

Pemanfaatan Foto Udara Format Kecil untuk Ekstraksi Digital Elevation Model dengan Metode Stereoplotting

Taufik Hery Purwanto

Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Email Koresponden: taufik@ugm.ac.id

Diterima: 16 Agustus 2016/Disetujui: 20 Februari 2017/ Publikasi online: 31 Maret 2017
© 2017 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

Abstrak Perkembangan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sebagai wahana dan kamera digital non-metrik sebagai sensor semakin mempermudah dalam akuisisi data foto udara Foto Udara Format Kecil (FUFK). Penelitian ini bertujuan menerapkan metode stereoplotting digital untuk menghasilkan Digital Elevation Model (DEM) dari FUFK hasil pemotretan udara dengan wahana UAV sebagian bukit Jering yang merupakan lokasi pembangunan perumahan murah bersubsidi di Godean Jogja Hill's. Metode penelitian ini meliputi: proses perencanaan (perencanaan jalur terbang, pelaksanaan pemotretan udara), pengolahan data (kalibrasi kamera, koreksi foto udara, stereoplotting, interpolasi), dan uji akurasi. Hasil penelitian adalah blok FUFK dan DEM dengan metode stereoplotting. Kesimpulan dari penelitian ini adalah FUFK yang diperoleh dari UAV memiliki distorsi lensa yang cukup besar, oleh karena itu stereoplotting interaktif dapat diterapkan pada FUFK dengan hasil yang cukup baik jika FUFK yang digunakan telah terkoreksi dari distorsi, terutama distorsi lensa. Akurasi absolut DEM yang dihasilkan memiliki HRMSE sebesar 0.073 meter dengan horizontal accuracy yang mencapai 0.121 meter, sedangkan RMSEz yang dimiliki hanya mampu mencapai 0.482 meter dengan vertical accuracy yang mencapai 0.793 meter pada tingkat kepercayaan 90%. Berdasarkan DEM yang diperoleh, maka dapat digunakan untuk merepresentasikan konfigurasi permukaan bukit dan menghitung volume sebagian bukit Jering yang telah dikeruk sebesar 55.953,813 m³.

Kata kunci: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Foto Udara Format Kecil (FUFK), Stereoplotting

Abstract The development of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) as a vehicle and non-metric digital camera as a sensor further simplify the data acquisition of Small Format Aerial Photography (SFAP). This study aims to apply digital stereoplotting method for generating Digital Elevation Model (DEM) of SFAP results of aerial photography with UAV on the Jering hill which is cheap subsidized housing location named Godean Yogyakarta Hill's. This research method includes: flight planning (flight paths, aerial photography acquisition), data processing (camera calibration, correction of aerial photographs, stereoplotting, interpolation), and accuracy test. Results of the research was SFAP block and DEM generated from stereoplotting method. The conclusion of this study is SFAP obtained from UAV has a lens distortion is large, and therefore can be applied to interactive stereoplotting SFAP with fairly good results if SFAP used has been corrected of distortion, especially distortion lens (idealized). The absolute accuracy of the resulting DEM have HRMSE of 0,073 meters with a horizontal accuracy which reaches 0,121 meters, while RMSEz only able to reach 0,482 meters with a vertical accuracy which reaches 0793 meters at 90% confidence level. Based on the DEM obtained, it can be used to represent the surface configuration and to calculate the volume partially Jering hill that has been dredged out for is 55.953,813 m³.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Small Format Aerial Photography (SFAP), Stereoplotting

PENDAHULUAN

Fotogrametri semakin berkembang pesat sejak foto udara mulai digunakan dalam pemetaan topografi pada tahun 1849 oleh Colonel Aime Laussedat yang merupakan Bapak Fotogrametri. Balon udara dan layang-layang merupakan wahana paling modern yang digunakan pada saat itu hingga ditemukannya pesawat terbang oleh Wright bersaudara pada tahun 1902. Sejak saat itu, pesawat terbang mulai digunakan untuk melakukan pemotretan udara yang kemudian diimbangi dengan berkembangnya kamera metrik sebagai sensor pemotretan. Selain mampu merekam daerah cakupan yang luas. Penerapan kamera metrik pada wahana pesawat terbang mampu menghasilkan kualitas foto udara yang baik, tetapi biaya pemotretan yang harus dikeluarkan menjadi sangat mahal (Wolf,

1993).

Sejak dekade terakhir, fotogrametri dengan pesawat tanpa awak atau Unmanned Aerial Vehicle (UAV) telah menjadi perhatian sebagai teknologi baru untuk pemetaan topografi (Blom, 2006). Munculnya UAV dapat menjawab mahalnya biaya pemotretan udara dengan pesawat terbang. Menurut Saadatseresht et al. (2015), alasan utama penggunaan fotogrametri dengan UAV adalah biaya yang lebih murah, lebih aman, lebih berkualitas, lebih populer dan lebih mudah diadaptasikan untuk pemetaan daerah yang relatif kecil. Keunggulan pada fotogrametri dengan UAV tersebut dapat dicapai menurut Saadatseresht et al. (2015), jika beberapa tantangan dapat dipecahkan seperti: merancang desain UAV karena ruang yang terbatas, berat dan penempatan komponen dalam tubuh

UAV, aspek operasional pada saat take-off, terbang dan pendaratan, uji penerbangan, pengalaman pilot terampil, lisensi penerbangan dan pemotretan, masalah pengolahan data yang besar dan kompleks, keterbatasan penerbangan karena kondisi di udara dan di darat pada saat penerbangan, topografi, angin, cahaya, kondisi lokasi pemotretan, batas telekomunikasi, tinggi terbang dan durasi penerbangan.

Ditinjau dari efisiensi biaya pada pemetaan menggunakan metode foto udara sangat dipengaruhi oleh jenis kamera dan wahana yang digunakan (Gularso, 2015). Penggunaan jenis kamera standar non-metrik berformat kecil sebagai instrumen pemotretan udara dikenal dengan istilah Foto Udara Format Kecil (FUFK). Penggunaan kamera digital non metrik untuk aplikasi fotogrametri makin berkembang, dengan didukung oleh perkembangan perangkat lunak yang tersedia dan harga kamera digital non metrik yang relatif murah dengan spesifikasi yang bagus (Putera, 2013).

Foto udara yang diambil dengan kamera non-metrik ini tentu saja tidak dapat langsung digunakan begitu saja sebelum distorsi yang ada terkoreksi dan pengolahan data dengan metode fotogrametri yang benar, sehingga menghasilkan hasil pengukuran dengan akurasi tinggi. Seiring perkembangan ilmu dan teknologi, metode pengolahan foto udara dalam fotogrametri pun semakin meningkat. Menurut Soetaat (2002), era sekarang adalah generasi ketiga fotogrametri atau disebut dengan fotogrametri digital atau generasi softcopy photogrammetry, yang memungkinkan penerapan model matematika

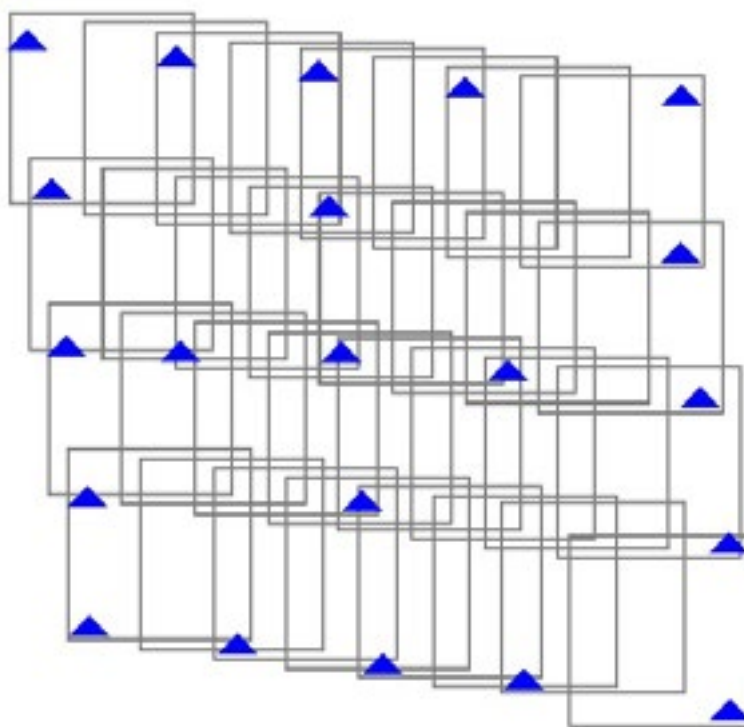
pada analisis fotogrametri dengan perangkat lunak pengolahan foto udara digital. Generasi pertama, merupakan era dari plotter analog, sedangkan generasi kedua merupakan era plotter analitik.

DAT/EM Summit Evolution merupakan salah satu sistem fotogrametri digital workstation yang baik untuk melakukan stereoplotting (DAT/EM, 2015). Sistem ini mampu menggantikan prinsip stereoplotter analog tetapi tetap mempunyai prinsip kerja stereoplotter fotogrametri, dimana proses orientasi dalam (interior orientation), orientasi luar (exterior orientation), pembuatan model-stereo, digitasi dan plotting dilakukan secara digital. Hasil yang diperoleh dapat berupa data vektor yang telah memiliki informasi 3 Dimensi (3D) atau yang sering dikenal sebagai 3D vector. Data 3D vector yang dihasilkan ini dapat diinterpolasi untuk menghasilkan model 3 dimensi atau yang lebih dikenal dengan sebutan Digital Elevation Model (Purwanto, 2000). Penelitian ini bertujuan mengkaji penerapan metode stereoplotting untuk menghasilkan DEM dari FUFK hasil pemotretan udara dengan wahana UAV dan kamera digital non metrik.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian adalah sebagian bukit Jering di kecamatan Godean, Kabupaten Sleman DIY. Lokasi ini direncanakan dan sedang dalam proses persiapan pembangunan perumahan murah bersubsidi Godean Jogja Hill's.

Alat Penelitian menggunakan UAV DJI Phantom 3 Professional, wahana yang digunakan untuk pemotretan udara daerah kajian. Kamera digital non



Gambar 1. Rencana Distribusi GCPs (DAT/EM, 2015)

metrik DJI FC300X 12 Megapixel, sensor kamera yang diterapkan pada wahana untuk perekaman FUFK. GPS geodetik Leica Net Rover GS08 dan CS10, untuk pengukuran koordinat Ground Control Points (GCPs) dan Independent Check Points (ICPs) di lapangan. Komputer 3D-Vision untuk mendukung perangkat lunak DAT/EM Summit Evolution versi 7.0 Perangkat lunak (software) yang terdiri dari : (1) PhotoModeller Scanner versi 6, perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan proses kalibrasi kamera dan proses idealize untuk mengoreksi distorsi pada FUFK berdasarkan data hasil kalibrasi kamera. (2) DAT/EM Summit Evolution versi 7.0, perangkat lunak fotogrametri digital yang digunakan untuk melakukan stereoplotting secara interaktif. (3) ArcGIS versi 10.3, perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan interpolasi pada data 3D vector hasil stereoplotting hingga diperoleh Digital Elevation Model (DEM), menghitung volume, dan penyajian hasil.

