

ANALISIS KONFIGURASI OPTIMUM KERANGKA GCP UNTUK SURVEI PEMETAAN LUASAN BESAR MENGGUNAKAN UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)

Fajriah Lita Pamungkasari^{*)}, Yudo Prasetyo, Abdi Sukmono

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
 Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788
 Email : litapamungkasari@student.undip.ac.id

ABSTRAK

Teknik fotogrametri yang sedang berkembang sekarang ini menjadikan *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* sebagai salah satu *platform* yang semakin populer untuk pekerjaan pemetaan karena kelebihanannya dalam kemampuan akuisisi foto udara dengan resolusi spasial yang tinggi. Penggunaan *Ground Control Point (GCP)* tidak lepas dari pekerjaan fotogrametri agar produk foto udara memiliki akurasi tingkat survei. Untuk itu spesifikasi yang jelas mengenai konfigurasi GCP masih perlu diteliti untuk mendapatkan solusi yang efisien untuk meminimalisir waktu, biaya dan tenaga yang digunakan. Maka dari itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penggunaan GCP yang optimal untuk survei pemetaan luasan besar. Digunakan 4 set data survei udara luasan besar dengan bentuk area meluas dan memanjang hasil akuisisi dari UAV. Ortorektifikasi foto udara dilakukan dengan konfigurasi GCP berdasarkan variasi jarak dan geometri jaringan. Pengolahan dilakukan hingga didapatkan nilai ketelitian dari laporan proses rektifikasi. Selanjutnya, ketelitian planimetrik dideskripsikan dalam akurasi relatif dan absolut. Analisis hasil variasi jarak dan geometri jaringan dilakukan dengan akurasi relatif sedangkan akurasi absolut digunakan untuk analisis skala untuk mengetahui konfigurasi yang optimal. Hasil dari uji akurasi berdasarkan 11 variasi jarak antar GCP menunjukkan bahwa semakin jauh interval GCP menghasilkan ketelitian yang semakin buruk, dengan perbedaan nilai ketelitian yang tidak signifikan dari jarak 0,86 km sampai 2,84 km, hingga terjadi peningkatan signifikan pada model dengan jarak 3,52 km sampai 7,69 km. Sedangkan, hasil dari uji akurasi berdasarkan geometri jaringan menghasilkan ketelitian yang beragam pada 27 model untuk masing-masing jenis geometri. Perbandingan dilakukan antar model dengan geometri yang berbeda maupun antar geometri yang sama serta pada geometri dengan dan tanpa titik pusat. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi dalam penggunaan konfigurasi GCP yang optimal untuk pekerjaan pemetaan luasan besar menggunakan UAV.

Kata Kunci : Konfigurasi GCP, Ketelitian Planimetrik, UAV

ABSTRACT

Photogrammetry techniques that is currently developing makes Unmanned Aerial Vehicle (UAV) one of the trend platforms used for mapping project because of its advantages in the ability to acquire aerial photographs with high spatial resolution. The use of Ground Control Points (GCP) cannot be separated from photogrammetric work so that aerial photography products have survey level accuracy. For this reason, clear specifications regarding GCP configuration still need to be investigated to obtain efficient solutions to minimize the time, cost and energy used. Therefore, this study aims to analyze the optimal use of GCP for large area mapping surveys. There are 4 sets of large-area air survey data from the UAVs are used with a vast and corridor area characteristics. The orthorectification of aerial photographs processed with GCP configuration based on variations by distance and network geometry. Processing is carried out to obtain the accuracy value from the rectification process report. Furthermore, planimetric accuracy is described in relative and absolute accuracy. Analysis of the results of variations by distance and network geometry involves relative accuracy while absolute accuracy is used for scale analysis to determine the optimal configuration. The results of the accuracy test based on 11 variations of distance between GCP showed that the farther the GCP interval produces worse accuracy, the difference in accuracy value that was not significant from a distance of 0.86 km to 2.84 km, until a significant increase began in the model with 3.52 km to 7, 69 km distance. While the results of the accuracy test based on network geometry produce a variety of accuracy in 27 models for each feature types. Comparisons are made between models with different geometries nor between the same geometry and geometry with a central point. The results of this study can be used as a reference in determining the optimal use of the GCP configuration for large area mapping work using UAV.

Keywords : GCP Configuration, Planimetric Accuracy, UAV

^{*)}Penulis Utama, Penanggung Jawab

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Teknik pengambilan data berupa foto menggunakan pesawat udara nir-awak atau UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) mengalami perkembangan pesat belakangan ini karena meningkatnya kebutuhan akan data spasial resolusi tinggi. UAV sebagai teknologi baru untuk pemetaan dapat menyajikan data spasial resolusi tinggi dalam bentuk foto memiliki beberapa kelebihan dibanding dengan teknologi pemetaan lainnya, yaitu murah, sederhana dan mudah dibawa berpindah-pindah (Berteska dan Ruzgiene, 2013). Sebagian besar UAV dilengkapi dengan GPS kelas komersial sehingga menghasilkan foto dengan kesalahan hingga satuan meter. Kesalahan sebesar itu harus diminimalisir hingga ketelitian sub-meter agar kualitas foto udara dapat memenuhi spesifikasi ketelitian geometrik. Untuk itu *Ground Control Point* (GCP) digunakan untuk mengatasi masalah ini.

GCP adalah tanda di lapangan yang diukur menggunakan instrumen kelas survei seperti DGPS/RTK GPS. Titik-titik GCP digunakan selama pemrosesan foto udara untuk mengurangi kesalahan sehingga dihasilkan produk dengan akurasi tingkat survei. GCP akan diikatkan ke foto udara hasil dari UAV untuk menghasilkan foto ter-ortorektifikasi. Kenyataannya dalam praktik pemetaan menggunakan UAV, GCP berpengaruh besar dalam biaya dan waktu pekerjaan sehingga sebisa mungkin GCP harus digunakan secara efektif. Belum adanya spesifikasi penentuan kuantitas dan konfigurasi dari GCP yang menjadi patokan dalam survei pemetaan dengan UAV menjadi masalah dalam pelaksanaan pekerjaan pemetaan luasan besar.

Pada penelitian ini akan digunakan 4 data foto udara dengan cakupan luasan yang luas dari 10 km², 38 km², 146 km² hingga 154 km² dengan cakupan daerah berbentuk area dan koridor. Metode yang digunakan dalam pengolahan data yaitu dengan memvariasikan kerangka titik kontrol berdasarkan jarak antar GCP dan geometri jaringan. Dari hasil pengolahan akan didapatkan nilai kesalahan berupa RMSE (*Root Mean Square Error*) yang kemudian akan menjadi bahan analisis pada penelitian ini. Konfigurasi optimum dari penggunaan GCP dan ICP untuk ortorektifikasi foto udara dianalisis pada penelitian ini, sehingga diharapkan dapat menjadi referensi untuk pekerjaan pemetaan menggunakan UAV dengan luasan besar.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana hasil ketelitian planimetrik pada ortofoto terhadap variasi jarak dari kombinasi titik kontrol?
2. Bagaimana hasil ketelitian planimetrik pada ortofoto terhadap geometri jaringan dari kombinasi titik kontrol?
3. Bagaimana konfigurasi optimal untuk proses ortorektifikasi data foto udara berdasarkan analisis skala?

I.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui nilai ketelitian dari masing-masing konfigurasi berdasarkan variasi jarak dari kombinasi titik kontrol.
2. Mengetahui nilai ketelitian dari masing-masing konfigurasi berdasarkan geometri jaringan dari kombinasi titik kontrol.
3. Mencari konfigurasi optimal titik kontrol berdasarkan analisis skala pada pengolahan data foto udara menggunakan UAV.

