141	0.020
10	DD12	188.927	188.994	0.067	0.004
11	DD14	150.881	150.830	-0.051	0.003
12	DD16	217.583	217.653	0.070	0.005
13	DN-01	296.220	296.230	0.010	0.000
Jumlah					0.111
Rata-rata					0.009
RMSE					0.092
Akurasi (LE90)					0.152

Tabel 4. Tabel Uji Akurasi Horizontal Metode Direct Georeferencing +1 GCP

No	Nama Titik	X (m)	X' (m)	ΔX (m)	$(\Delta X)^2$ (m)	Y (m)	Y' (m)	ΔY (m)	$(\Delta Y)^2$ (m)	$(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2$ (m)
		ICP	OrthoFoto			ICP	OrthoFoto			
1	DD02	41060.117	41060.159	0.042	0.002	592771.940	592771.967	0.027	0.001	0.002
2	DD03	41486.065	41486.012	-0.053	0.003	592324.494	592324.529	0.035	0.001	0.004
3	DD04	40549.255	40549.250	-0.005	0.000	592078.850	592078.874	0.024	0.001	0.001
4	DD05	40452.717	40452.712	-0.005	0.000	591700.040	591700.119	0.078	0.006	0.006
5	DD06	40791.820	40791.841	0.021	0.000	591504.789	591504.859	0.070	0.005	0.005
6	DD07	40615.813	40615.764	-0.049	0.002	590914.619	590914.571	-0.048	0.002	0.005
7	DD08	41514.127	41514.167	0.040	0.002	591278.491	591278.446	-0.045	0.002	0.004
8	DD09	42098.337	42098.350	0.012	0.000	590970.660	590970.687	0.028	0.001	0.001
9	DD10	42425.225	42425.312	0.087	0.008	590303.020	590303.065	0.045	0.002	0.010
10	DD12	41690.065	41690.079	0.015	0.000	589280.681	589280.679	-0.002	0.000	0.000
11	DD14	42396.413	42396.515	0.102	0.010	589145.546	589145.607	0.061	0.004	0.014
12	DD16	41173.203	41173.247	0.044	0.002	588457.461	588457.398	-0.063	0.004	0.006
13	DN-01	41105.397	41105.431	0.034	0.001	591038.764	591038.724	-0.040	0.002	0.003
Jumlah										0.060
Rata-rata										0.005
RMSE										0.068
Akurasi (CE90)										0.103

Tabel 5. Tabel Uji Akurasi Vertikal Metode Direct Georeferencing + 1 GCP

No	Nama Titik	H (m)	H' (m)	ΔH (m)	ΔH^2 (m)
		Ellipsoid	Elevasi DSM		
1	DD02	334.189	334.335	0.145	0.021
2	DD03	283.027	283.247	0.219	0.048
3	DD04	324.909	325.058	0.149	0.022
4	DD05	284.227	284.204	-0.023	0.001
5	DD06	319.293	319.310	0.018	0.000
6	DD07	297.510	297.571	0.061	0.004
7	DD08	280.553	280.510	-0.043	0.002
8	DD09	254.888	254.995	0.106	0.011

No	Nama Titik	H (m)	H' (m)	ΔH (m)	ΔH^2 (m)
		Ellipsoid	Elevasi DSM		
9	DD10	74.609	74.789	0.179	0.032
10	DD12	188.927	188.917	-0.010	0.000
11	DD14	150.881	150.764	-0.117	0.014
12	DD16	217.583	217.664	0.081	0.007
13	DN-01	296.220	296.230	0.010	0.000
Jumlah					0.162
Rata-rata					0.012
RMSE					0.112
Akurasi (LE90)					0.184