Penelitian ini terdiri dari 3 tahapan utamam yaitu: tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data hasil pemotretan UAV dengan metode stereoplotting digital, dan pengaplikasian hasil pengolahan data berupa DEM untuk pengukuran volume bukit.

Pengumpulan data pada penelitian ini adalah pemotretan dengan UAV menggunakan DJI Phantom 3 Professional untuk memperoleh FUFK stereo yang akan diproses untuk menghasilkan DEM dengan metode stereoplotting digital menggunakan perangkat lunak Softcopy Photogrammetry yaitu: DAT/EM Summit Evolution versi 7.0.

Perencanaan terbang yang mendasar dan sangat penting dilakukan sebelum pemotretan udara perencanaan jalur terbang. Jalur ini direncanakan berdasarkan bentuk dan luasan lokasi pemotretan. Setelah jalur terbang direncanakan, jumlah dan lokasi eksposur dapat diperkirakan berdasarkan persentase endlap dan sidelap yang dikehendaki. Adapun endlap yang direncanakan dalam penelitian ini adalah sebesar 60% dengan sidelap sebesar 20%.

Perencanaan Ground Control Points (GCPs) dan Independent Check Points (ICPs), Lokasi GCPs direncanakan berdasarkan jalur terbang beserta lokasi eksposur di sepanjang jalur terbang yang telah direncanakan tersebut. Sedapat mungkin GCPs diletakkan menyebar di setiap lebar foto dengan rencana distribusi seperti pada Gambar 1. Adapun ICPs dalam hal ini ditentukan dengan metode selective sampling, di mana distribusinya (jumlah dan kerapatan) ditentukan berdasarkan variasi terrain. Lokasi dengan variasi terrain yang lebih kompleks akan diberikan ICPs dengan jumlah dan kerapatan yang lebih tinggi.

Setelah distribusi GCPs dan ICPs tersebut direncanakan, kemudian akan dilakukan pengukuran terestris koordinat tanah (X, Y, Z) dari setiap GCPs dan ICPs yang telah direncanakan tersebut. Untuk memperoleh hasil pengukuran koordinat GCPs dan ICPs dengan ketelitian tinggi maka dalam hal

ini digunakan GPS geodetik. GCPs dan ICPs yang sudah diukur di lapangan kemudian akan diberikan tanda (pre-mark) dengan bentuk tanda (+) berwarna merah dengan diameter sebesar 1 meter sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pre-mark

Setelah semua pre-mark pada GCPs dan ICPs tersebut terpasang, pemotretan udara dapat dilaksanakan dengan memperhatikan cuaca. Pemotretan dengan UAV mengikuti aturan dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 180 Tahun 2015 tentang Pengendalian Pengoperasian Sistem Pesawat Udara Tanpa Awak di Ruang Udara yang dilayani Indonesia.

Hasil perekaman FUFK menggunakan UAV selanjutnya diolah berdasarkan kaidah fotogrametri digital menggunakan streoplotting digital.

Terkait besarnya distorsi yang ada pada FUFK, kalibrasi kamera merupakan hal mendasar yang sangat penting dilakukan untuk mendapatkan konstanta distorsi atau yang sering disebut sebagai parameter kalibrasi kamera. Adapun metode kalibrasi kamera yang dipilih untuk diterapkan dalam penelitian ini adalah metode In-Field Calibration, di mana proses kalibrasi akan dilakukan menggunakan target (calibration pattern). Dalam hal ini calibration pattern akan dipotret sebanyak 2 kali pada masing-masing sisinya secara portrait dan landscape dengan sudut pemotretan yang berbeda serta 1 kali pada masing-masing sudutnya, sehingga total akan diperoleh 12 buah foto. 12 buah foto ini kemudian akan diproses untuk menghitung nilai parameter kalibrasi kamera yang terdiri dari K1, K2, K3, P1, P2, pergeseran principal point (offset), ukuran (format) sensor yang sebenarnya dan nilai panjang fokus kamera (focal length) yang sebenarnya. K1, K2, K3 merupakan konstanta distorsi radial lensa diukur dari pusat lensa, sedangkan P1 dan P2 merupakan konstanta distorsi tangensial lensa. Dalam hal ini konstanta distorsi atau parameter kalibrasi tersebut akan dihitung menggunakan PhotoModeller Scanner versi 6 yang menerapkan metode space resection berdasarkan persamaan colinearity dalam perhitungannya.

Konstanta distorsi atau parameter kalibrasi kamera

yang diperoleh dari tahap kalibrasi kamera merupakan data utama yang diperlukan untuk melakukan koreksi foto (idealize). Berdasarkan konstanta distorsi tersebut, FUFK akan direstorasi (dikembalikan) pada keadaan yang mendekati ideal tanpa distorsi. Hasil koreksi ini akan sangat tergantung pada tingkat akurasi hasil kalibrasi kamera. Sama dengan proses kalibrasi kamera, proses idealize dalam penelitian ini juga akan dilakukan menggunakan PhotoModeller Scanner versi 6.

Menurut Pranadita (2013), stereoplotting merupakan metode pengumpulan data yang dilakukan dengan cara digitisasi titik obyek dari foto stereo secara tiga dimensi, sehingga dapat diperoleh data vektor yang memiliki nilai ketinggian. Pada dasarnya stereoplotting dapat dilakukan dengan dua cara yaitu, stereoplotting otomatis dan stereoplotting interaktif (Habib, 2007). Keuntungan penggunaan stereoplotting interaktif adalah diperoleh data 3D dengan akurasi tinggi serta obyek-obyek yang diinginkan (Pranadita, 2013). Sebelum stereoplotting dilakukan, dalam hal ini perlu dilakukan restitusi pada FUFK yang telah terkoreksi hingga dapat dilakukan pengamatan 3D darinya. Restitusi atau yang dikenal sebagai proses orientasi pada dasarnya merupakan proses untuk merekonstruksi FUFK sesuai dengan kondisi pada saat pemotretan sehingga dapat terbentuk model 3D dan dapat diperoleh informasi dari data yang terekam.

Restitusi atau orientasi ini pada dasarnya terdiri dari dua tahap, yaitu Orientasi Dalam (Interior Orientation) dan Orientasi Luar (Exterior Orientation). Adapun Exterior Orientation tersebut dapat dilakukan secara langsung melalui Aerial Triangulation ataupun dibagi menjadi dua tahap melalui Relative Orientation kemudian dilanjutkan dengan Absolute Orientation.

Dalam penelitian ini akan diterapkan metode yang kedua, yaitu melalui Relative Orientation kemudian dilanjutkan dengan Absolute Orientation sebagaimana dapat diilustrasikan pada Gambar 3. Adapun stereoplotting dalam penelitian ini akan dilakukan secara interaktif menggunakan DAT/EM Summit Evolution versi 7.0 yang diintegrasikan dengan ArcGIS 10.3.

Ada berbagai metode interpolasi yang dapat diterapkan, mulai dari kriging, spline, IDW dsb. Namun demikian, melihat data yang dihasilkan dari proses stereoplotting merupakan 3D vector dengan tipe point, line dan polygon, maka dalam hal ini dipilih metode Topo To Raster sebagai metode interpolasi yang mampu mengakomodasi ketiga tipe data vektor tersebut.

Untuk mengetahui kualitas Digital Elevation Model (DEM) yang mampu dihasilkan, maka perlu dilakukan uji akurasi (accuracy assessment). Nilai akurasi sebagai hasil dari uji akurasi ini akan dinyatakan dalam dua nilai, yaitu akurasi absolut (absolute accuracy) maupun akurasi relatif (relative accuracy).

Akurasi absolut (absolute accuracy) diperoleh dengan membandingkan nilai koordinat tanah masing-

masing Independent Check Points (ICPs) pada Digital Elevation Model (DEM) dengan nilai koordinat tanah hasil pengukuran terestris masing-masing ICPs tersebut. Nilai akurasi absolut dalam penelitian ini akan dinyatakan dalam dua nilai, yaitu akurasi absolut pada komponen vertikal (vertical accuracy) dan akurasi absolut pada komponen horizontal (horizontal accuracy). Menurut Mauney (2002) dalam Nugroho (2003), akurasi dari suatu pengukuran pada tingkat kepercayaan tertentu dapat diperoleh dengan mengalikan RMSE (Root Mean Square Error) dengan faktor pengali pada tingkat kepercayaan tersebut.

Menurut Lang (1999) dalam Nugroho (2003), nilai RMSE untuk vertikal (RMSE_z atau Vertical RMSE) dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$RMSE_z = \sqrt{((\sum (Z_{ground\ i} - Z_{dem\ i})^2)/(n-1))}.....(1)$$

Keterangan :

RMSE_z : nilai root mean square error untuk komponen vertikal (Z)

Z_{ground i} : nilai elevasi pada titik cek ke i

Z_{dem i} : nilai elevasi titik cek ke i pada DEM

n : jumlah titik cek

Sedangkan nilai RMSE untuk komponen horizontal (HRMSE atau Horizontal RMSE) dapat dihitung dengan Persamaan 2.

$$HRMSE = \sqrt{(((\sum (X_{ground\ i} - X_{demi})^2) + (\sum (Y_{ground\ i} - Y_{dem\ i})^2))/(n-1))}..(2)$$

Keterangan :

HRMSE : nilai root mean square error untuk komponen horizontal (X,Y)

X_{ground i} : nilai koordinat X pada titik cek ke i

X_{dem i} : nilai koordinat X titik cek ke i pada DEM

Y_{ground i} : nilai koordinat Y pada titik cek ke i

Y_{dem i} : nilai koordinat Y titik cek ke i pada DEM

n : jumlah titik cek

Setelah RMSE masing-masing komponen diketahui, maka tingkat akurasi untuk masing-masing komponen dari DEM tersebut dapat dicari dengan Persamaan 3.

$$Accuracy = E \times RMSE(3)$$

E merupakan faktor pengali σ pada suatu tingkat kepercayaan. Nilai faktor pengali tersebut menurut Wolf (1997) dapat dinyatakan dalam Tabel 1.