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Aspek Keilmuan
Memberikan kontribusi bagi ilmu fotogrametri, khususnya mengenai ketelitian planimetrik ortofoto berdasarkan variasi konfigurasi GCP.
2. Aspek Rekayasa
Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi penggunaan GCP yang dibutuhkan dalam pekerjaan pemotretan udara.

I.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar, maka diberikan batasan masalah yang akan dijabarkan sebagai berikut:

1. Model konfigurasi GCP dan ICP dibuat dengan memvariasikan data yang telah ada pada empat set data survei udara yang digunakan.
2. Analisis dilakukan dalam membandingkan ketelitian masing-masing model berdasarkan variasi jarak dan geometri jaringan dari konfigurasi titik kontrol.
3. Analisis ketelitian planimetrik menggunakan data dari *processing report* dengan dilengkapi data ortomozaik sebagai data verifikasi.
4. Algoritma dalam pemrosesan data foto udara sesuai dengan yang dikembangkan oleh perangkat lunak Agisoft Photoscan.
5. Ketelitian planimetrik pada penelitian ini dideskripsikan dalam akurasi relatif dan akurasi absolut. Akurasi relatif yaitu nilai RMSE yang dibandingkan dengan resolusi spasial sedangkan akurasi absolut dihitung dalam CE 90.
6. Analisis skala berpedoman pada Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup dalam penelitian membahas mengenai data dan alat penelitian sebagai berikut:

I.5.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- a. *Workstation* dengan spesifikasi Intel Core i7 kapasitas RAM 32 GB Dengan Sistem Operasi Windows 7 Ultimate.
- b. *Personal Computer* merek HP dengan spesifikasi Intel Core i7 Kapasitas RAM 8GB Sistem Operasi Windows 10 Pro.
- c. *Software* Agisoft Photoscan.
- d. *Software* ArcGIS.
- e. *Software* Microsoft Excel.

I.5.2 Data Penelitian

Data untuk penelitian didapatkan dari PT. Aero GeoSurvey dengan keterangan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data penelitian

Data	Informasi Dataset Foto Udara dan Titik Kontrol
1.	Kawasan : Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan Waktu Akuisisi : November 2016 Luas Area : 174 km ² Tinggi Terbang : 463 m Jumlah Foto : 14.073 Resolusi Spasial : 9,59 cm/piksel Jumlah Titik Kontrol : 27
2.	Kawasan : Katingan, Kalimantan Tengah Waktu Akuisisi : Januari 2017 Luas Area : 154 km ² Tinggi Terbang : 503 m Jumlah Foto : 13.742 Resolusi Spasial : 9,53 cm/piksel Jumlah Titik Kontrol : 40
3.	Kawasan : Kulon Progo, Yogyakarta Waktu Akuisisi : Oktober 2017 Luas Area : 10 km ² Tinggi Terbang : 248 m Jumlah Foto : 2.899 Resolusi Spasial : 4,76 cm/piksel Jumlah Titik Kontrol : 22
4.	Kawasan : Tanggamus, Lampung Waktu Akuisisi : Januari 2018 Luas Area : 38 km ² Tinggi Terbang : 328 m Jumlah Foto : 10.875 Foto Resolusi Spasial : 5,67 cm/piksel Jumlah Titik Kontrol : 30

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Prinsip Ortofotografi

Ortofoto adalah sebuah foto yang telah diperbaiki secara geometrik agar dapat sesuai pada setiap titik di peta, ditambah dengan penyajian grafis yang nyata. Penambahan ini dapat berasal dari informasi eksternal atau dari interpretasi foto tersebut. Ortofotografi digital saat ini menjadi produk yang mampu menggantikan kartografi klasik secara sempurna (Kasser dan Polidori, 2002).

II.2 Konsep Rektifikasi

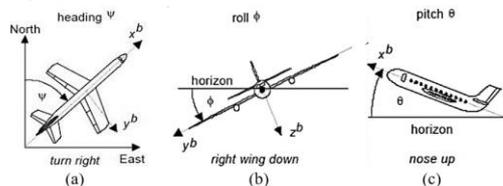
Menurut Temiz dan Külür (2008), rektifikasi dapat diartikan sebagai proses transformasi dari foto digital yang dilakukan untuk mendapatkan gambar yang bebas distorsi. Parameter transformasi diperoleh dengan menggunakan GCP pada foto udara yang belum terkoreksi dan titik yang berkoresponden pada peta atau pada foto ter-ortorektifikasi. Pendekatan yang digunakan untuk proses rektifikasi pada penelitian ini yaitu dengan metode rektifikasi differensial yang juga dikenal dengan ortorektifikasi.

II.3 Kesalahan Pada Foto Udara

Parameter kesalahan foto udara dilibatkan dalam pengolahan fotogrametri sebagai bahan untuk optimasi model agar dapat direpresentasi sesuai keadaan yang sebenarnya. Tahar (2013) menjelaskan bahwa pengolahan fotogrametri melibatkan dua orientasi utama yang dikenal sebagai orientasi interior dan orientasi eksterior.

II.3.1 Orientasi Eksterior

Orientasi eksterior berkaitan dengan kesalahan yang terjadi akibat pergerakan orientasi sensor. Kesalahan-kesalahan yang disebutkan oleh Wolf, (1983) antara lain *crab*, *drift*, *tilt* dan *tip* seperti dapat dilihat pada Gambar 1.



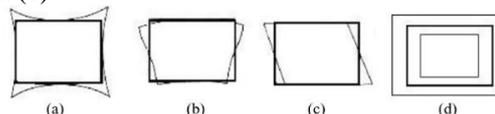
Gambar 1. Kesalahan orientasi sensor (Bäumker, M. dan Heimes F. J., 2001)

II.3.2 Orientasi Interior

Kesalahan sistematis dalam sensor itu sendiri dinamakan orientasi interior atau biasa disebut orientasi dalam. Wolf (1983) menjelaskan bahwa unsur orientasi interior ini meliputi:

1. Panjang fokus,
2. Lokasi titik utama,
3. Distorsi radial,
4. Distorsi tangensial,
5. Distorsi afinitas,
6. Faktor skala.

Pengaruh dari ketidaksesuaian orientasi sensor tersebut diilustrasikan pada Gambar 2 yaitu distorsi radial (a), tangensial (b), afinitas (c), dan perubahan skala (d).



Gambar 2. Distorsi lensa (Takeuchi, W, 1996)

II.4 Titik Kontrol

Kontrol fotogrametri terdiri dari beberapa titik yang posisi ruang objeknya diketahui dalam suatu sistem koordinat referensi dan gambarnya dapat diidentifikasi pada foto. Pada fotogrametri, ruang objek adalah permukaan tanah yang mana sebagai bidang referensi untuk memproyeksikan model foto. Titik kontrol fotogrametri perlu dilibatkan dalam pemrosesan foto udara untuk menghasilkan ketelitian tingkat survei karena titik kontrol diukur dengan instrumen pengukuran tingkat survei dengan ketelitian mencapai cm hingga mm.

II.5 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Fotogrametri UAV dapat dijabarkan sebagai platform pengukuran fotogrametri yang dikendalikan dari jarak jauh, secara semiotomatis atau otomatis, tanpa ada pilot duduk di dalam wahana udara tersebut (Eisenbei, 2009). Platform ini dilengkapi dengan sistem pengukuran fotogrametri yang biasanya berupa kamera digital ukuran kecil ataupun sedang, kamera termal atau inframerah, sistem LiDAR atau kombinasi dari sistem tersebut.

