

ESTIMASI SEDIMEN LAHAR DINGIN DI SEBAGIAN KALI GENDOL GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN FUFK DAN LIDAR

Belinda Duhita Puspita
belinda.kpjer07@gmail.com

Sudaryatno
deyatno@yahoo.com

Abstract

One of natural disasters is eruption which produces primary and secondary risks. Secondary risk as a mud flow happened after eruption when rain fell on mount peak. Rain water in current river bring so much materials from mount peak until sediment made. These sediment need to be measured to get the mud flow volume information. The aims of this research were: (1) to take DEM from SFAP, (2) to take accuration rate from DEM SFAP, (3) to estimate mud flow sediment volume in a part of Kali Gendol.

Creating SFAP DEM pass some digital photogrammetric processes. Basically, digital photogrammetric process are similar with conventional photogrammetric process except lens distortion considering. Digital photogrammetric processes to make DEM and its accuracy are reconstruct photo in flightline, GCP identification, camera calibration, inner orientation, tie points identification, absolute orientation, interpolation, and DEM accuracy test. Sediment volume was made by processing LiDAR DEM first. Then volume was calculated by using cut and fill method.

SFAP DEM has 5 m in resolution while it has 12,9 m in horizontal accuracy and 17,51 m in vertical accuracy. Through FUFK-DEM and LiDAR-DEM, we get 23 polygons calculated by cut and fill process. Total adding sediment volume is 5,27 million m³, total removal sediment volume is 4,96 million m³, while final total volume after calculated is 0,31 million m³ along the river.

Key words: sediment volume estimation, SFAP, DEM, LiDAR

Abstrak

Salah satu bencana alam ialah letusan gunungapi yang menghasilkan bahaya primer dan sekunder. Bahaya sekunder seperti lahar dingin terjadi setelah letusan ketika hujan di puncak. Air hujan bersama aliran sungai membawa banyak material dari puncak gunung sehingga terbentuk sedimen. Sedimen ini butuh dihitung untuk mendapat informasi volume material yang ada. Tujuan dari penelitian ini ialah (1) mendapat DEM dari FUFK, (2) mendapat nilai akurasi DEM FUFK, (3) mengestimasi volume sedimen lahar dingin di sebagian Kali Gendol.

Pembuatan DEM FUFK melalui beberapa proses fotogrametri. Pada dasarnya, proses fotogrametri digital mirip dengan proses fotogrametri konvensional kecuali pada pertimbangan distorsi lensa. Proses fotogrametri digital untuk menghasilkan DEM dan akurasinya yaitu; rekonstruksi jalur terbang, identifikasi GCP, kalibrasi kamera, orientasi dalam, identifikasi tie points, orientasi absolut, interpolasi, dan uji akurasi DEM. Volume sedimen didapat dengan memproses dahulu DEM LiDAR. Kemudian volume dihitung dengan metode cut and fill.

DEM FUFK memiliki resolusi 5 m, akurasi horizontal sebesar 12,9 m, dan akurasi vertical sebesar 17,51 m. Melalui DEM FUFK dan DEM LiDAR didapatkan 23 poligon dengan proses cut and fill. Total volume sedimen yang bertambah ialah 5,27 juta m³, untuk volume yang berkurang sebesar 4,96 m³, dan volume total sedimen ialah 0,31 m³ sepanjang sungai penelitian.

Kata kunci: estimasi volume sedimen, FUFK, DEM, LiDAR

PENDAHULUAN

Gunung Merapi telah memuntahkan material-materialnya setelah tahun 2006 kemarin. Selain menimbulkan dampak langsung berupa aliran lava, atau leleran batu pijar, aliran piroklastika atau awan panas, jatuhnya piroklastika atau hujan abu lebat, lontaran material pijar. Hal ini disebabkan oleh lemparan material yang langsung dihasilkan oleh letusan gunungapi. Merapi juga memberikan dampak yang tidak langsung serta dapat menelan banyak korban, yaitu timbulnya lahar panas dan lahar dingin. Kepala Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungapian (BPPTK) mengungkapkan permasalahan yang berupa kesulitannya untuk memprediksi besaran volume lava panas atau lahar dingin yang akan mengalir ke bawah sehingga sulit menahan material tanah dan batuan tersebut. Teknologi yang dapat menjadi alternatif menghadapi masalah di atas ialah dengan foto udara format kecil. Foto Udara Format Kecil (FUFK) atau *Small Format Aerial Photograph* merupakan foto yang dihasilkan dari kamera dengan ukuran film atau frame sekitar 24 mm x 36 mm dengan panjang fokus 35 mm (Warner, 1996). Sistem lensa dari kamera tersebut tidak didesain untuk keperluan pemetaan (tidak dilengkapi *fiducial mark*, panjang fokus terkalibrasi lokasi titik utama tidak diketahui) dan dapat berupa kamera analog atau digital. Suatu wilayah memerlukan beberapa foto udara yang akan disusun menjadi mosaic foto udara. Menurut Wolf (1983), mosaic foto udara ialah gabungan dari dua atau lebih foto udara yang saling bertampalan sehingga terbentuk paduan citra yang berkesinambungan dan menampilkan daerah yang lebih luas. FUFK cukup potensial dimanfaatkan untuk penyediaan data spasial, antara lain berupa foto udara, ortofoto, mosaik ortofoto, dan peta garis.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi topografi berupa DEM yang lebih merupakan DSM dari FUFK dengan aplikasi penginderaan jauh foto udara dan SIG, mendapatkan nilai akurasi dari DEM (DSM) FUFK, dan mengestimasi volume sedimen lahar dingin di sebagian Kali Gendol dengan menggunakan DEM pra erupsi dan DEM pasca erupsi hasil pengolahan foto udara format kecil dengan aplikasi penginderaan jauh foto udara dan SIG