Relative accuracy dalam penelitian ini didasarkan pada hasil pengamatan secara visual terhadap kualitas Digital Elevation Model (DEM) yang dihasilkan dalam merepresentasikan permukaan terrain yang diwakilinya. Hal ini dilakukan dengan membentuk DEM dalam bentuk bird's eye view. Adapun pengamatan secara visual ini ditujukan pada aspek seberapa baik



Gambar 3. Restitusi FUFK sebelum Proses Stereoplotting (DAT/EM, 2015)

dan realistik DEM tersebut dalam menyajikan bentuk permukaan medan yang diwakilinya.

Berdasarkan DEM yang dihasilkan dan selanjutnya diaplikasinya untuk menghitung volume material sebagian bukit Jering di Kecamatan Godean yang telah diambil untuk lokasi perumahan murah bersubsidi Godean Jogja Hill's.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemotretan Foto Udara Format Kecil (FUFK) Sebagian Bukit Jering Kecamatan Godean. Hasil pemotretan udara yang dilakukan pada tanggal 28 Agustus 2016 diperoleh 1 blok FUFK sebagian daerah bukit Jering yang terdiri dari 15 buah foto dan terbagi dalam 2 jalur terbang (run). Pemotretan udara dilakukan sekitar pukul 10.00 sampai dengan 11.00 WIB menggunakan wahana DJI Phantom 3 Professional. Resolusi spasial FUFK yang diambil dari ketinggian sekitar 120 meter ini mampu mencapai sekitar 5 cm. Adapun mosaik foto udara dalam blok FUFK sebagian daerah Jering yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.

DJI Phantom 3 Professional yang digunakan sebagai wahana untuk melakukan pemotretan udara ini membawa sensor dengan model FC300X yang merupakan kamera digital non-metrik. FC300X menggunakan sensor CMOS dengan dimensi 6,16 x 4,62 mm yang mampu menghasilkan image dengan dimensi piksel sebesar 4000 x 3000 piksel. Jadi dalam satu frame foto akan terdapat 12.000.000 piksel. Dibandingkan dengan kamera metrik, tentu saja kamera non-metrik akan menghasilkan foto dengan distorsi yang jauh lebih besar, terutama distorsi lensa, baik distorsi radial maupun distorsi tangensial, sehingga kalibrasi kamera merupakan tahap mendasar yang sangat perlu dilakukan dalam hal ini. Kalibrasi kamera pada dasarnya ditujukan untuk mengetahui berbagai konstanta distorsi atau yang sering disebut sebagai parameter kalibrasi kamera. Metode kalibrasi kamera

Tabel 1. Faktor Pengali σ untuk Berbagai Tingkat Kepercayaan

Tingkat Kepercayaan	Faktor Pengali
50 %	0,6745
90 %	1,6449
95 %	1,960
99 %	2,576
99,7 %	2,965
99,9 %	3,29

Sumber : (Wolf, 1997)

yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode In-Field Calibration, di mana proses kalibrasi dilakukan berdasarkan 12 foto hasil pemotretan calibration pattern sebagaimana digambarkan pada Gambar 5.

Calibration pattern akan dipotret sebanyak 2 kali pada masing-masing sisinya secara portrait dan landscape dengan sudut pemotretan yang berbeda serta 1 kali pada masing-masing sudutnya sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 6. Sehingga dalam hal ini akan diperoleh 12 buah foto calibration pattern.

Dua belas foto calibration pattern tersebut kemudian diolah menggunakan Photomodeller Scanner versi 6, sehingga diperoleh parameter kalibrasi kamera dari sensor FC300X sebagaimana disajikan dalam Tabel 2. Parameter kalibrasi kamera yang dihitung terdiri dari panjang fokus (focal length) sebenarnya, ukuran (format size) sensor sebenarnya, pergeseran principal point (offset), parameter distorsi radial (K1, K2, K3), dan parameter distorsi tangensial (P1, P2). Dalam hal ini dapat dilihat bahwa sensor FC300X memiliki distorsi lensa yang cukup besar yang ditunjukkan dengan nilai K1, K2, K3 P1 dan P2 yang cukup besar. Jika distorsi ini tidak dikoreksi tentu saja hasil pengolahan foto yang dihasilkan tidak akurat.

Konstanta distorsi atau parameter kalibrasi kamera tersebut kemudian digunakan untuk melakukan koreksi atau restorasi FUFK untuk menghasilkan geometri mendekati ideal tanpa distorsi. Berdasarkan konstanta distorsi tersebut FUFK akan di-resampling sehingga akan terbentuk image baru yang sudah terkoreksi dari pengaruh berbagai distorsi yang ada sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.3. Proses koreksi dalam hal ini masih dilakukan menggunakan perangkat lunak yang sama, yaitu Photomodeller Scanner versi 6 melalui fasilitas Idealize. Hasil koreksi ini akan sangat tergantung pada tingkat akurasi hasil kalibrasi kamera. Dalam Tabel 2. dapat dilihat adanya perbedaan antara karakteristik kamera yang terdapat pada EXIF dan karakteristik kamera yang sebenarnya berdasarkan

hasil kalibrasi kamera. Menurut keterangan yang ada pada EXIF, panjang fokus kamera yang digunakan adalah sebesar 4 mm dengan format CMOS 6,4980 x 4,8735 mm, namun dari tahap kalibrasi kamera diperoleh panjang fokus kamera sebenarnya sebesar 3,7736 mm dengan format CMOS 6,5061 x 4,8735 mm. Setelah foto di-resampling untuk menghilangkan distorsi lensa, maka panjang fokus kamera tetap 3,7736 mm namun format CMOS berubah menjadi 6,6791 x 5,0089 mm untuk menyesuaikan kondisi foto setelah di-resampling. Begitu juga konstanta distorsi lensa yang ada setelah foto di-resampling menjadi bernilai 0.

Gambar 7. menunjukkan perbandingan antara FUFK sebelum dan sesudah dikoreksi. Pada bagian tepi FUFK yang telah dikoreksi dapat dilihat adanya lengkungan hitam yang mengindikasikan bahwa distorsi pada FUFK telah dihilangkan, khususnya distorsi lensa. Lengkungan hitam yang terbentuk tersebut cukup

besar yang mengindikasikan bahwa sebelum dikoreksi foto tersebut memiliki distorsi yang cukup besar. FUFK sebagian daerah Jering ini diambil dari ketinggian terbang yang rendah (120 m), sehingga distorsi yang diakibatkan karena kelengkungan bumi maupun refraksi atmosfer relatif kecil dan dalam hal ini dapat diabaikan.

FUFK yang telah dikoreksi (idealized) inilah yang kemudian akan digunakan sebagai data masukan (input) dalam tahap stereoplotting. Untuk dapat melakukan stereoplotting tersebut, FUFK yang bertampalan perlu terlebih dahulu di-restitusi yang dalam hal ini dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu orientasi dalam (interior orientation) dan orientasi luar (exterior orientation).

Orientasi Dalam pada dasarnya merupakan proses transformasi (pengikatan) koordinat titik obyek dari sistem internal (piksel) ke sistem koordinat foto yang



Gambar 4. Blok FUFK Sebagian Daerah Bukit Jering



Gambar 5. Pemotretan Calibration Pattern untuk Keperluan Kalibrasi Kamera Secara In-Lab.



Gambar 6. Contoh Foto Hasil Pemotretan Calibration Pattern untuk Keperluan Kalibrasi Kamera Secara In-Lab.



Gambar 7. Salah Satu FUFK Sebelum Dikoreksi (a), dan FUFK Setelah Dikoreksi (b).

memiliki origin pada pusat proyeksi (projection center) yang tidak lain merupakan pusat lensa. Dengan kata lain, semua berkas sinar yang terekam pada FUFK akan direkonstruksi melalui pusat lensa sebagai pusat proyeksi. Untuk melakukan hal tersebut diperlukan parameter orientasi dalam (interior orientation parameters) yang pada umumnya terdiri dari koordinat fiducial mark, panjang focus (focal length), posisi principal point dan distorsi lensa. Namun demikian, karena foto udara yang digunakan adalah FUFK non-metrik yang telah dikoreksi (idealized), maka parameter orientasi dalam yang diperlukan hanya dimensi sensor (format size) dan panjang fokus (focal length) saja.

FC300X merupakan kamera non-metrik yang tidak dilengkapi dengan fiducial mark, sehingga fiducial mark digantikan dengan sudut-sudut foto yang dalam hal ini dapat dikaitkan dengan dimensi sensor (format size). Posisi principal point dan konstanta distorsi lensa dalam hal ini tidak diperlukan lagi karena FUFK yang akan digunakan telah dikoreksi (idealized), sehingga

nilai distorsi lensa dan nilai pergeseran principal point-nya mendekati 0. Gambar 8. menunjukkan konfigurasi parameter orientasi dalam (interior orientation parameters) yang digunakan.

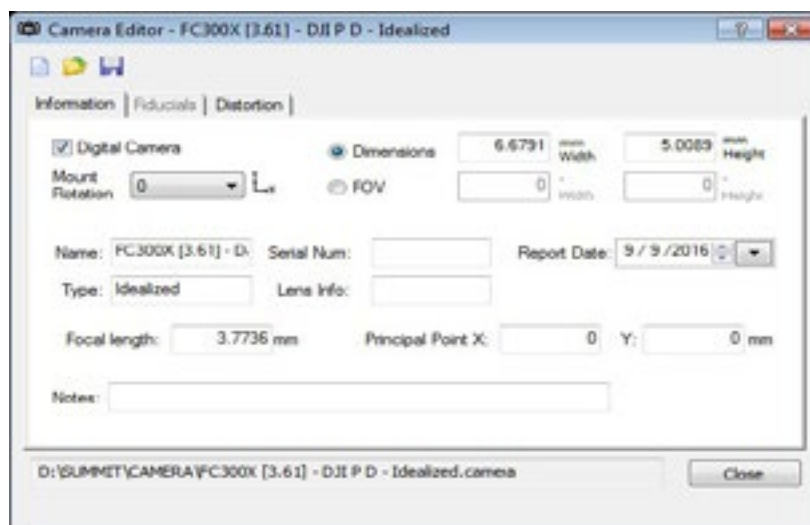
Orientasi luar merupakan proses orientasi yang dilakukan untuk merekonstruksi kondisi perekaman secara keseluruhan pada suatu datum sehingga posisi dan ketinggian ruang tiap berkas sinar pada foto terhadap sistem koordinat tanah dapat ditentukan. Proses ini memerlukan exterior orientation parameters yang terdiri unsur-unsur rotasi dan translasi ($\omega, \phi, \kappa, T_x, T_y, T_z$) dan atau beberapa titik kontrol tanah (Ground Control Points). Dalam penelitian ini, orientasi luar dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap orientasi relatif (relative orientation) yang kemudian dilanjutkan tahap orientasi absolut (absolute orientation).