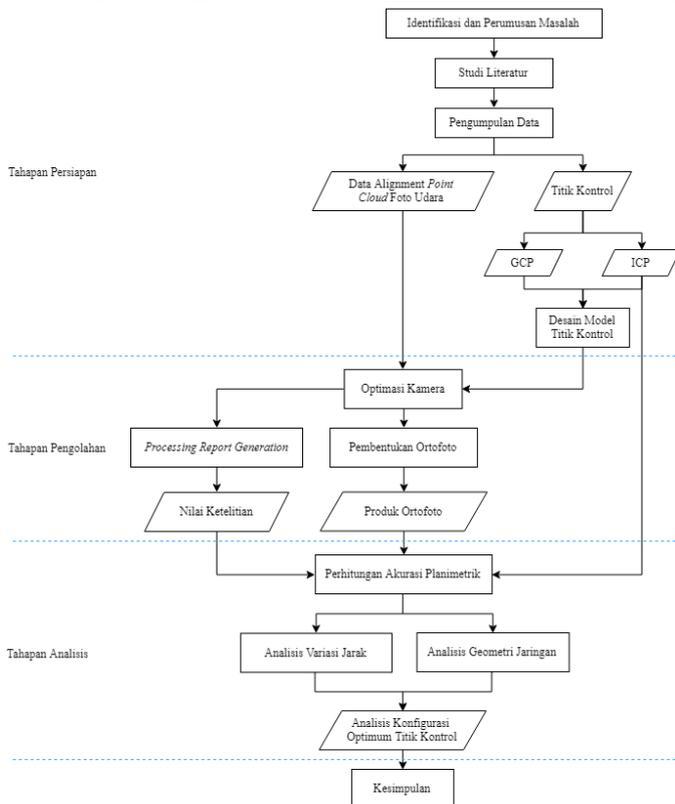
II.6 Konsep Ketelitian Peta

Wolf dan Ghilani (2016) memberi definisi ketelitian jika ditinjau dari segi akurasi yaitu ketepatan nilai pengukuran terhadap nilai sebenarnya. Ketepatan

disini menunjukkan kepada seberapa dekat nilai pengukuran terhadap nilai sebenarnya. Nilai RMSE dipakai untuk mewakili ketelitian data pada penelitian ini, yaitu akar kuadrat dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai koordinat data dan nilai koordinat dari sumber independent yang akurasi lebih tinggi (BIG, 2014). Dalam penelitian ini, toleransi untuk nilai ketelitian dibahas dalam standar dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dan *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS).

III. Metodologi Penelitian

Secara garis besar tahapan penelitian dapat dilihat dalam diagram alir pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Diagram alir penelitian Penjelasan umum tiap tahapan yang dilakukan yaitu:

1. Tahapan persiapan
Tahap awal dalam penelitian ini dilakukan dengan studi literatur, pengumpulan set data survei udara beserta koordinat titik kontrol serta perencanaan model titik kontrol untuk proses ortorektifikasi sesuai variasi jarak dan geometri jaringan.
2. Tahapan Pengolahan
Pengolahan dilakukan terhadap 4 data survei udara dengan merektifikasi sesuai rencana model menggunakan perangkat lunak Agisoft Photoscan dari proses optimasi kamera hingga pembentukan ortomosaik untuk beberapa model, dimana hasil akhir proses yang digunakan untuk analisis antara lain informasi laporan proses dan produk ortomosaik.
3. Tahapan Analisis
Analisis menggunakan hasil nilai ketelitian yang didapat dari laporan proses dengan

mendesripsikan dalam akurasi relatif untuk perbandingan antar model tiap data, serta dalam akurasi absolut untuk analisis konfigurasi optimal berdasarkan skala, selain itu juga dilakukan analisis terhadap kualitas produk ortomosaik serta perbandingan nilai ketelitiannya dengan nilai dari laporan proses untuk tujuan verifikasi.

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1 Hasil dan Analisis Rektifikasi

Terdapat dua macam nilai ketelitian yang ditampilkan dalam analisis ini antara lain akurasi relatif dan absolut. Akurasi relatif pada analisis ini yaitu nilai ketelitian dalam RMSE yang dibandingkan terhadap GSD dari masing-masing data. Sedangkan akurasi absolut pada analisis ini yaitu nilai ketelitian berdasarkan perbedaan posisi antara hasil pengukuran GPS dengan posisi pada model. Nilai ini ditampilkan dalam CE 90 sesuai standar ketelitian geometrik dalam Perka BIG Nomor 15. Berikut ini akan dijelaskan hasil dan analisis rektifikasi pada penelitian ini berdasarkan beberapa topik.

IV.1.1 Hasil Perbandingan Model Variasi Jarak

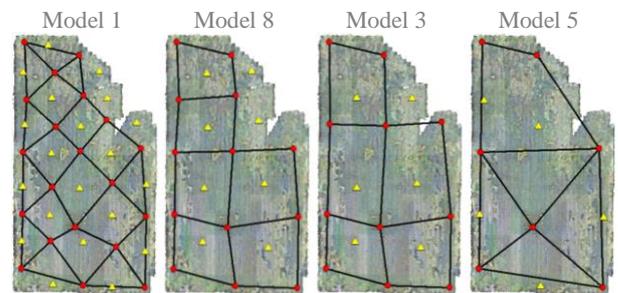
Hasil yang didapatkan dari model berdasarkan variasi jarak dapat dilihat sebagai berikut:

1. Data 2

Pada analisis ini, model yang dibandingkan yaitu model 1, 3, 5 dan 8 dari data 2 yang perbandingannya dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Tabel 2**.

Tabel 2. Nilai ketelitian model berdasarkan variasi jarak data 2

Model	Rata-Rata Jarak (km)	Jumlah Baseline	Jumlah GCP	Jumlah ICP	RMSEr terhadap GSD	CE 90 (m)
1	3,52	37	20	20	7,57	1,095
8	4,49	18	13	8	8,71	1,259
3	5,21	15	11	6	11,61	1,679
5	7,69	11	7	5	20,36	2,945



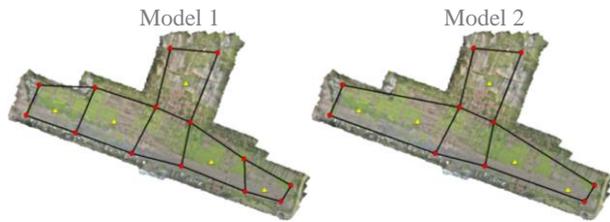
Gambar 4. Model variasi jarak pada data 2

2. Data 3

(a) Pada analisis ini, model yang dibandingkan yaitu model 1 dan 2 dari data 3 yang perbandingannya dapat **Gambar 5** dan **Tabel 3**.

Tabel 3. Nilai ketelitian model berdasarkan variasi jarak data 3

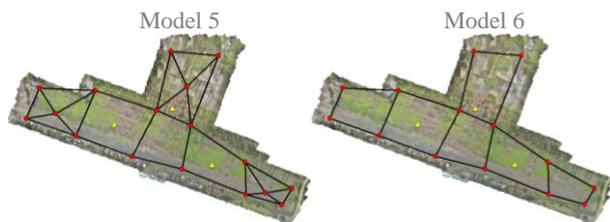
Model	Rata-Rata Jarak (km)	Jumlah Baseline	Jumlah GCP	Jumlah ICP	RMSEr terhadap GSD	CE 90 (m)
1	0,99	19	14	5	1,42	0,110
2	1,38	12	10	5	1,51	0,117



Gambar 5. Model variasi jarak pada data 3 (a) (b) Model yang dibandingkan selanjutnya yaitu model 5 dan 6 yang perbandingannya dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Tabel 4**.