Tabel 6. Uji Akurasi Horizontal Metode *Direct Georeferencing* + 3GCP

No	Nama Titik	X (m)	X' (m)	ΔX (m)	$(\Delta X)^2$ (m)	Y (m)	Y' (m)	ΔY (m)	$(\Delta Y)^2$ (m)	$(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2$ (m)
		ICP	OrthoFoto			ICP	OrthoFoto			
1	DD02	41060.117	41060.155	0.038	0.001	592771.940	592771.963	0.023	0.001	0.002
2	DD03	41486.065	41486.024	-0.041	0.002	592324.494	592324.538	0.044	0.002	0.004
3	DD04	40549.255	40549.245	-0.010	0.000	592078.850	592078.869	0.019	0.000	0.000
4	DD05	40452.717	40452.709	-0.008	0.000	591700.040	591700.125	0.085	0.007	0.007
5	DD06	40791.820	40791.841	0.021	0.000	591504.789	591504.859	0.070	0.005	0.005
6	DD07	40615.813	40615.763	-0.050	0.002	590914.619	590914.561	-0.058	0.003	0.006
7	DD08	41514.127	41514.162	0.034	0.001	591278.491	591278.445	-0.046	0.002	0.003
8	DD09	42098.337	42098.352	0.014	0.000	590970.660	590970.682	0.022	0.000	0.001
9	DD10	42425.225	42425.298	0.072	0.005	590303.020	590303.067	0.048	0.002	0.008
10	DD12	41690.065	41690.088	0.023	0.001	589280.681	589280.693	0.013	0.000	0.001
11	DD14	42396.413	42396.521	0.108	0.012	589145.546	589145.591	0.046	0.002	0.014
12	DD16	41173.203	41173.243	0.040	0.002	588457.461	588457.395	-0.066	0.004	0.006
13	DN-01	41105.397	41105.423	0.027	0.001	591038.764	591038.723	-0.041	0.002	0.002
Jumlah										0.059
Rata-rata										0.005
RMSE										0.067
Akurasi (CE90)										0.102

Tabel 7. Uji Akurasi Vertikal Metode *Direct Georeferencing* + 3 GCP

No	Nama Titik	H (m)	H' (m)	ΔH (m)	ΔH^2 (m)
		Ellipsoid	Elevasi DSM		
1	DD02	334.189	334.281	0.092	0.009
2	DD03	283.027	283.233	0.206	0.042
3	DD04	324.909	325.019	0.111	0.012
4	DD05	284.227	284.195	-0.032	0.001
5	DD06	319.293	319.272	-0.021	0.000
6	DD07	297.510	297.575	0.065	0.004
7	DD08	280.553	280.493	-0.060	0.004
8	DD09	254.888	254.963	0.074	0.006
9	DD10	74.609	74.679	0.069	0.005
10	DD12	188.927	188.957	0.030	0.001
11	DD14	150.881	150.705	-0.176	0.031
12	DD16	217.583	217.635	0.052	0.003
13	DN-01	296.220	296.177	-0.042	0.002
Jumlah					0.119
Rata-rata					0.009
RMSE					0.096
Akurasi (LE90)					0.158

Tabel 8. Tabel Uji Akurasi Horizontal Metode *Direct Georeferencing* + 4 GCP

No	Nama Titik	X (m)	X' (m)	ΔX (m)	$(\Delta X)^2$ (m)	Y (m)	Y' (m)	ΔY (m)	$(\Delta Y)^2$ (m)	$(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2$ (m)
		ICP	OrthoFoto			ICP	OrthoFoto			
1	DD02	41060.117	41060.155	0.038	0.001	592771.940	592771.963	0.023	0.001	0.002
2	DD03	41486.065	41486.024	-0.041	0.002	592324.494	592324.538	0.044	0.002	0.004
3	DD04	40549.255	40549.245	-0.010	0.000	592078.850	592078.869	0.019	0.000	0.000
4	DD05	40452.717	40452.709	-0.008	0.000	591700.040	591700.125	0.085	0.007	0.007
5	DD06	40791.820	40791.841	0.021	0.000	591504.789	591504.859	0.070	0.005	0.005
6	DD07	40615.813	40615.763	-0.050	0.002	590914.619	590914.561	-0.058	0.003	0.006
7	DD08	41514.127	41514.162	0.034	0.001	591278.491	591278.445	-0.046	0.002	0.003
8	DD09	42098.337	42098.352	0.014	0.000	590970.660	590970.682	0.022	0.000	0.001
9	DD10	42425.225	42425.298	0.072	0.005	590303.020	590303.067	0.048	0.002	0.008
10	DD12	41690.065	41690.065	0.000	0.000	589280.681	589280.695	0.014	0.000	0.000
11	DD14	42396.413	42396.521	0.108	0.012	589145.546	589145.591	0.046	0.002	0.014
12	DD16	41173.203	41173.243	0.040	0.002	588457.461	588457.395	-0.066	0.004	0.006
13	DN-01	41105.397	41105.423	0.027	0.001	591038.764	591038.723	-0.041	0.002	0.002
Jumlah										0.058
Rata-rata										0.004
RMSE										0.067
Akurasi (CE90)										0.102