Tahap pertama, relative orientation pada dasarnya bertujuan untuk menyesuaikan sepasang foto udara yang bertampalan dalam ruang sembarang hingga menghasilkan suatu bayangan stereoskopis tiga

Tabel 2. Parameter Kalibrasi Kamera (FC300X)

Characteristic		EXIF Data (mm)	Calibration Data (mm)	Idealized (mm)
Focal Length		4,0000	3,7736	3,7736
Format Size	W	6,4980	6,5061	6,6791
	H	4,8735	4,8735	5,0089
Principal Point OffSet	X	-	-0.04065	0
	Y	-	-0.05445	0
Lens Distortion	K1	-	6,668 E-004	0
	K2	-	-4,737 E-005	0
	K3	-	0,000 E+000	0
	P1	-	-1,950 E-004	0
	P2	-	3,300 E-004	0

(Sumber: Hasil Pengukuran)



Gambar 8. Parameter Interior Orientation yang Digunakan.

dimensional namun masih dalam sistem sembarang, dengan demikian model tiga dimensi yang dihasilkan pada proses relative orientation ini belum terikat pada sistem koordinat tanah. Proses relative orientation ini dapat dilakukan dengan mengumpulkan tie points atau titik-titik yang bersesuaian pada daerah pertampalan sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 9.

Jumlah tie points yang diperlukan untuk menghasilkan bayangan stereoskopis yang bagus tergantung pada geometri pengambilan foto beserta topografi daerah liputan. Jika geometri pengambilan foto cukup stabil dengan daerah liputan yang datar, pada umumnya 6 buah tie points yang tersebar pada sisi-sisi foto atau yang dikenal dengan titik Von Gruber sudah mencukupi untuk membentuk bayangan stereoskopis yang bagus. Gambar 10. menggambarkan salah satu contoh distribusi tie points pada tampilan lembar FUFK DJI_0033_ideal dan DJI_0034_ideal yang memiliki topografi bervariasi, sehingga jumlah tie points yang diperlukan cukup banyak. Tanda (+) berwarna biru menunjukkan lokasi tie points.

Tahap relative orientation ini telah menghasilkan bayangan stereoskopis yang menimbulkan kesan kedalaman 3 dimensi, akan tetapi belum memberikan nilai absolut yang terikat pada sistem koordinat tanah, sehingga. Oleh karena itu diperlukan tahap orientasi absolut (absolute orientation) yang bertujuan untuk mengikat model 3D yang terbentuk tersebut pada datum atau sistem referensi spasial tertentu. Untuk melakukan absolute orientation ini diperlukan minimal 3 Ground Control Points (GCPs) dengan komposisi minimal 2 titik memiliki nilai pada komponen horisontal (X,Y) dan 3 titik memiliki nilai pada komponen vertikal (Z). Adapun dalam penelitian ini digunakan 4 buah GCPs yang diukur menggunakan 2 buah geodetic GPS dengan metode statik, 1 sebagai base station dan 1 sebagai rover. Dari hasil post processing dapat diperoleh akurasi yang berkisar antara 0,03 hingga 0,10 cm. Gambar 11. menunjukkan pengoperasian rover untuk mengukur koordinat salah satu GCPs di lapangan. Masing-masing GCPs yang telah diukur kemudian ditentukan lokasinya pada masing-masing FUFK sebagaimana prosesnya diilustrasikan pada Gambar 12.

Adapun distribusi GCPs tersebut pada blok foto udara Jering dapat dilihat pada Gambar 13. Jika dalam suatu pertampalan belum memiliki jumlah GCPs yang mencukupi (≥ 3), maka dalam hal ini perlu dilakukan perapatan GCPs berdasarkan tie points yang telah dihitung koordinat tanahnya pada tampilan yang memiliki jumlah GCPs mencukupi. Berdasarkan GCPs dan perluasan GCPs tersebut, Exterior Orientation Parameters (EOPs) dari masing-masing FUFK akan ditentukan. EOPs tersebut terdiri dari unsur rotasi (ω , ϕ , κ) dan unsur translasi (T_x , T_y , T_z). Masing-masing foto akan memiliki EOPs masing-masing yang berbeda satu dengan yang lainnya sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14. Berdasarkan data EOPs, dapat diketahui bahwa pemotretan yang dilakukan kurang stabil, di

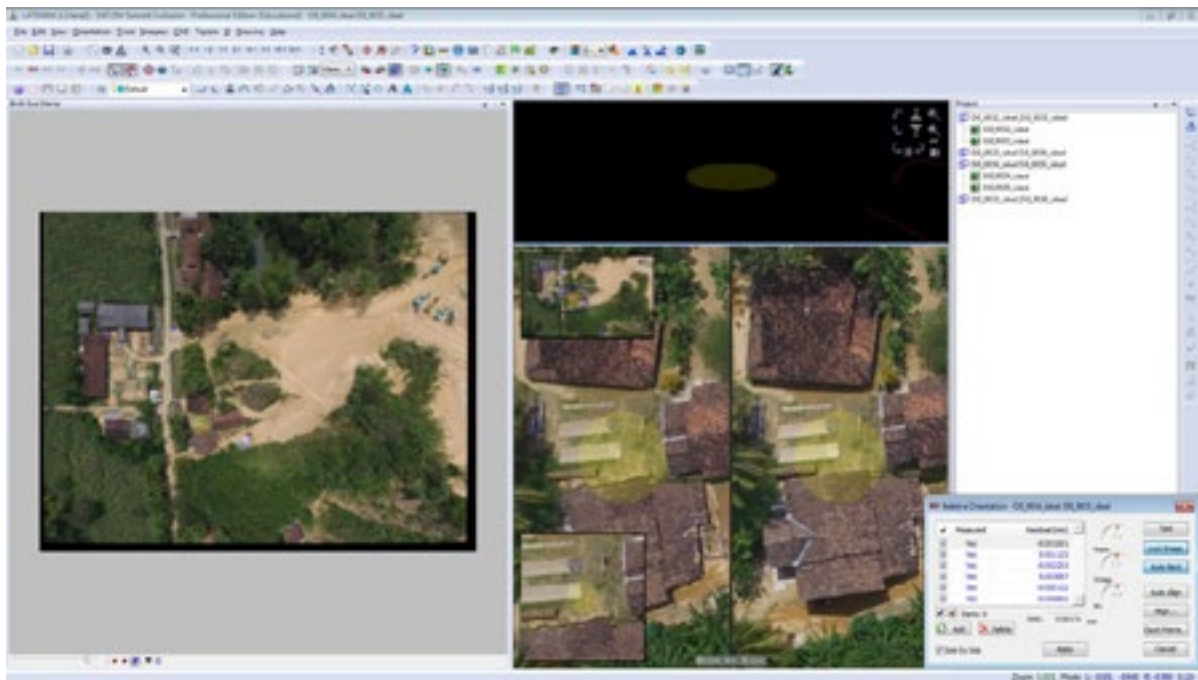
mana tinggi terbang, sudut rotasi dan pertampalan antar foto tidak stabil.

Berdasarkan EOPs tersebut, masing-masing foto akan ditranslasikan sesuai dengan nilai T_x , T_y , T_z , serta akan dirotasikan sesuai dengan nilai ω , ϕ , κ , dari masing-masing foto, sehingga model 3D yang terbentuk akan memiliki referensi spasial, dalam hal ini Universal Transverse Mercator zona 49 M sesuai dengan GCPs yang digunakan. Gambar 15 menggambarkan foto DJI_0032_ideal sebelum dan sesudah diorientasikan berdasarkan nilai EOPs.

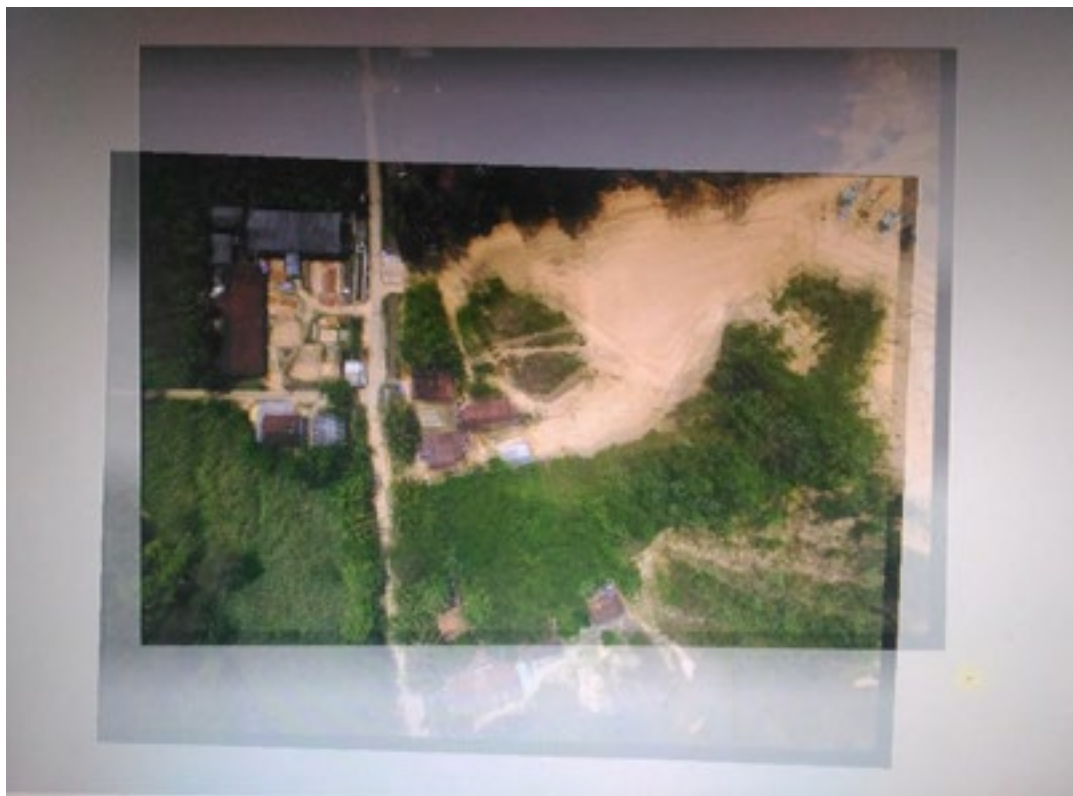
Setelah FUFK di-restitusi melalui interior orientation dan exterior orientation tersebut, maka FUFK telah siap digunakan untuk melakukan stereoplotting. Pada dasarnya stereoplotting merupakan metode digitisasi obyek dari foto stereo secara tiga dimensi, sehingga dapat diperoleh data vektor 3D yang memiliki nilai ketinggian. Dalam hal ini, proses stereoplotting pada Summit Evolution versi 7 dapat dilakukan secara interaktif yang dibantu dengan sensor dan kacamata 3D bersistem polarisasi, sehingga model 3D yang terbentuk dari bayangan stereoskopis dapat terlihat cukup realistis. Hal ini cukup membantu dalam memposisikan floating mark agar benar-benar tepat pada permukaan obyek yang akan didigitisasi, apakah tepat terletak pada permukaan tanah atau permukaan obyek penutup di atasnya. Hal ini lah yang menjadi keunggulan proses stereoplotting interaktif, di mana user dapat menentukan output yang dihasilkan nantinya akan berupa Digital Terrain Model (DTM) atau Digital Surface Model (DSM). Adapun yang diekstrak dari FUFK dalam penelitian ini adalah DTM yang merupakan model permukaan bumi digital yang hanya memuat elevasi fitur-fitur alami permukaan tanah terbuka tanpa obyek penutup di atasnya. Oleh sebab itu floating mark dalam proses stereoplotting harus diposisikan benar-benar tepat pada permukaan tanah, bukan pada permukaan obyek penutup di atasnya. Gambar 16. menunjukkan hasil stereoplotting secara interaktif.