Tabel 4. Nilai ketelitian model berdasarkan variasi jarak data 3

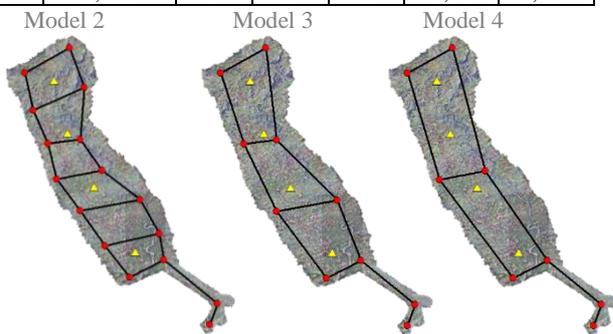
Model	Rata-Rata Jarak (km)	Jumlah Baseline	Jumlah GCP	Jumlah ICP	RMSEr terhadap GSD	CE 90 (m)
5	0,86	31	17	3	1,27	0,098
6	0,99	19	14	3	1,35	0,104



Gambar 6. Model variasi jarak pada data 3 (b) 3. Data 4 Pada analisis ini, model yang dibandingkan yaitu model 2, 3 dan 4 dari data 4 yang perbandingannya dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Tabel 5**.

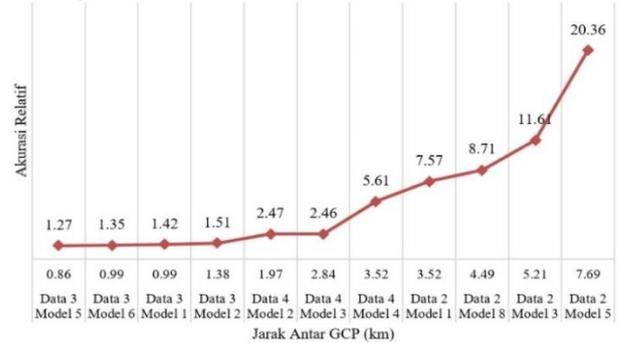
Tabel 5. Nilai ketelitian model berdasarkan variasi jarak data 4

Model	Rata-Rata Jarak (km)	Jumlah Baseline	Jumlah GCP	Jumlah ICP	RMSEr terhadap GSD	CE 90 (m)
2	1,972	21	16	4	2,47	0,223
3	2,835	12	10	4	2,46	0,222
4	3,516	9	8	4	5,61	0,507

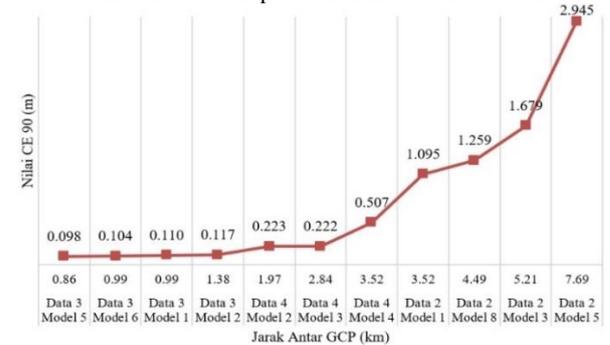


Gambar 7. Model variasi jarak pada data 4 Hasil yang didapatkan dari model berdasarkan variasi jarak dapat dilihat dalam perbandingan akurasi relatif terhadap jarak antar GCP pada **Gambar 8** dan dalam akurasi absolut dalam nilai CE 90 pada **Gambar 9**. Akurasi relatif yang ditampilkan menggambarkan nilai akurasi yang secara umum meningkat dari 1,27 kali GSD pada model jarak terpendek (0,86 km) hingga 20,36 kali GSD pada model jarak terpanjang (7,69 km). Dapat dilihat pada jarak 0,86 km hingga 2,84 km perubahan nilai ketelitian tidak begitu signifikan.

Perubahan yang signifikan terjadi mulai pada jarak 3,52 km sampai 7,69 km. Pola yang sama juga dapat dilihat pada akurasi absolut dimana nilai CE90 sebesar ± 10 cm hingga ± 22 cm dihasilkan oleh jarak antar GCP 0,86 hingga 2,84 km, dan melonjak pada akurasi ± 50 cm mulai jarak 3,52 km.



Gambar 8. Grafik perubahan nilai akurasi relatif



Gambar 9. Grafik perubahan nilai akurasi absolut

Secara umum dapat dianalisis bahwa semakin jauh jarak antar GCP menghasilkan nilai akurasi yang semakin besar. Berdasarkan analisis regresi linear, didapatkan nilai t hitung 12,370. Nilai ini lebih besar dibandingkan t tabel yaitu 2,262 sehingga H_0 ditolak. Ini berarti bahwa ada pengaruh yang nyata dari variabel jarak terhadap nilai ketelitian. Hal ini terjadi karena jumlah GCP berkontribusi pada koreksi proses triangulasi udara untuk semua titik pada model foto.

IV.1.2 Hasil Perbandingan Model Variasi Jarak

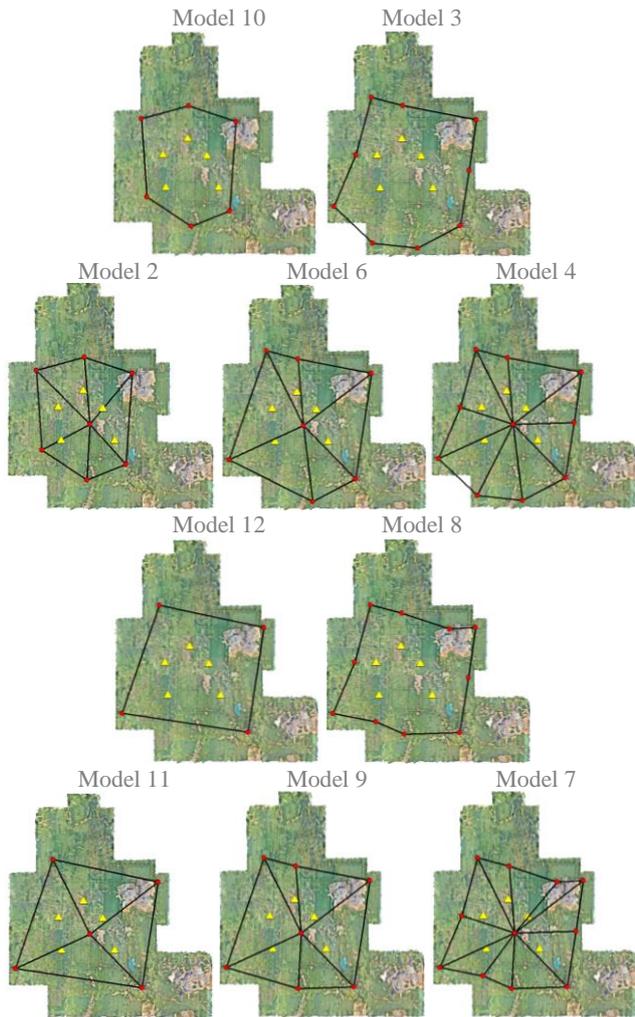
Variasi model geometri jaringan pada penelitian ini dilakukan pada data 1 sampai 4. Hasil yang didapat dipaparkan sebagai berikut:

1. Data 1

Pada analisis pertama, terdapat 10 model yang dibandingkan dari data 1 yang perbandingannya dapat dilihat pada **Gambar 10** dan **Tabel 6**.