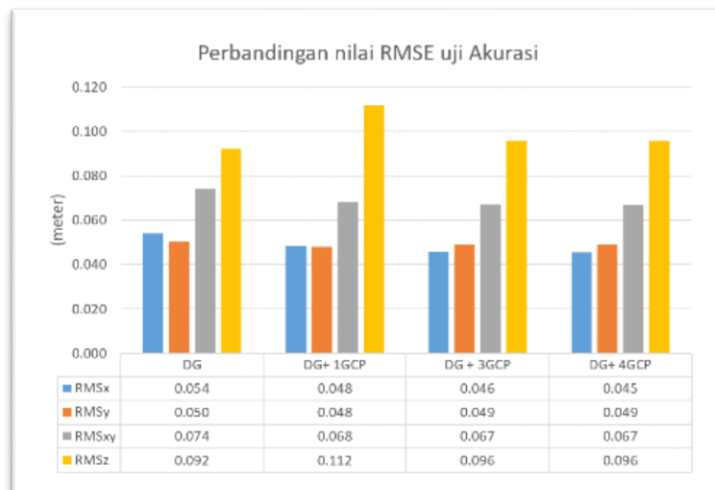
Tabel 8. Tabel Uji Akurasi Vertikal Metode *Direct Georeferencing* + 4 GCP

No	Nama Titik	H (m)	H' (m)	ΔH (m)	ΔH^2 (m)
		Ellipsoid	Elevasi DSM		
1	DD02	334.189	334.296	0.107	0.011
2	DD03	283.027	283.255	0.227	0.052
3	DD04	324.909	325.025	0.116	0.014
4	DD05	284.227	284.213	-0.014	0.000
5	DD06	319.293	319.336	0.044	0.002
6	DD07	297.510	297.557	0.047	0.002
7	DD08	280.553	280.516	-0.037	0.001
8	DD09	254.888	254.961	0.073	0.005
9	DD10	74.609	74.708	0.099	0.010
10	DD12	188.927	188.947	0.020	0.000
11	DD14	150.881	150.769	-0.112	0.012
12	DD16	217.583	217.659	0.077	0.006
13	DN-01	296.220	296.217	-0.002	0.000
Jumlah					0.116
Rata-rata					0.009
RMSE					0.094
Akurasi (LE90)					0.156

Tabel 9. Resume Nilai Uji Akurasi

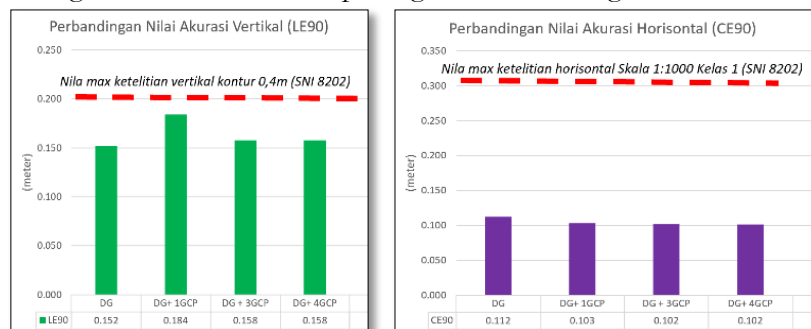
Nilai/ Metode	DG (m)	DG + 1 GCP (m)	DG+3 GCP (m)	DG+4GCP (m)
RMSx	0.054	0.048	0.046	0.045
RMSy	0.050	0.048	0.049	0.049
RMSxy	0.074	0.068	0.067	0.067
RMSz	0.092	0.112	0.096	0.096
CE90	0.112	0.103	0.102	0.102
LE90	0.152	0.184	0.158	0.158