Setiap kali floating mark diposisikan tepat pada permukaan obyek yang akan didigitisasi, hal ini menandakan space intersection terjadi tepat pada permukaan obyek tersebut. Berdasarkan space intersection ini lah koordinat 3D dari obyek tersebut ditentukan, di mana perhitungannya didasarkan pada persamaan kolinieritas (colinearity equation). Pada dasarnya, space intersection merupakan perpotongan dari garis lurus berkas sinar obyek yang telah mengalami kondisi kolinieritas (colinearity condition). Kondisi itu sendiri merupakan kondisi di mana obyek di lapangan, obyek di foto dan pusat lensa sebagai perspective center terletak pada satu garis lurus.

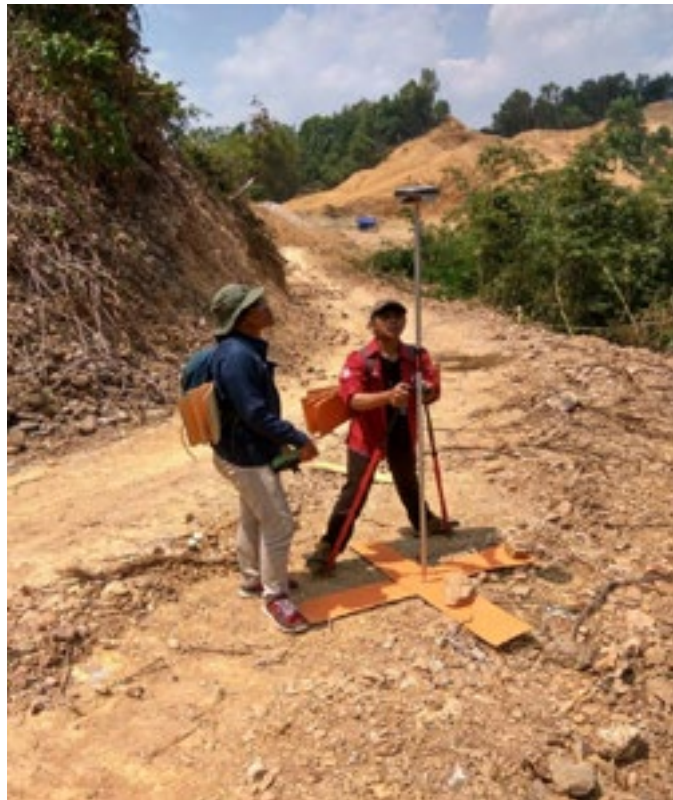
Selain dipengaruhi kualitas data dan kualitas restitusi, hasil stereoplotting secara interaktif akan sangat dipengaruhi oleh kemampuan pengguna yang mengerjakannya, terutama kemampuan melakukan pengamatan stereoskopis dan kemampuan interpretasi



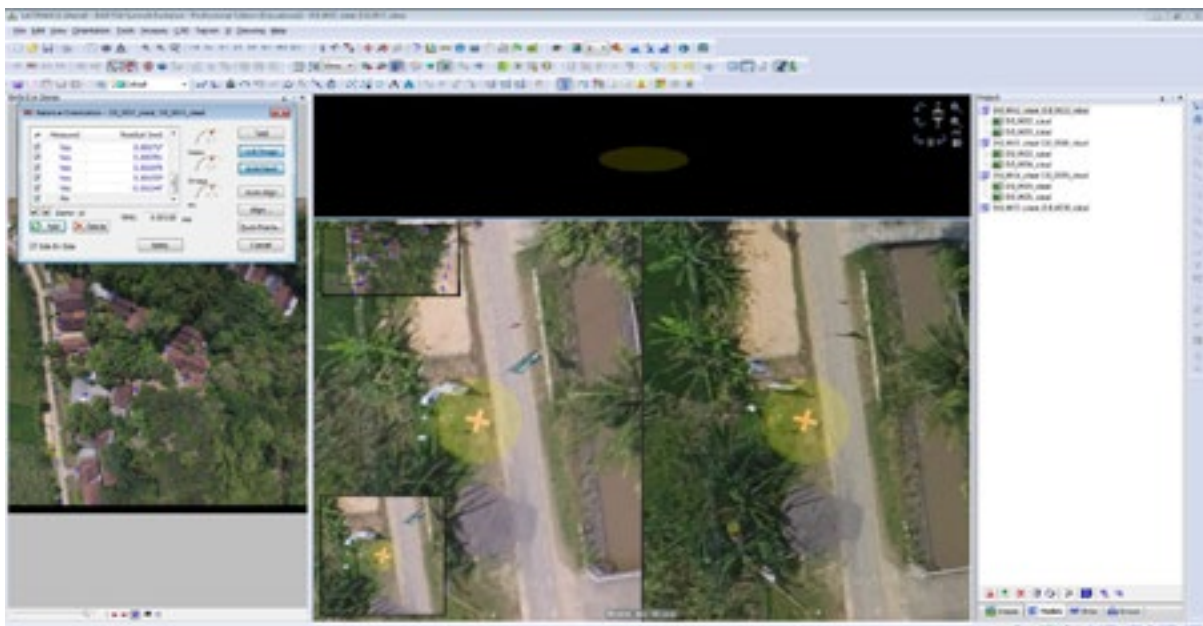
Gambar 9. Pengambilan Tie Points dalam Tahap Relative Orientation.



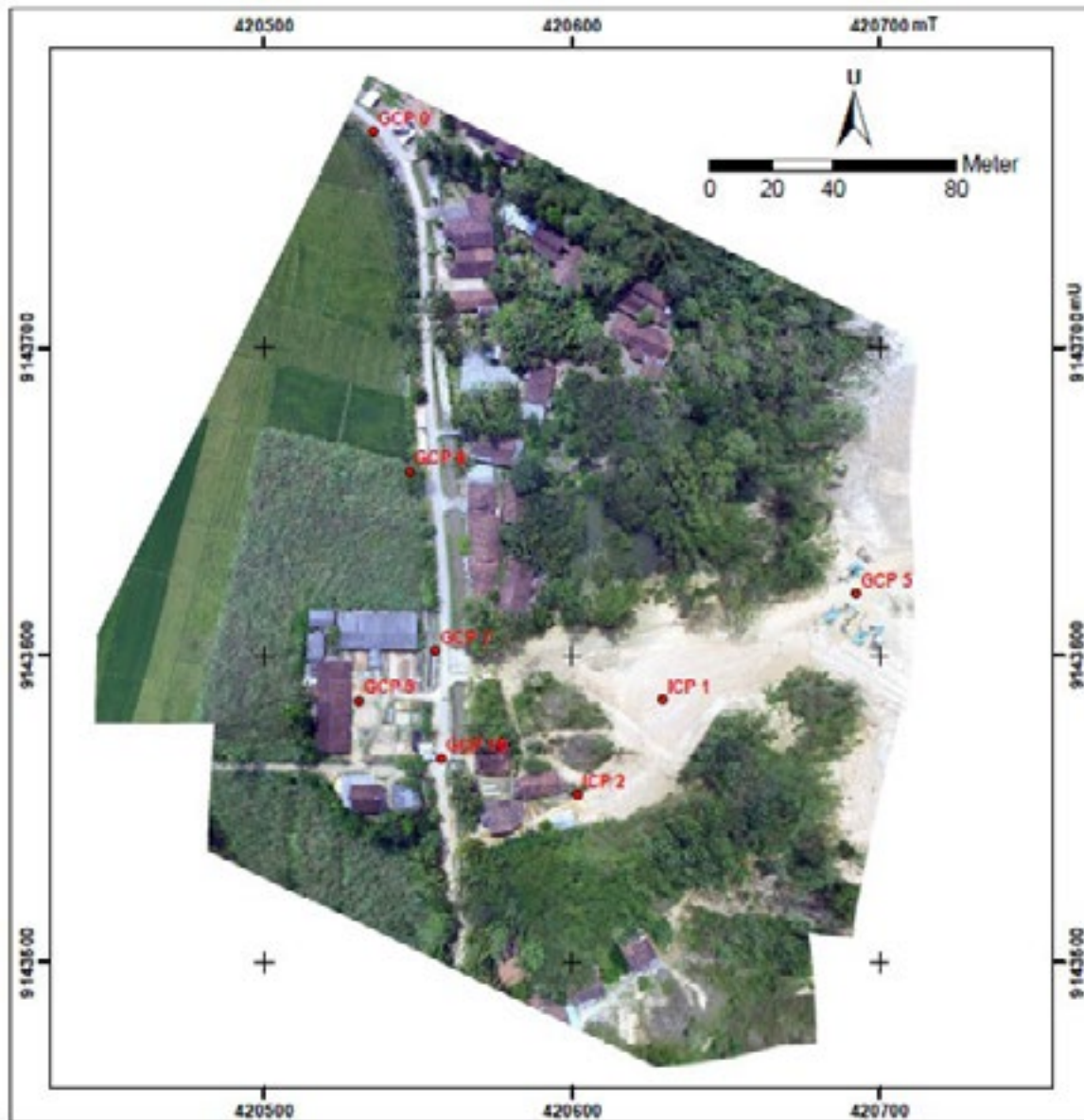
Gambar 10. Distribusi Tie Points pada Tampilan DJI_0033_ideal dan DJI_0034_ideal



Gambar 11. Pengukuran Salah Satu Koordinat GCPs di Lapangan.



Gambar 12. Penentuan Posisi GCPs-6 pada Pertampalan FUFK.



Gambar 13. Distribusi GCPs dan ICPs.