Tabel 6. Nilai ketelitian model geometri jaringan data 1

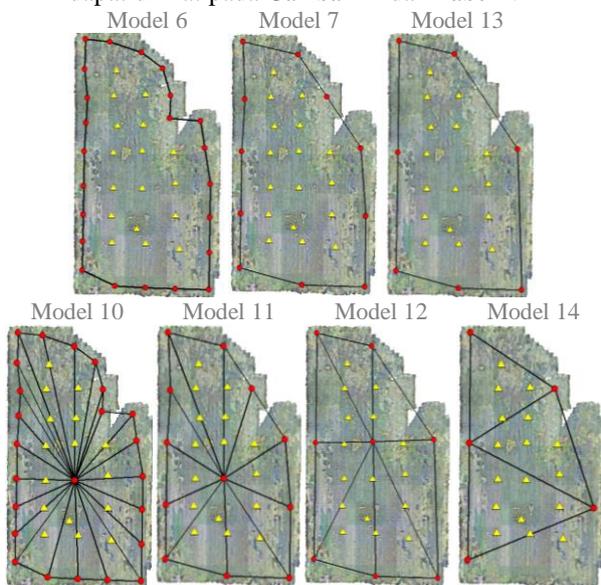
Model	Figur	Jumlah GCP	RMSE thd GSD	CE90 (m)
10	Poligon	6	2,32	0,338
3	Poligon	9	1,95	0,283
2	Poligon terpusat	7	1,85	0,269
6	Poligon terpusat	7	1,94	0,282
4	Poligon terpusat	10	1,41	0,205
12	Segi empat	4	3,93	0,572
8	Segi empat	10	1,73	0,251
11	Segi empat terpusat	5	1,26	0,183
9	Segi empat terpusat	7	2,18	0,317
7	Segi empat terpusat	11	1,51	0,219



Gambar 10. Model geometri pada data 1

2. Data 2

Pada analisis kedua, terdapat 7 model yang dibandingkan dari data 2, yang perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 11 dan Tabel 7.



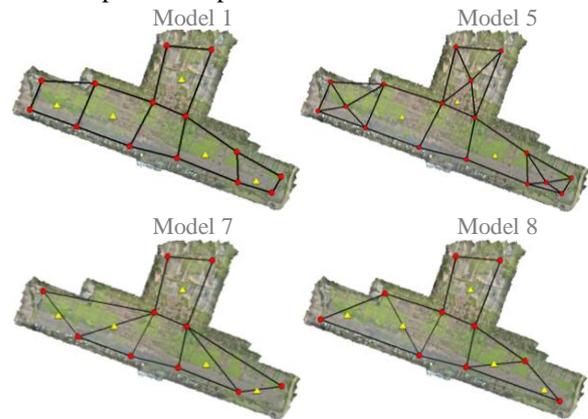
Gambar 11. Model geometri pada data 2

Tabel 7. Nilai ketelitian model geometri jaringan data 2

Model	Figur	Jumlah GCP	RMSE thd GSD	CE90 (m)
6	Poligon	23	10.33	1.493
7	Poligon	11	11.46	1.658
13	Poligon	7	15.35	2.220
10	Poligon terpusat	24	9.88	1.274
11	Poligon terpusat	12	8.59	1.243
12	Poligon terpusat	8	11.04	1.597
14	Rangkaian segitiga	5	14.93	2.159

3. Data 3

Pada analisis ke-tiga, terdapat 4 model yang dibandingkan dari data 3 yang perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 12 dan Tabel 8.



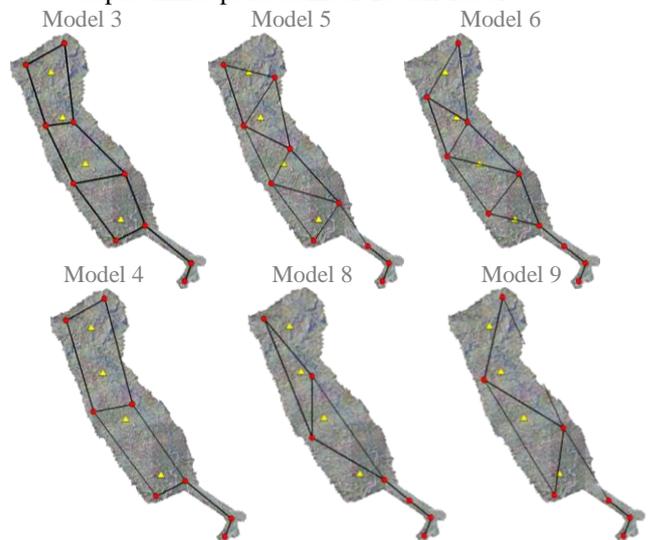
Gambar 12. Model geometri pada data 3

Tabel 8. Nilai ketelitian model geometri jaringan data 3

Model	Figur	Jumlah GCP	RMSE thd GSD	CE90 (m)
1	Rangkaian segiempat	14	1,52	0,110
5	Rangkaian segiempat terpusat	17	1,36	0,098
7	Rangkaian segitiga	10	1,56	0,113
8	Rangkaian segitiga	10	2,28	0,165

4. Data 4

Pada analisis ke-empat, terdapat 4 model yang dibandingkan dari data 4 yang perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 13 dan Tabel 9.



Gambar 13. Model geometri pada data 4

Tabel 9. Nilai ketelitian model geometri jaringan data 4

Model	Figur	Jumlah GCP	RMSE thd GSD	CE90 (m)
3	Rangkaian segiempat	10	2,58	0,222
5	Rangkaian segitiga	10	6,33	0,545
6	Rangkaian segitiga	10	5,83	0,502
4	Rangkaian segiempat	8	5,89	0,507
8	Rangkaian segitiga	7	12,85	1,106
9	Rangkaian segitiga	7	8,09	0,697

Kuantitas titik kontrol untuk proses rektifikasi bukanlah faktor utama dalam menentukan kualitas ortofoto. Rektifikasi dengan jumlah titik kontrol paling banyak tidak selalu membuat hasil ketelitian menjadi paling baik. Hal tersebut dapat dilihat dari perbandingan akurasi terhadap model rektifikasi yang diurutkan dari jumlah GCP paling sedikit hingga terbanyak dimana terlihat ketidaklinieran hasil ketelitian terhadap penambahan jumlah GCP. Pengaruh bentuk geometri jaringan terhadap arah kesalahan yang ditunjukkan dalam vektor eror menunjukkan pola yang acak. Hal ini terjadi karena semua kesalahan berkontribusi secara merata dalam pemrosesan *bundle adjustment*.

IV.2 Analisis Skala Hasil Rektifikasi

IV.2.1 Analisis Skala Variasi Jarak

1. Data 2

Analisis skala yang dilakukan pada data 2 dengan luas area 154 km² dipaparkan dalam Tabel 10. Berdasarkan hasil analisis skala, dapat dilihat kategori skala 1:5.000 dapat dipenuhi oleh model 8 dan 3 yang memiliki selisih jarak 0.72 km. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi optimal untuk skala 1:5.000 yaitu dengan jarak 5,21 km antar GCP dibanding menggunakan jarak 4,49 km.