Voskuil dan Zuidam (1982) melakukan penelitian yang bertujuan untuk memetakan bahaya vulkanik (primer maupun sekunder) di daerah lereng barat Gunung Merapi. Penelitian ini menggunakan data penginderaan jauh sebagai data primer berupa foto udara inframerah hitam putih skala 1:50.000 yang dipergunakan untuk memperoleh data unit bentuklahan, kemiringan lereng, penutup lahan, penggunaan lahan dan agihan endapan lahar. Sedangkan data sekunder sebagai alat pembantu analisis digunakanlah data sejarah letusan, iklim, hidrologi, kondisi geologi, dan topografi. Penelitian ini menggunakan pendekatan geomorfologi melalui foto udara yang akhirnya menghasilkan kriteria daerah berbahaya.

Sutikno (2003) melakukan penelitian serupa dengan melakukan simulasi model dua dimensi dalam memperkirakan daerah rawan lahar dingin di gunungapi. Daerah penelitian berada di Kali Leprak Gunung Sumeru, Lumajang, Jawa Timur. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengidentifikasi daerah-daerah yang terancam lahar dingin akibat penyimpangan aliran dalam rangka pengembangan sistem peringatan dini. Maksud lebih lanjut dari penelitian ini yaitu diketahuinya titik-titik rawan pelampiasan di sepanjang alur dan penyebaran sedimen di sekitarnya. Hasil akhir diharapkan dapat melakukan simulasi computer terhadap kemungkinan peristiwa lahar dingin dan dihasilkan daerah berbahaya tersebut (terutama di sekitar permukiman).

Widodo Brontowiyono (2010) berusaha menganalisis kemampuan tampungan sungai Code terhadap material lahar dingin pasca erupsi 2010. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur ketebalan lahar dingin dan mengidentifikasi kondisi akibat lahar dingin di sepanjang sungai Code. Data yang dibutuhkan ialah peta RBI skala 1:25.000 dan peta DAS Code. Penelitian ini menggunakan metode survey lapangan dan *transect walk* dalam pengukuran ketebalan lahar yang dilakukan setiap satu kilometer. Sedangkan untuk mengetahui kondisi, metode yang digunakan ialah dengan survey dokumentasi

Perkembangan penginderaan jauh foto udara kini semakin dikembangkan karena adanya beberapa kelemahan penginderaan jauh non foto. Penginderaan jauh sistem fotografi adalah sistem penginderaan jauh yang di dalam merekam objek menggunakan kamera sebagai sensor, menggunakan film sebagai detektor, dan

menggunakan tenaga elektromagnetik yang berupa spektrum tampak dan perluasannya (Sutanto, 1987).

Teknologi FUFK, pada dasarnya adalah menghasilkan foto udara dengan menggunakan kamera non metrik/kamera amatir (kamera yang tidak didesain untuk keperluan pemotretan udara) dan menggunakan pesawat ringan (*ultralight*). Warner et al (1996) mengklasifikasikan jenis kamera berdasarkan ukuran film (*frame*) dan panjang fokus kamera dalam 3 golongan, yaitu: kamera format standar, format medium, dan format kecil. Kamera format kecil memiliki ukuran film sekitar 24 mm x 36 mm dengan panjang fokus 35 mm serta ketebalan sekitar 0,05 mm, dapat berupa kamera analog atau digital. Kamera format kecil ini sistem lensanya tidak didesain untuk keperluan pemetaan sehingga disebut kamera non metrik dan harganya relatif murah, tetapi sangat potensial memiliki distorsi geometri. Wahana (*platform*) pemotretan adalah pesawat terbang yang melakukan pemotretan dari ketinggian 1500 m di atas permukaan datum. Satu roll film mempunyai kapasitas pemotretan sebanyak 36 kali pembukaan cahaya (*exposure*).