Keterangan : DG = *direct georeferencing*, GCP=*ground control point*



Gambar 82. Grafik perbandingan RMS Uji Akurasi Pada Berbagai Metode

Terlihat dari grafik diatas penambahan 1 GCP meningkatkan akurasi horizontal, tetapi malah mengurangi akurasi vertikal. Hasil penambahan 3-4 GCP akan menambah akurasi baik horizontal maupun vertikal, walaupun tidak terlalu signifikan. Bahkan terlihat pengolahan data direct georeferencing ditambahkan 3 GCP dan 4 GCP hasilnya relative sama. Sedangkan untuk nilai akurasi horizontal (CE90) dan vertikal (LE90) beserta kemampuan setiap metode untuk mencapai standar ketelitian sesuai dengan SNI 8202:2019 dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 9. Grafik Perbandingan Akurasi (a) Horizontal (b) Vertikal

Terlihat dari grafik pada gambar 9 bahwa berdasarkan perhitungan nilai akurasi horinzontal (CE90), semua metode yang dilakukan dapat memenuhi spesifikai peta dasar untuk skala 1 : 1000 kelas 1. Sedangkan untuk akurasi vertikal (LE90) dapat memenuhi kriteria kontur 0,4 m.

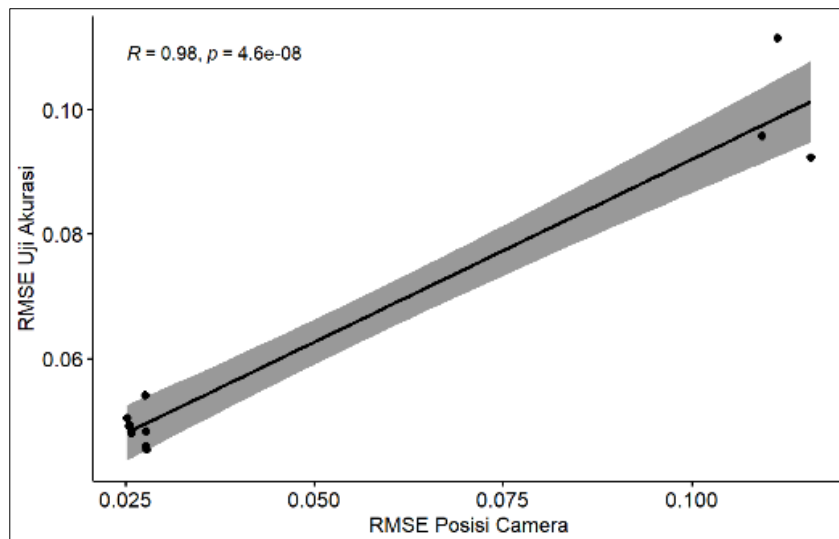
RMSE Posisi Kamera

Saat melakukan proses pembentukan model 3D, perangkat lunak melaporkan RMSE posisi kamera. Dalam laporan, RMSE disebut sebagai “average camera location error”. Nilai RMSE posisi kamera setiap metode pengolahan adalah sebagai berikut :

Tabel 10. Nilai RMSE Posisi Kamera dalam Pembentukan Model 3D

Metode / Nilai	DG (m)	DG+1GCP (m)	DG+3GCP (m)	DG+4GCP (m)
RMSE _x	0.0276299	0.0277271	0.0276816	0.0277367
RMSE _y	0.0251965	0.0257812	0.0254226	0.0255213
RMSE _z	0.1157820	0.1113920	0.1092490	0.1092840
RMSE _{xy}	0.0373935	0.0378611	0.0375843	0.0376917
RMSE _{xyz}	0.1157820	0.1113920	0.1092490	0.1092840