Tabel 10. Analisis skala variasi jarak data 2

Model	Jarak Rata-Rata (km)	CE 90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
				1	2	3
1	3,52	1,095	1:2.500	0,5	0,75	1,25
8	4,49	1,259	1:5.000	1	1,5	2,5
3	5,21	1,679	1:5.000	1	1,5	2,5
5	7,69	2,945	1:10.000	2	3	5

2. Data 3

Analisis skala yang dilakukan pada data 3 dengan luas area 10 km² dipaparkan dalam Tabel 11.

Tabel 11. Analisis skala variasi jarak data 3

Model	Jarak Rata-Rata (km)	CE 90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
				1	2	3
5	0,858	0,098	1:250	0,05	0,075	0,125
6	0,988	0,104	1:250	0,05	0,075	0,125
1	0,988	0,110	1:250	0,05	0,075	0,125
2	1,376	0,117	1:250	0,05	0,075	0,125

Berdasarkan hasil analisis skala, dapat dilihat bahwa ke-empat model pada data 3 dapat digunakan untuk peta skala 1:250 pada kelas 3. Dapat disimpulkan skala terbesar yang dapat digunakan yaitu 1:250 untuk jarak antar GCP paling optimal yaitu 1,38 km pada data 3 ini.

3. Data 4

Analisis skala yang dilakukan pada data 4 dengan luas area 38 km² dipaparkan dalam Tabel 12.

Tabel 12. Analisis skala variasi jarak data 4

Model	Jarak Rata-Rata (km)	CE 90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
				1	2	3
2	1,97	0,223	1:500	0,1	0,15	0,25
3	2,84	0,222	1:500	0,1	0,15	0,25
4	3,52	0,507	1:2.500	0,5	0,75	1,25

Berdasarkan hasil analisis skala, model 2 dan 3 memenuhi skala yang sama pada kategori 1:500. Perlu diperhatikan bahwa model 2 dan 3 memiliki selisih jarak 0,87 km. Untuk itu disimpulkan bahwa konfigurasi optimal untuk memenuhi skala 1:500 yaitu dengan interval GCP 2,84 km. Model 4 yang terpaut selisih jarak 0,68 km dari model 3 tidak dapat memenuhi kategori skala yang sama dengan 2 model sebelumnya.

IV.2.2 Analisis Skala Geometri Jaringan

1. Data 1

Analisis skala yang dilakukan pada data 1 dengan bentuk area meluas dipaparkan dalam Tabel 13. Berdasarkan hasil analisis skala, dapat diketahui bahwa 9 model memenuhi syarat untuk peta dengan skala 1:1.000 antara lain model 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 dan 11. Apabila diperhatikan dari jumlah GCP yang digunakan, konfigurasi optimal untuk skala 1:1.000 yaitu menggunakan 5 GCP dengan geometri jaringan segiempat terpusat. Sedangkan pada kategori skala 1:2.500 hanya dipenuhi oleh model 12 dengan geometri jaringan segiempat menggunakan 4 GCP.

Tabel 13. Analisis skala model geometri jaringan data 1

Model	Figur	Jumlah GCP	CE90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
					1	2	3
11	Segiempat terpusat	5	0,183	1:1.000	0,2	0,3	0,5
4	Poligon terpusat	10	0,205	1:1.000	0,2	0,3	0,5
7	Segiempat terpusat	11	0,219	1:1.000	0,2	0,3	0,5
8	Segiempat	10	0,251	1:1.000	0,2	0,3	0,5
2	Poligon terpusat	7	0,269	1:1.000	0,2	0,3	0,5
6	Poligon terpusat	7	0,282	1:1.000	0,2	0,3	0,5
3	Poligon	9	0,283	1:1.000	0,2	0,3	0,5
9	Segiempat terpusat	7	0,317	1:1.000	0,2	0,3	0,5
10	Poligon	6	0,338	1:1.000	0,2	0,3	0,5
12	Segiempat	4	0,572	1:2.500	0,5	0,75	1,25

2. Data 2

Analisis skala yang dilakukan pada data 2 dengan bentuk area meluas dipaparkan dalam Tabel 14.

Tabel 14. Analisis skala model geometri jaringan data 2

Model	Figur	Jumlah GCP	CE90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
					1	2	3
11	Poligon terpusat	12	1,243	1:5.000	1	1,5	2,5
10	Poligon terpusat	24	1,274	1:5.000	1	1,5	2,5
6	Poligon	23	1,493	1:5.000	1	1,5	2,5
12	Poligon	8	1,597	1:5.000	1	1,5	2,5
7	Poligon	11	1,658	1:5.000	1	1,5	2,5
14	Rangkaian segitiga	5	2,159	1:5.000	1	1,5	2,5
13	Poligon	7	2,220	1:5.000	1	1,5	2,5

Berdasarkan hasil analisis skala, 7 model yang direktifikasi pada data 2 memenuhi syarat untuk peta dengan skala 1:5.000. Apabila diperhatikan dari jumlah GCP yang digunakan, maka dapat disimpulkan yaitu konfigurasi optimal untuk skala 1:5.000 menggunakan 5 GCP dengan geometri rangkaian segitiga.

3. Data 3

Analisis skala yang dilakukan pada data 3 dengan bentuk area memanjang dipaparkan dalam **Tabel 15**.

Tabel 15. Analisis skala model geometri jaringan data 3

Model	Figur	Jumlah GCP	CE90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
					1	2	3
5	Rangkaian segiempat terpusat	17	0.098	1:250	0,05	0,075	0,125
1	Rangkaian segiempat	14	0.110	1:250	0,05	0,075	0,125
7	Rangkaian segitiga	10	0.113	1:250	0,05	0,075	0,125
8	Rangkaian segitiga	10	0.165	1:250	0,05	0,075	0,125

Berdasarkan hasil analisis skala, ke-empat model pada data 3 dapat memenuhi kategori skala yang sama yaitu 1:250. Apabila diperhatikan dari jumlah GCP, konfigurasi optimal untuk skala 1:250 yaitu dengan geometri rangkaian segitiga menggunakan 10 GCP.

4. Data 4

Analisis skala yang dilakukan pada data 4 dengan bentuk area memanjang dipaparkan dalam **Tabel 16**.

Tabel 16. Analisis skala model geometri jaringan data 4

Model	Figur	Jumlah GCP	CE90 (m)	Skala	Kelas Ketelitian Peta		
					1	2	3
3	Rangkaian segiempat	10	0.222	1:1.000	0,2	0,3	0,5
6	Rangkaian segitiga	10	0.502	1:2.500	0,5	0,75	1,25
4	Rangkaian segiempat	8	0.507	1:2.500	0,5	0,75	1,25
5	Rangkaian segitiga	10	0.545	1:2.500	0,5	0,75	1,25
9	Rangkaian segitiga	7	0.697	1:2.500	0,5	0,75	1,25
8	Rangkaian segitiga	7	1.106	1:2.500	0,5	0,75	1,25

Berdasarkan hasil analisis skala, hanya model 3 pada data 4 yang memenuhi syarat untuk peta skala 1:1.000. Sedangkan model 4, 5, 6, 8 dan 9 masuk dalam kategori skala 1:2.500. Apabila diperhatikan dari jumlah GCP yang digunakan, konfigurasi optimal untuk skala 1:2.500 yaitu dengan geometri rangkaian segitiga tunggal menggunakan 7 GCP.