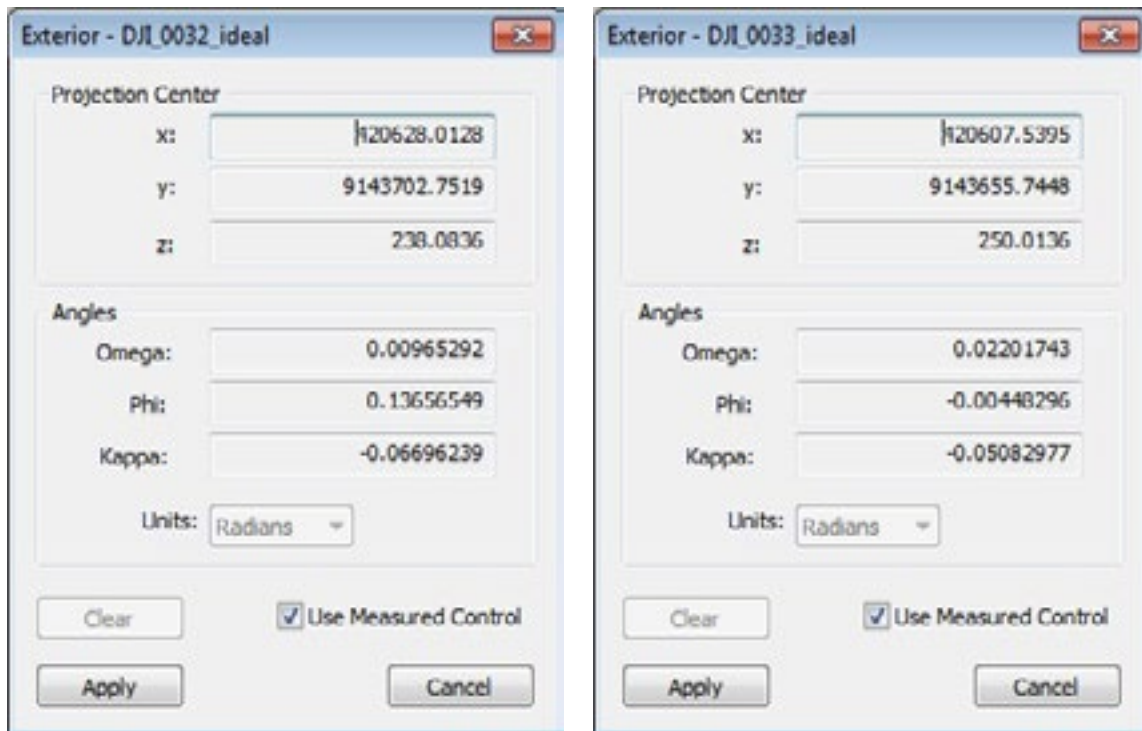
secara visual. Pengguna harus benar-benar dapat melakukan pengamatan stereoskopis dan memiliki kemampuan interpretasi secara visual yang cukup agar dapat menempatkan titik apung (floating mark) secara tepat pada permukaan obyek yang didigitisasi. Oleh sebab itu dibutuhkan latihan dan jam terbang tinggi agar dapat melakukan stereoplotting secara interaktif dengan baik dan benar.

Perangkat lunak DAT/EM Summit Evolution versi 7 yang digunakan dalam penelitian ini telah terintegrasi dengan ArcMap 10.2, di mana data vektor 3D yang dihasilkan dari proses stereoplotting dapat memiliki tipe point, line maupun polygon. Vektor bertipe point dapat digunakan untuk mewakili titik tinggi (spot height). Vektor bertipe line dapat digunakan untuk mewakili break line seperti igir bukit, pola aliran dan sebagainya. Sedangkan vektor bertipe polygon dapat digunakan untuk mewakili obyek yang memiliki permukaan relatif rata, seperti misalnya permukaan tubuh perairan.

Data dengan berbagai tipe tersebut dapat digunakan, sehingga konfigurasi 3D dari permukaan daerah liputan dapat direpresentasikan dengan lebih mendekati kondisi di lapangan. Gambar 4.14 menggambarkan contoh vektor 3D hasil stereoplotting, baik yang bertipe point, line maupun polygon.

Untuk membangun model permukaan yang kontinu dalam format raster, data vektor 3D hasil stereoplotting tersebut kemudian diinterpolasi. Pada dasarnya proses interpolasi ini akan menentukan nilai baru yang belum diketahui berdasarkan nilai di sekitarnya yang sudah diketahui. Semua data vektor 3D hasil stereoplotting, baik point, line maupun polygon digunakan sebagai dasar interpolasi ini dengan harapan mampu menghasilkan model permukaan yang kontinu dalam format raster yang representatif.

Berdasarkan format raster yang bersifat kontinu ini, model permukaan akan lebih mudah dianalisis lebih lanjut, seperti misalnya analisis volume atau pun



Gambar 14. Nilai EOPs dari Foto DJI_0032_ideal dan Foto DJI_0033_ideal.



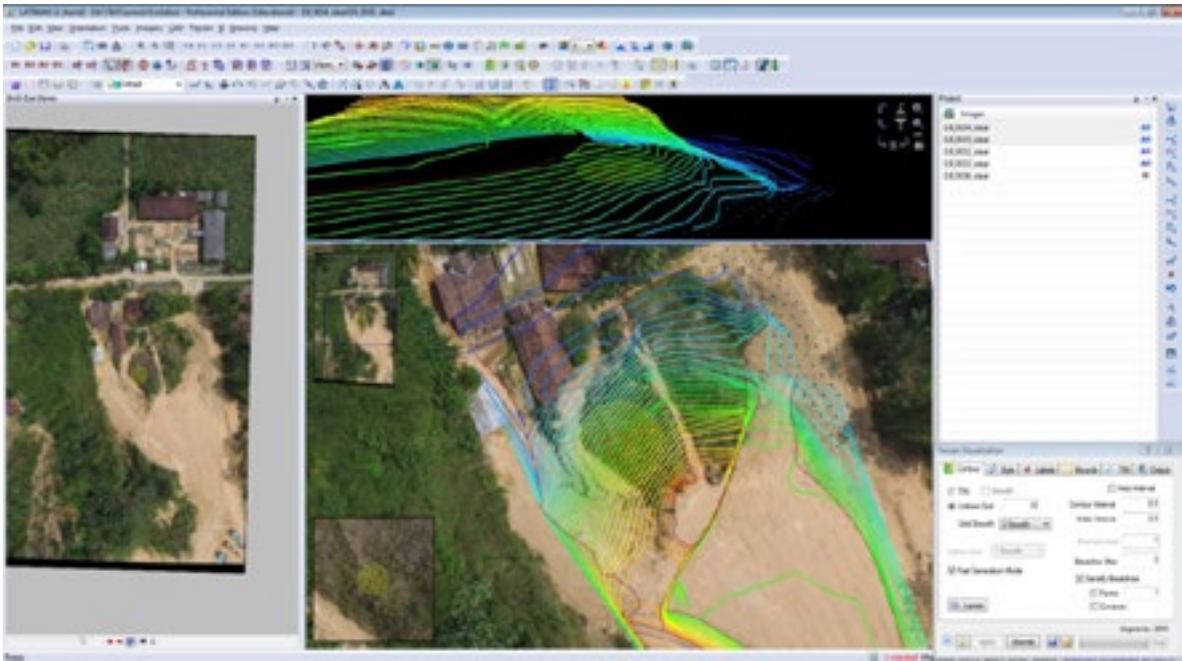
Gambar 15. Foto DJI_0032_ideal sebelum (a) dan sesudah (b) diorientasikan berdasarkan EOPs. Dapat dilihat DJI_0032_ideal

analisis visibility. Gambar 18. menunjukkan DTM sebagian daerah Jering yang dihasilkan dari proses interpolasi vektor 3D hasil stereoplotting FUFK. Data DEM sebagian bukit Jering dapat dibuatkan turunannya, yaitu: tampilan perspektif 3-Dimensi atau tampilan pandangan mata burung (bird's eye view) yang ditunjukkan pada Gambar 19.

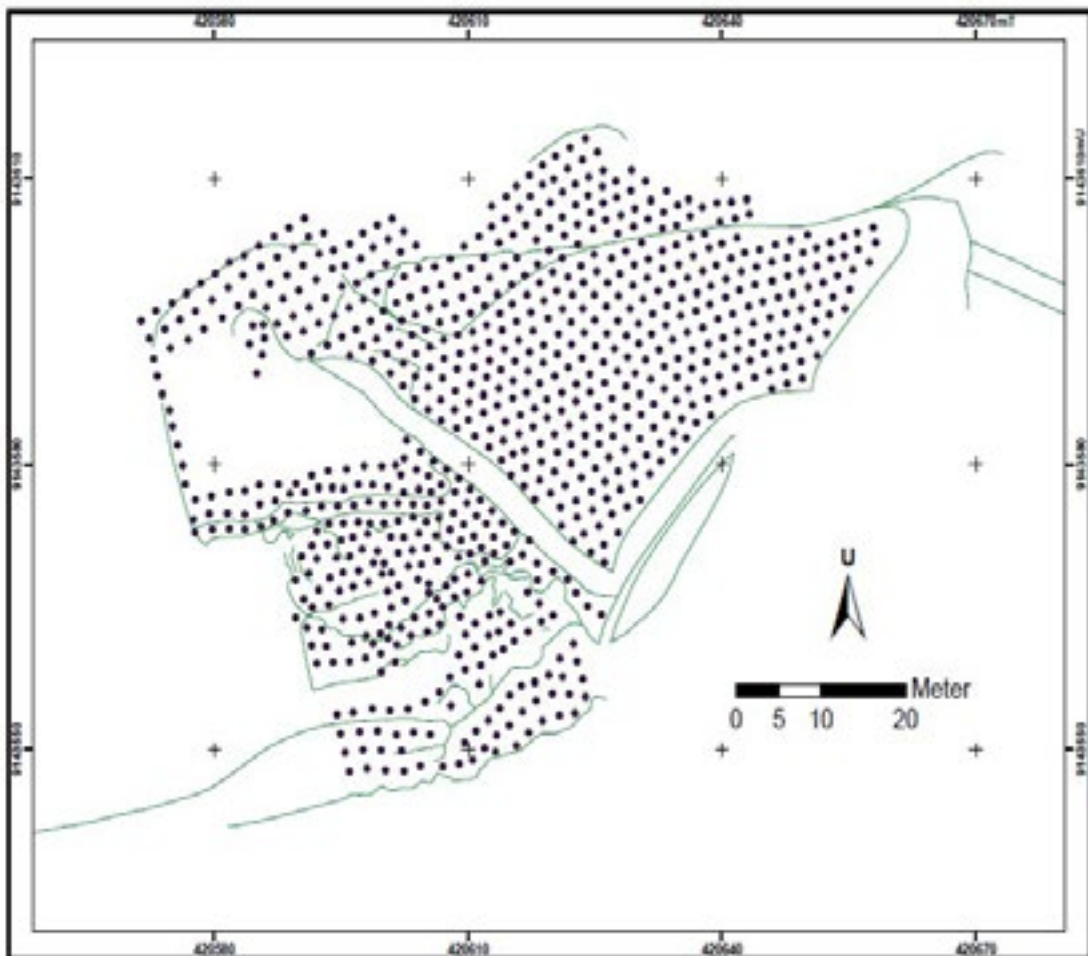
Uji akurasi (accuracy assessment) dalam hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui kualitas Digital Elevation Model (DEM) yang mampu dihasilkan. Nilai akurasi sebagai hasil dari uji akurasi ini akan dinyatakan dalam dua nilai, yaitu akurasi relatif (relative accuracy) maupun akurasi absolut (absolute accuracy).