Berdasarkan Tabel 13. Resume uji akurasi dan Tabel 14. Nilai RMSE posisi kamera, dapat dihitung nilai korelasi antara Nilai RMSE posisi kamera saat pembuatan model 3D dan RMSE uji akurasi menggunakan fungsi pearson didapatkan nilai korelasi = 0,9773 dengan derajat kepercayaan 95%. Digambarkan dalam grafik sebagai berikut :

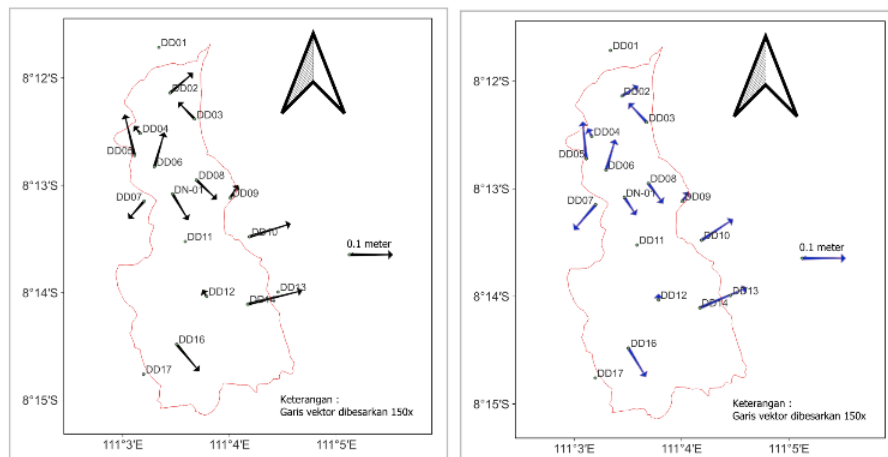


Gambar 30. Grafik Korelasi Antara RMSE Posisi Kamera dengan RMSE Uji Akurasi

Terlihat dari Gambar15, antara RMSE posisi kamera dan RMSE uji akurasi berkorelasi sangat erat. Sehingga dapat disimpulkan jika nilai RMSE posisi kamera sudah bagus, maka dimungkinkan nilai uji akurasinya akan juga masuk toleransi.

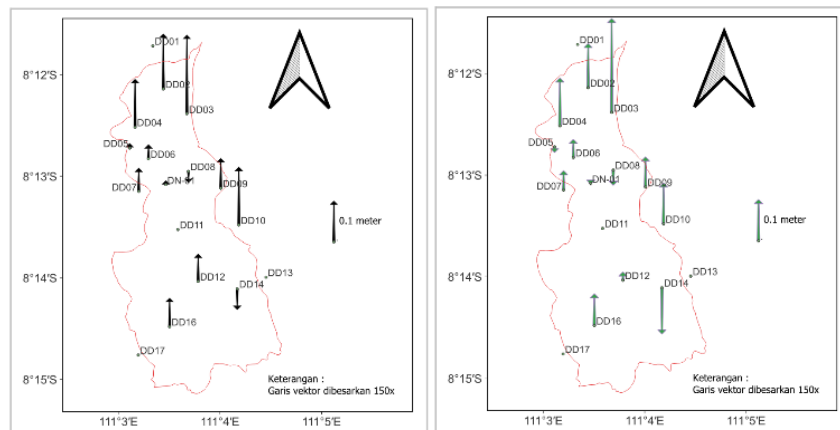
Vektor / Pola Kesalahan

Dari nilai-nilai ΔX , ΔY dan ΔH pada tabel uji akurasi (Tabel 5 sampai dengan Tabel 12) juga dapat dianalisa arah vektor penyimpangan kesalahannya