IV.3 Analisis Konfigurasi GCP Optimal

Konfigurasi GCP optimal dalam penelitian ini ditinjau dari dua aspek yaitu jarak, dan desain geometri dari GCP. Jarak antar GCP pada suatu model berhubungan dengan kepadatan sebaran titik kontrol. Konsep umum mengenai hal ini yaitu semakin padat

sebaran titik kontrol maka semakin baik ketelitiannya. Jarak antar GCP optimal terhadap data pada penelitian ini berhasil diketahui dari hasil rektifikasi yang dilakukan antara lain:

- a. Skala 1:250 dengan jarak terjauh $\pm 1,3$ km berdasarkan 4 model dengan jarak 0,86; 0,99; 0,99 dan 1,38 km.
- b. Skala 1:500 dengan jarak terjauh $\pm 2,8$ km berdasarkan 2 model dengan jarak 1,97 dan 2,84 km.
- c. Skala 1:2500 dengan jarak terjauh $\pm 3,5$ km berdasarkan 2 model dengan jarak 3,52 km.
- d. Skala 1:5000 dengan jarak terjauh $\pm 5,2$ km berdasarkan 2 model dengan jarak 4,49 dan 5,21 km.

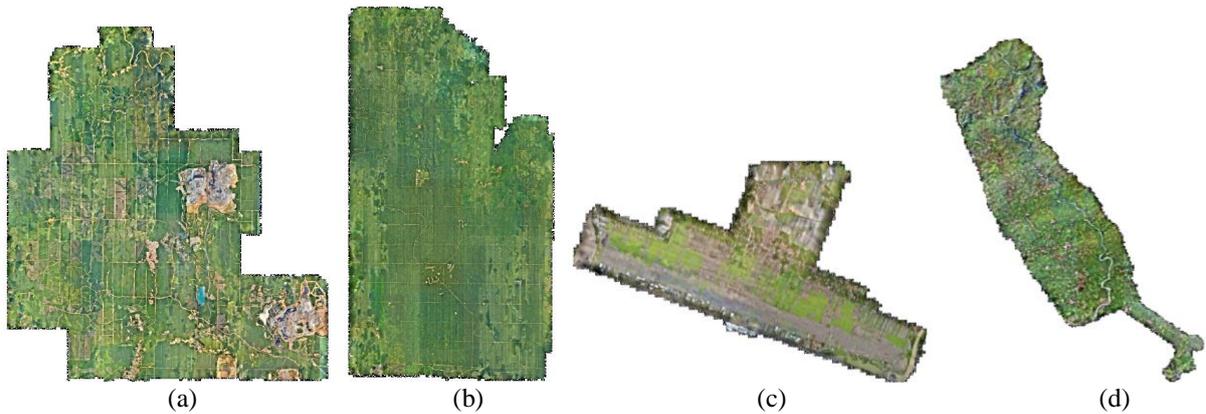
Desain geometri jaringan GCP pada hasil penelitian ini menyajikan pengaruh yang bervariasi. Geometri GCP yang didesain pada model berhubungan dengan distribusi titik kontrol. Konsep umum mengenai hal ini yaitu semakin merata distribusi titik kontrol maka semakin baik kualitas rektifikasi yang dilakukan. Hasil yang didapat menunjukkan geometri tertentu cenderung lebih efektif ketika digunakan untuk bentuk area tertentu pula yang dijelaskan sebagai berikut:

- a. Data dengan bentuk area meluas lebih efektif menggunakan konfigurasi dengan dengan titik kontrol pada pojok-pojok dan pusat area survei. Pada penelitian ini hasil tersebut disimpulkan dari model geometri segiempat terpusat yang direktifikasi pada data 1 dengan bentuk area meluas.
- b. Data dengan bentuk area memanjang lebih efektif menggunakan konfigurasi berbentuk zig-zag pada sisi-sisi panjangnya. Pada penelitian ini hasil tersebut disimpulkan dari model geometri rangkaian segitiga yang direktifikasi pada data 2, 3 dan 4 dengan bentuk area yang cenderung memanjang pada satu sisi.

Aspek kuantitas GCP sebenarnya sangat berpengaruh pada kualitas hasil ortofoto, dengan prinsip umum semakin tinggi kuantitas semakin baik kualitas model. Namun dapat dilihat pada penelitian ini bahwa jumlah GCP terhadap desain geometri yang berbeda memiliki pengaruh yang tidak berpola. Untuk itu jumlah optimal yang harus digunakan dalam proses rektifikasi untuk menghasilkan ketelitian tertentu masih belum dapat disimpulkan dengan pasti pada penelitian ini.

IV.4 Hasil dan Analisis Ortomozaik

Produk ortofoto dibentuk oleh perangkat lunak Agisoft Photoscan dalam proses *build orthomosaic*. Dilakukan pembentukan ortomozaik pada 10 model dimana tiap data penelitian memiliki ortomozaik minimal 2 produk untuk keperluan perbandingan. Pembentukan ortomozaik pada data 1 dilakukan pada model 2, 4 dan 11, pada data 2 dilakukan pada model 3 dan 6. Pembentukan ortomozaik pada data 3 dilakukan pada model 1, 5 dan 6, pada data 4 dilakukan pada model 2 dan 3. Produk ortomozaik model 2 data 1, model 3 data 2, model 6 data 3 dan model 3 data 4 ditunjukkan pada **Gambar 14**. Kualitas rektifikasi ortomozaik pada semua model dapat memenuhi standar ASPRS dengan diwakilkan oleh nilai RMSE dari GCP yang lebih kecil dari 0,5 kali ukuran piksel untuk kelas 1,



Gambar 14. Produk ortomozaik model 2 data 1 (a), model 3 data 2 (b), model 6 data 3 (c) dan model 3 data 4 (d)

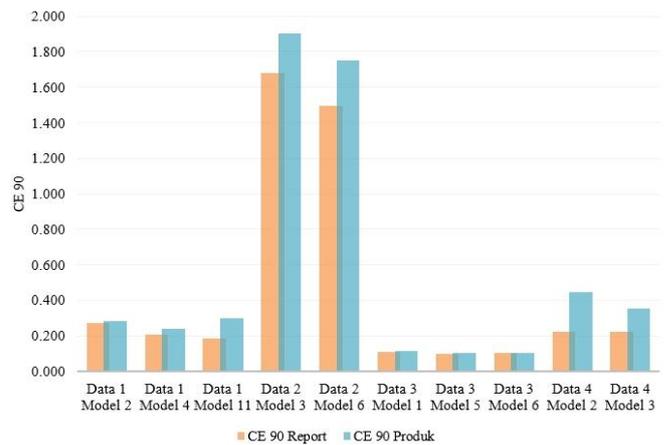
IV.5 Perbandingan Ketelitian dari Processing Report dan Produk Ortomozaik

Terdapat dua macam nilai ketelitian hasil rektifikasi foto udara yang dihasilkan pada penelitian ini. Yang pertama yaitu nilai yang dihitung oleh software Agisoft Photoscan dimana nilai tersebut didapat dari hasil *processing report*. Dan yang kedua yaitu nilai ketelitian yang diukur dua kali oleh peneliti dengan cara mengidentifikasi *premark* pada produk ortomozaik. Perbandingan ketelitian horizontal dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Perbandingan nilai hasil perhitungan ketelitian

No	Data	CE90 Report (m)	CE90 Produk (m)		Selisih (m)
			I	II	
1	Data 1 Model 2	0,269	0,271	0,299	0,015
2	Data 1 Model 4	0,205	0,232	0,249	0,036
3	Data 1 Model 11	0,183	0,286	0,309	0,114
4	Data 2 Model 3	1,347	1,914	1,895	0,225
5	Data 2 Model 6	1,493	1,760	1,745	0,259
6	Data 3 Model 1	0,110	0,109	0,116	0,003
7	Data 3 Model 5	0,117	0,100	0,106	0,005
8	Data 3 Model 6	0,098	0,098	0,106	0,004
9	Data 4 Model 2	0,223	0,429	0,459	0,221
10	Data 4 Model 3	0,507	0,352	0,355	0,131

Perbandingan dari kedua data pada Gambar 15 menunjukkan bahwa adanya perbedaan hasil ketelitian antara hasil *processing report* dengan hasil pengukuran pada produk ortomozaik. Berdasarkan perbandingan, nilai ketelitian CE 90 hasil perhitungan digital oleh Photoscan secara umum memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai ketelitian produk. Asumsi dalam penelitian ini bahwa nilai ketelitian dari hasil *report* dan produk sama-sama menunjukkan hasil yang valid, namun perbedaan antara nilai tersebut memang pasti terjadi akibat beberapa faktor. Ketelitian sebesar ±10 cm yang merupakan rata-rata selisih antara keduanya mungkin dapat menjadi ukuran toleransi perbedaan nilai antara ketelitian dari *processing report* dengan produk ortomozaik pada penelitian ini.