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, model yang dibangun dalam penelitian ini adalah Digital Terrain Model (DTM) yang merupakan model permukaan bumi digital yang hanya memuat elevasi fitur-fitur alami permukaan tanah terbuka tanpa obyek penutup di atasnya. Oleh karena itu, untuk mendapatkan tingkat akurasi ini juga akan dibandingkan dengan permukaan tanah terbuka tanpa obyek penutup di atasnya.

Relative accuracy yang dimaksud dalam penelitian ini adalah akurasi kualitatif yang hanya didasarkan pada hasil pengamatan secara visual terhadap kualitas DTM yang dihasilkan dalam merepresentasikan permukaan terrain yang diwakilinya. Berdasarkan pengamatan



Gambar 16. Proses Stereoplotting Interaktif.



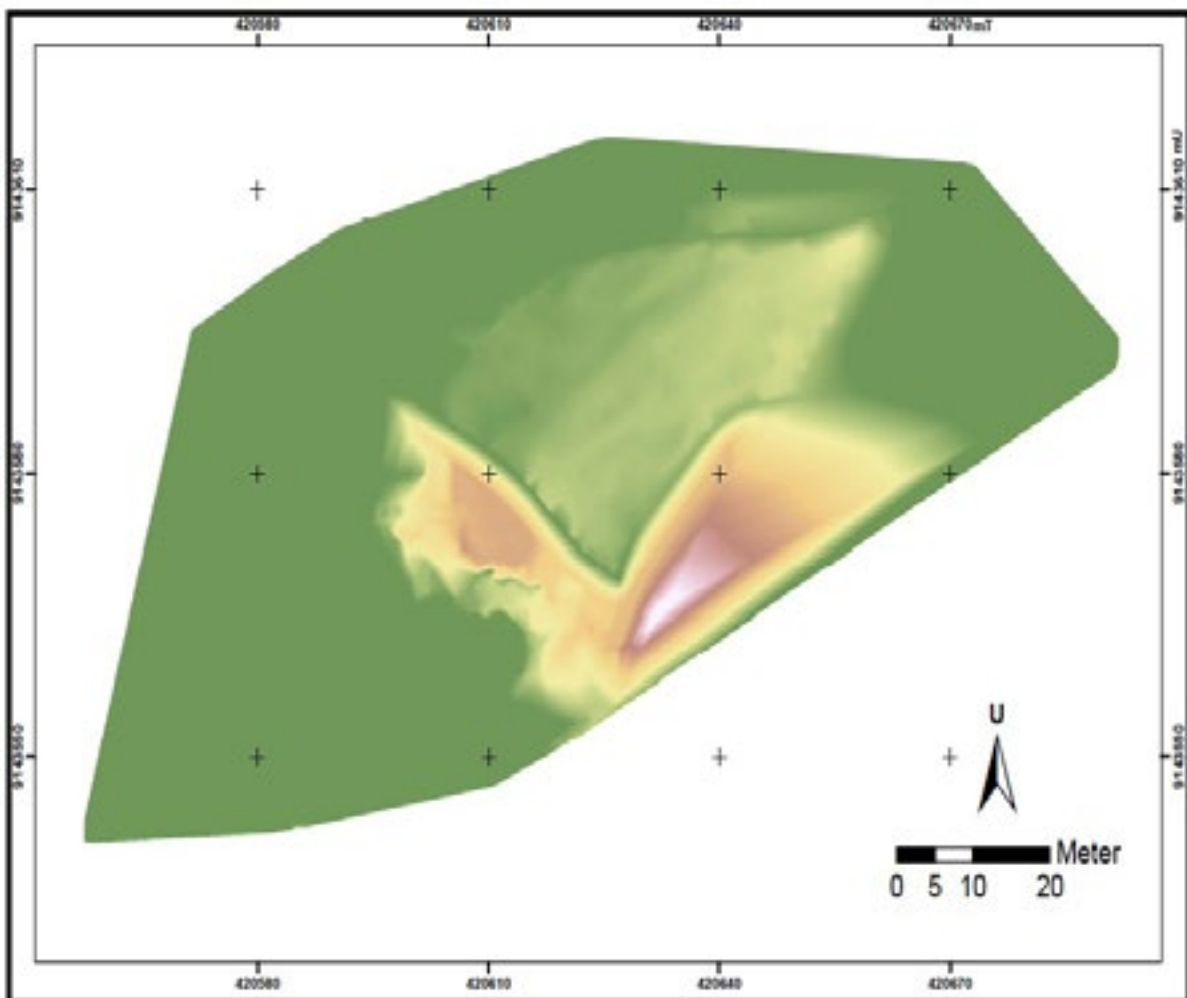
Gambar 17. Vektor 3D Hasil Stereoplotting Interaktif

secara visual, DTM yang dibangun berdasarkan hasil stereoplotting interaktif ini sudah cukup representatif dan realistis dalam mewakili permukaan bukit Jering. Dapat dilihat perbandingan antara bentuk Bird's Eye View dari DTM dengan foto bukit Jering pada Gambar 4.16. Secara visual, keduanya sudah cukup mendekati. Adapun untuk menyatakan akurasi DTM secara kuantitatif, akurasi DTM juga akan dinyatakan dalam akurasi absolut.

Akurasi absolut (*absolute accuracy*) dalam penelitian ini diperoleh dengan cara membandingkan nilai koordinat tanah masing-masing Independent Check Points (ICPs) pada DTM dengan nilai koordinat tanah hasil pengukuran terestris masing-masing ICPs tersebut. Adapun akurasi absolut ini akan dinyatakan dalam dua nilai, yaitu akurasi absolut pada komponen vertikal (*vertical accuracy*) dan akurasi absolut pada komponen horizontal (*horizontal accuracy*).

Berdasarkan 7 (tujuh) ICPs yang diukur dengan GPS geodetik secara statis, diketahui bahwa DTM sebagian daerah bukit Jering memiliki HRMSE sebesar 0.073 meter dengan *horizontal accuracy* yang mencapai 0.123 meter pada tingkat kepercayaan 90%, sedangkan

RMSEz yang dimiliki hanya mampu mencapai 0.482 meter dengan *vertical accuracy* yang mencapai 0.793 meter pada tingkat kepercayaan yang sama yaitu 90%. Walaupun hanya bersumber dari FUFK yang pada dasarnya memiliki distorsi yang besar, namun ternyata DTM yang dihasilkan dari proses stereoplotting dalam penelitian ini memiliki akurasi yang cukup baik. Banyak faktor yang memengaruhi tingkat akurasi DTM hasil pengolahan FUFK ini, mulai dari sumber data hingga proses pengolahan data yang dilakukan. Sumber data yang dimaksud di sini adalah FUFK dan GCPs. Sebelum masuk ke tahap stereoplotting, FUFK yang digunakan dalam penelitian ini sudah melalui tahap koreksi (*idealize*) berdasarkan hasil kalibrasi kamera terlebih dahulu, sehingga nilai distorsinya sudah mendekati 0, khususnya distorsi lensa. Begitu juga GCPs yang dalam hal ini telah melalui proses *post processing* sehingga akurasinya mampu mencapai 0,03 hingga 0,1 cm. Adapun faktor lain yang dapat mempengaruhi akurasi dari DTM tersebut adalah distribusi GCPs. GCPs yang digunakan harus terdistribusi secara merata, tidak boleh mengelompok. Penempatan posisi GCPs dan juga ICPs pada FUFK dalam hal ini juga dapat memengaruhi



Gambar 18. DTM Sebagian Daerah Jering.

akurasi dari DTM yang dihasilkan. GCPs dan ICPs harus ditempatkan tepat pada lokasi yang sesuai pada masing-masing FUFK.

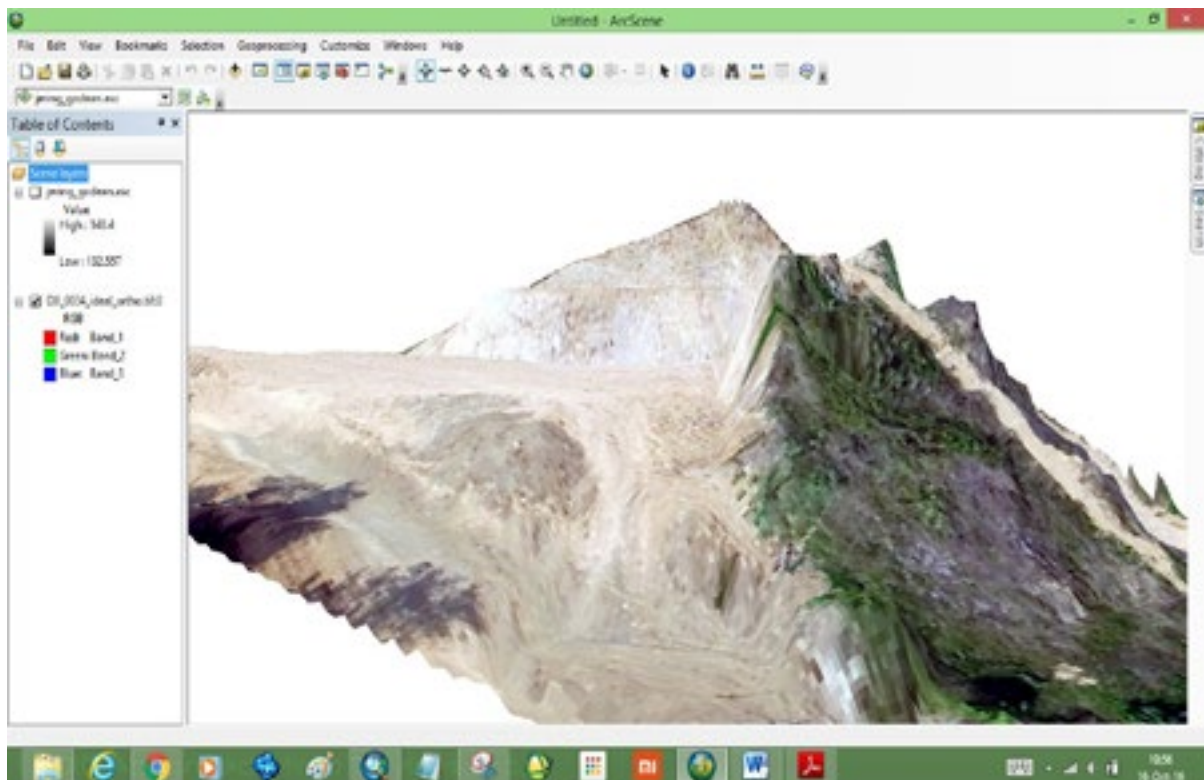
Perbandingan DEM Hasil Stereoplotting Interaktif dengan DEM Hasil Pengolahan Otomatis Melalui Image Matching. Sebagaimana telah disinggung sebelumnya, keunggulan utama dari stereoplotting interaktif adalah pengguna dapat menentukan output yang dihasilkan nantinya akan berupa Digital Terrain Model (DTM) atau Digital Surface Model (DSM). Dengan leluasa pengguna dapat memposisikan floating mark agar benar-benar tepat pada permukaan obyek yang akan didigitisasi, apakah tepat terletak pada permukaan tanah sebagai DTM atau tepat pada permukaan obyek penutup di atasnya sebagai DSM. Berbeda dengan ekstraksi DEM yang dilakukan secara otomatis melalui image matching, di mana pencocokan titik yang bersesuaian hanya didasarkan pada nilai piksel yang merekam permukaan terluar pada daerah liputan, sehingga DEM yang dihasilkan adalah berupa DSM yang mencakup semua permukaan tanah ditambah dengan obyek penutup di atasnya sebagaimana dapat dilihat perbandingannya pada Gambar 20.