Gambar 41. Arah Vektor Kesalahan Horizontal (a) *Direct Georeferencing* (b) *Direct Georeferencing + 4 GCP*

Pada gambar 11. terlihat arah vektor kesalahan arah horizontal antara hasil pengolahan direct georeferencing dan penambahan 4GCP hampir tidak ada perbedaan baik arah maupun nilainya. Melihat arah vektor yang tidak mempunyai pola, dapat disimpulkan bahwa kesalahan pada arah horizontal yang terjadi adalah kesalahan acak (random error)



Gambar 12. Arah Vektor Kesalahan Vertikal (a) *Direct Georeferencing* (b) *Direct Georeferencing + 4GCP*

Arah vektor kesalahan vertikal terlihat arahnya sama antara hasil pengolahan direct georeferencing dibandingkan dengan direct georeferencing ditambah 4 GCP, perbedaan pada besarnya.

KESIMPULAN

Hasil pemotretan PUNA metode penentuan posisi RTK yang diolah menggunakan direct georeferencing dapat memenuhi spesifikasi peta skala 1:1000 dan interval kontur 0,4m yang tercantum dalam SNI 8202:2019. Penambahan 3-4 GCP akan menambah akurasi walaupun tidak significant. Selain itu hasil RMSE posisi kamera juga dapat dijadikan salah satu parameter awal untuk evaluasi hasil uji akurasi, serta hasil uji akurasi menunjukkan bahwa kesalahan yang terjadi adalah jenis random error.

Berdasarkan hasil pada penelitian ini, disarankan pada penelitian selanjutnya untuk dilakukan perbandingan uji akurasi direct georeferencing menggunakan data pemotretan posisi real-time kinematic (RTK) dibandingkan dengan post-processing kinematic (PPP) dan atau dikombinasikan dengan data hasil pemotretan menggunakan tinggi terbang yang berbeda.

REFERENSI

- P. E. Carbonneau and J. T. Dietrich, "Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry," *Earth Surf Process Landf*, vol. 42, no. 3, pp. 473–486, Mar. 2017, doi: 10.1002/esp.4012.
- C. J. Iheaturu, E. G. Ayodele, and C. J. Okolie, "An Assessment Of The Accuracy Of Structure-From-Motion (Sfm) Photogrammetry for 3D Terrain Mapping," *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, vol. 2, pp. 65–82, 2020, doi: 10.15576/GLL/2020.2.65.
- C. A. M. Correia et al., "Comprehensive Direct Georeferencing of Aerial Images for Unmanned Aerial Systems Applications," *Sensors*, vol. 22, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22020604.
- X. Liu, X. Lian, W. Yang, F. Wang, Y. Han, and Y. Zhang, "Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points," *Drones*, vol. 6, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/drones6020030.
- R. Salas López et al., "Accuracy Assessment of Direct Georeferencing for Photogrammetric Applications Based on UAS-GNSS for High Andean Urban Environments," *Drones*, vol. 6, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/drones6120388.
- H. J. Przybilla, M. Baumker, T. Luhmann, H. Hastedt, and M. Eilers, "Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-

- calibration for RTK-based UAV photogrammetry,” in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Aug. 2020, pp. 485–492. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-485-2020.
- M. Zeybek, S. Taşkaya, I. Elkhachy, and P. Tarolli, “Improving the Spatial Accuracy of UAV Platforms Using Direct Georeferencing Methods: An Application for Steep Slopes,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/rs15102700.
- L. T. Losè, F. Chiabrando, and F. G. Tonolo, “Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 9, no. 10, Oct. 2020, doi: 10.3390/ijgi9100578.
- P. R. Nesbit, S. M. Hubbard, and C. H. Hugenholtz, “Direct Georeferencing UAV-SfM in High-Relief Topography: Accuracy Assessment and Alternative Ground Control Strategies along Steep Inaccessible Rock Slopes,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/rs14030490.
- K. Shervais, “Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students Introduction to SfM for Field Education,” 2023.
- BSN “Standar Nasional Indonesia 8202_2019”.