Gambar 15. Perbandingan nilai CE90 dari report dan produk

V. Penutup

V.1 Kesimpulan

Dari pembahasan hasil dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain:

1. Hasil ketelitian planimetrik berdasarkan 11 model yang diortorektifikasi dengan jarak rata-rata antar GCP yang bervariasi, menghasilkan akurasi relatif yang meningkat mulai dari 1,27 kali GSD untuk model terpendek dengan jarak 0,86 km hingga 20,35 kali GSD untuk model terpanjang dengan jarak 7,69 km. Dapat disimpulkan jarak antar GCP yang semakin panjang akan menghasilkan ketelitian planimetrik yang semakin buruk.
2. Hasil ketelitian planimetrik berdasarkan model yang diortorektifikasi dengan geometri jaringan yang berbeda-beda, menghasilkan data dengan ketelitian planimetrik yang sangat beragam:
 - a. Jenis geometri berbeda yang dibandingkan didapatkan hasil antara lain: (1) model rangkaian segiempat menghasilkan ketelitian yang lebih baik dibandingkan model rangkaian segitiga berdasarkan 6 perbandingan, (2) model segiempat menghasilkan ketelitian yang lebih baik dibandingkan model poligon berdasarkan 1 perbandingan, (3) model rangkaian segitiga menghasilkan ketelitian yang lebih baik dari model poligon berdasarkan 1 perbandingan, (4) model poligon terpusat menghasilkan ketelitian

- yang lebih baik dari model segiempat terpusat berdasarkan 3 perbandingan.
- b. Pada perbandingan antara geometri jaringan dengan titik pusat dengan geometri jaringan yang sama tanpa titik pusat, didapatkan kesimpulan bahwa model dengan titik pusat menghasilkan ketelitian yang lebih baik dibandingkan model tanpa titik pusat berdasarkan 8 perbandingan dengan rata-rata perbedaan 1,3 kali GSD.
 - c. Pada 11 perbandingan antara geometri yang sama, didapatkan kesimpulan bahwa model dengan bentuk jaringan yang sejenis tetap menghasilkan ketelitian yang berbeda ketika kuantitas dan distribusi GCP pada model tersebut juga berbeda.
3. Konfigurasi pada penelitian ini semuanya dapat memenuhi syarat ketelitian GCP untuk ortorektifikasi. Konfigurasi optimal untuk ortorektifikasi berdasarkan luas dan bentuk area dilakukan dengan analisis skala yang hasilnya dibahas tersendiri sebagai berikut:
 - a. Pada rektifikasi data 2 dengan luas area 154 km², menghasilkan produk yang dapat digunakan untuk peta skala 1:2.500 dengan jarak optimal antar GCP 3,53 km, peta skala 1:5.000 dengan jarak antar GCP 5,21 km dan peta skala 1:10.000 dengan jarak optimal antar GCP 7,69 km. Untuk data 4 dengan luas 38 km², hasil rektifikasi dapat digunakan untuk peta skala 1:500 dengan jarak optimal 2,84 km dan peta skala 1:2500 dengan jarak 3,52 km. Untuk luas 10 km² yaitu data 3, hasil rektifikasi dapat digunakan untuk peta skala 1:250 dengan jarak optimal antar GCP 1,38 km.
 - b. Pada rektifikasi data foto udara dengan bentuk area meluas yaitu pada data 1, menghasilkan produk yang dapat digunakan untuk peta skala 1:1000 dengan konfigurasi optimal menggunakan segiempat terpusat dengan 5 GCP. Untuk data 2 dengan bentuk area meluas, dihasilkan produk yang dapat digunakan untuk peta skala 1:5000 menggunakan konfigurasi optimal rangkaian segitiga tunggal dengan 5 GCP. Sedangkan untuk data 3 dengan bentuk area memanjang, dihasilkan produk yang dapat digunakan untuk peta skala 1:250 dengan konfigurasi optimal rangkaian segitiga tunggal dengan 10 GCP. Selain itu untuk data 4 dengan bentuk area memanjang, dihasilkan produk yang dapat digunakan untuk peta skala 1:1000 menggunakan konfigurasi optimal rangkaian segiempat tunggal dengan 10 GCP.
2. Penelitian mengenai variasi jarak dan geometri jaringan lebih baik menggunakan data yang diakuisisi langsung sehingga model dapat diatur sesuai yang ingin diteliti.
 3. Apabila berfokus pada konfigurasi titik kontrol untuk diteliti baiknya menggunakan satu data dengan variasi model yang banyak, hal ini untuk menghindari adanya pengaruh dari karakteristik data apabila menggunakan banyak data dengan hanya beberapa model untuk tiap data.
 4. Perlu pengkajian lebih lanjut mengenai cara kerja perangkat lunak Agisoft Photoscan terkait algoritma dan teknik komputasi yang digunakan, hal ini untuk memahami pengaruh lain yang bersumber dari bawaan perangkat lunak.
 5. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai faktor jarak dan desain geometri dengan menggunakan data yang berbeda untuk mengetahui kesesuaian penerapan dari hasil penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada PT. Aero Geosurvey Indonesia atas dukungan dan bimbingannya dalam penelitian ini, serta bantuannya dalam memfasilitasi data dan alat untuk digunakan sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

Daftar Pustaka

- Bäumker, M. dan Heimes, F. J. (2001). *New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System*. FH Bochum University of Applied Sciences.
- BIG. (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Zurich: Institute of Geodesy and Photogrammetry.
- Kasser, M. dan Polidori, L. (2002). *From the aerial image to orthophotography: different levels of rectification*. Dalam Kasser M. & Egels Y. (Ed.) *Digital Photogrammetry*. London, Taylor & Francis, 2002, p. 282-287.
- Takeuchi, W. (1996). *Geometric Distortions of the Image*. <http://wtlab.iis.u-kyo.ac.jp/wataru/lecture/rsgis/rsnote/cp9/cp9-3.htm> [Diakses pada 18 September 2018].
- Temiz, M. H. dan Külür, S. (2008). *Rectification Of Digital Close Range Images: Sensor Models, Geometric Image Transformations And Resampling*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing.
- Wolf, P. R. (1983). *Elemen Fotogrametri*. Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.
- Wolf, P. R. dan Ghilani, C. D. (2006). *Adjustment Computations*. Kanada: John Wiley & Sons, Inc.

V.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat disampaikan oleh penulis untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Pemodelan konfigurasi yang diteliti hendaknya sebisa mungkin ideal agar didapatkan hasil yang komparatif.