Di daerah bukit Jering yang menjadi daerah daerah penelitian ini akan dibangun Perumahan Godean Jogja Hill's yang merupakan program pemerintah untuk membangun rumah murah untuk mengatasi kebutuhan rumah yang semakin meningkat. Pengembang perumahan tersebut melakukan proses perataan bukit

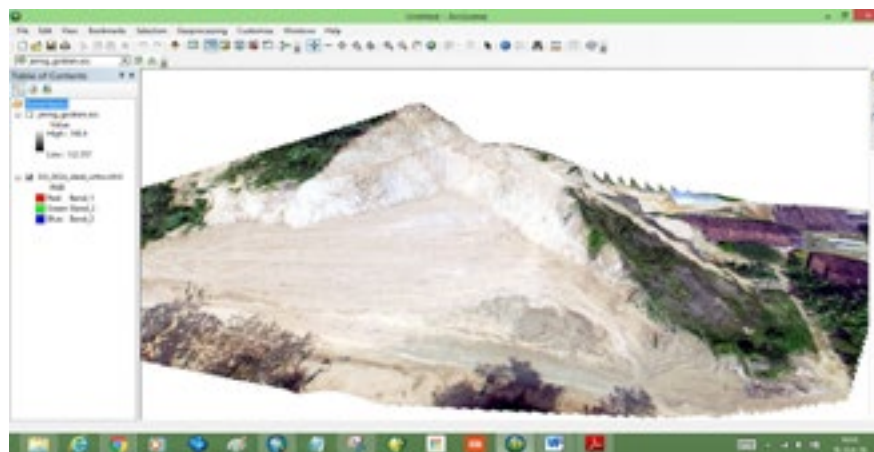
dengan cara mengeruk bukit Jering untuk membangun perumahan di atasnya. Dalam kasus ini, data DEM yang dihasilkan dalam penelitian ini digunakan untuk mengukur volume tanah yang telah dikeruk. Dari hasil pengolahan data yang dilakukan, diperoleh hasil bahwa volume sebagai bukit Jering yang telah dikeruk untuk pembangunan Perumahan Godean Jogja Hill's tersebut adalah 55.953,813 m³.

KESIMPULAN

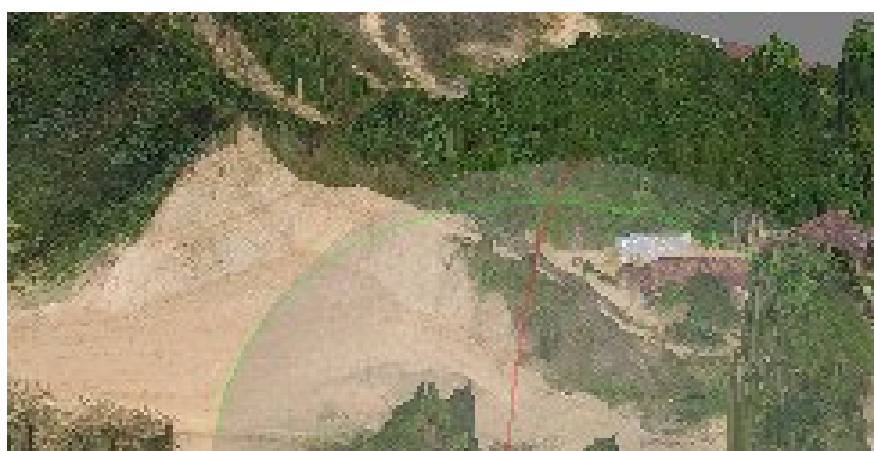
FUFK yang direkam dengan kamera digital non metrik dengan menggunakan wahana UAV memiliki distorsi lensa yang cukup besar, oleh karena itu, stereoplotting interaktif dapat diterapkan pada FUFK dengan hasil yang cukup baik, jika FUFK yang digunakan telah terkoreksi dari distorsi, terutama distorsi lensa (idealized). Selain dipengaruhi kualitas FUFK dan kualitas restitusi, hasil stereoplotting interaktif akan sangat dipengaruhi oleh kemampuan pengguna yang mengerjakannya, terutama kemampuan melakukan pengamatan stereoskopis dan kemampuan interpretasi secara visual. Dibandingkan DEM hasil ekstraksi secara otomatis melalui image matching, DEM hasil stereoplotting secara interaktif lebih dapat dipertanggung jawabkan, sebab pengguna dapat mengontrol secara langsung obyek yang didigitisasi sebagai DTM atau DSM. Akurasi DEM sebagian bukit Jering yang dihasilkan dari interpolasi data vektor 3D hasil stereoplotting digital dalam penelitian ini mampu



Gambar 19. Bird's Eye View sebagian Bukit Jering Godean



(a)



(b)

Gambar 20. Perbandingan DTM Hasil Stereoplotting Interaktif dengan DSM (a) dan Hasil Image Matching (b)

mencapai, DEM yang dihasilkan memiliki HRMSE sebesar 0.073 meter dengan horizontal accuracy yang mencapai 0.121 meter pada tingkat kepercayaan 90%, sedangkan RMSEz yang dimiliki hanya mampu mencapai 0.482 meter dengan vertical accuracy yang mencapai 0.793 meter pada tingkat kepercayaan yang sama, 90%. Secara visual, DEM yang dihasilkan mampu merepresentasikan konfigurasi permukaan daerah liputan dengan cukup representatif. Berdasarkan DEM yang dihasilkan dari metode stereoplotting digital diperoleh hasil perhitungan volume sebagian bukit Jering yang telah dikeruk untuk pembangunan Perumahan Godean Jogja Hill's adalah 55.953,813 m³.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana melalui hibah penelitian dosen Fakultas Geografi yang didanai dari Penerimaan Negara Bukan Pajak, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada Tahun Anggaran 2016. Terimakasih diucapkan kepada Bapak Prof. Dr. Rijanta, M.Sc. dan Prof. Dr. Aris Marfai, M.Sc., selaku

Wakil Dekan III Fakultas Geografi 2012- 2016 yang telah memberikan kesempatan melaksanakan program hibah penelitian ini. Terimakasih juga disampaikan kepada Saudara Rendy M. yang telah membantu dalam pemrosesan data penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- DAT/EM Indonesia. (2015), Fotogrametri Digital.: DAT/EM Indonesia. Bandung.
- Davis R. M., (2014), Multicopter-Based Small Format Aerial Photography Using Free And Open Source Photogrammetry, A thesis submitted to the Graduate College of Marshall University, Published by ProQuest LLC 2014 pp 11-12.
- Gularso H., Rianasari H., dan Silalahi F.E., (2015), Penggunaan Foto Udara Format Kecil Menggunakan Wahana Udara Nir-Awak Dalam Pemetaan Skala Besar (Small Format Aerial Photography Application Using UAV for Large Scale Mapping), Jurnal Ilmiah Geomatika Volume 21 No. 1 Agustus 2015: 37-44.Habib, Ayman F.

- .(2008) Theory of Orientation & Photogrammetric Triangulation. Canada: Departement og Geomatics Engnering, Sculich School of Engineering, University of Calgary.
- Republik Indonesia. (2015). Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 180 Tahun 2015 tentang Pengendalian Pengoperasian Sistem Pesawat Udara Tanpa Awak Di Ruang Udara yang Dilayani Indonesia. Peraturan Perundang-undangan. Jakarta: Kemenkumham.
- Pranadita, Harintaka, (2013), Pembuatan Model Elevasi Digital Dari Stereoplotting Interaktif Foto Udara Format Sedang Dengan Kamera Dgicam (Digital Elevation Model Development from Interactive Stereo-plotting of Medium Format Aerial Photo using DigiCam Camera), Jurnal Ilmiah Geomatika Volume 19 No. 2 Desember 2013 : 101 – 105.
- Purwanto, T .H., (2000), Pengembangan Metode Perhitungan Paralaks dengan Integrasi Stereoskop Cermin, Digitizer, PC Arc/Info dan PC TIN Arc/Info untuk Pembentukan Data Model Medan Digital, Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- Putera S. B. A.dan Hariyanto T., (2013), Kalibrasi Kamera non-metrik digital dengan metode selft calibration, Journal of Geodesy and Geomatics (Geoid) Vulume 8, no 2, 2013.Redweik P, (2013), Photogrammetry, Sciences of Geodesy - II, DOI: 10.1007/978-3-642-28000-9_4 _ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, hh. 133-134.
- Saadatseresht M., Hashempour A.H., Hasanlou M., (2015), UAV Photogrammetry: A Practical Solution For Challenging Mapping Projects, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W5, 2015 International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry, 23–25 Nov 2015, Kish Island, Iran.
- Soeta'at. (2002), Fotogrametri Sistem Digital Dengan Desktop Digital Photogrammetry System (DDPS)–3D Mapper Untuk Pemetaan Kota Bontang, Kalimantan Timur, Yogyakarta: Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
- Wolf, P. R. (1993). Elemen Fotogrametri dengan Intepretasi Foto Udara dan Penginderaan Jauh, Edisi Kedua. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.