Gambar 1. Contoh salah satu FUFK pada penelitian

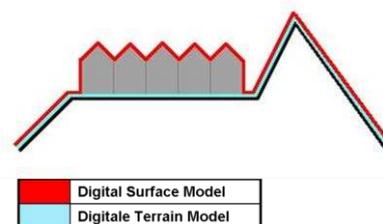
Distorsi geometrik pada FUFK cenderung lebih kompleks daripada foto udara standar (foto udara metrik), dan secara spesifik dapat dikelompokkan dalam 2 kondisi yaitu;

1. Kondisi intrinsik, kondisi ini disebabkan oleh nilai intrinsik dan stabilitas sistem lensa. Dalam komunitas fotogrametri, nilai intrinsik lebih dikenal sebagai parameter orientasi dalam (IOP, *interior orientation parameter*). Dan umumnya ditentukan dengan cara kalibrasi kamera.
2. Kondisi proses yang disebabkan oleh operasional penggunaan pesawat ringan untuk pemotretan. Jenis pesawat ini sangat dipengaruhi oleh kondisi angin dan ketidaksinkronan antara saat pemotretan dan kecepatan pesawat yang

menyebabkan posisi (X, Y, Z) dan orientasi (ω , ϕ , κ) kamera pada saat pemotretan yang dapat sangat bervariasi antar foto. Kondisi proses pemotretan ini dapat menyebabkan: variasi skala yang beragam antar foto, ketidakaturan pertampalan (*overlap*) foto udara baik ke arah jalur terbang dan antar jalur terbang, dan rasio B/H (*Base/Height Ratio*)

DEM merupakan data digital yang menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik-titik koordinat hasil sampling dari permukaan dengan algoritma yang mendefinisikan permukaan tersebut menggunakan himpunan koordinat (Temfli, 1991). Sedangkan menurut Frederic J. Doyle (1991) dalam Purwanto (2008), yang dimaksud dengan DEM adalah suatu sistem, model, metode, dan alat dalam mengumpulkan, processing, dan penyajian informasi medan. Susunan nilai-nilai digital yang mewakili distribusi spasial dari karakteristik medan, distribusi spasial diwakili oleh nilai-nilai pada sistem koordinat horisontal X Y dan karakteristik medan diwakili oleh ketinggian medan dalam sistem koordinat Z. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa DEM pada intinya merupakan model permukaan bumi yang dibuat dalam bentuk 3 dimensi sebagaimana kondisi sebenarnya di lapangan.

DEM yang menyajikan permukaan bumi beserta segala penutup lahan yang ada di atasnya dinamakan *Digital Surface Model* (DSM). Sedangkan DEM yang hanya merepresentasikan konfigurasi *terrain* tanpa penutup lahan yang ada di permukaan tanah, sering disebut sebagai *Digital Terrain Model* (DTM). Dengan demikian, DSM dapat dikatakan lebih detail dibandingkan DTM yang hanya merepresentasikan permukaan bumi berdasarkan konfigurasi *terrain* tanpa penutup lahan yang ada di atasnya sebagaimana dapat dilihat pada Gambar di bawah



Gambar 2. Perbedaan DTM dan DSM

METODE PENELITIAN

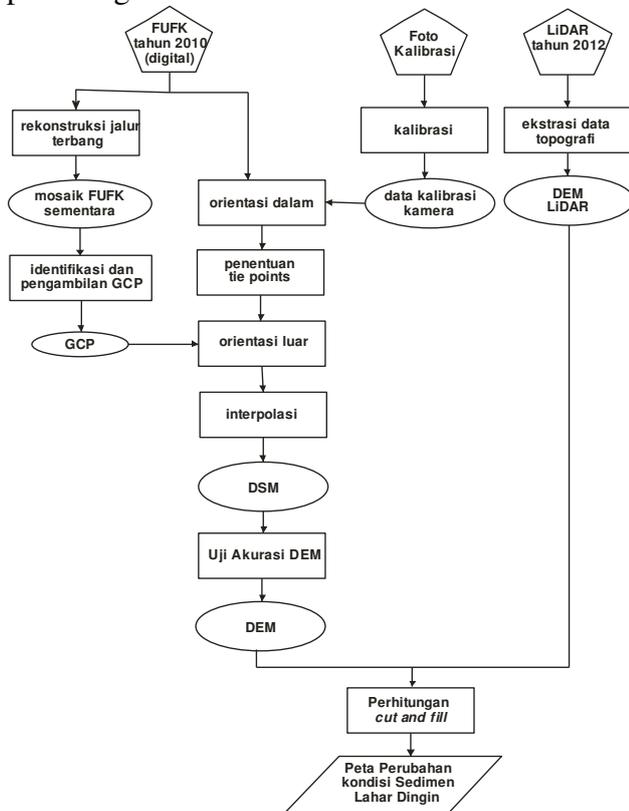
Alat yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:

1. Computer
2. GPS
3. Alat Tulis
4. Kamera digital

Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:

1. FUFK daerah Kali Gendol
2. DEM LiDAR daerah Kali Gendol
3. Peta RBI sheet Kaliurang Kabupaten Sleman

Tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian terlihat pada diagram alir di bawah. Secara garis besar, tahapan penelitian yang dilakukan mencakup rekonstruksi jalur terbang, identifikasi dan penentuan GCP, orientasi dalam, kalibrasi kamera, penentuan *tie points*, orientasi luar, pembuatan DEM, uji akurasi DEM, pengolahan DEM LiDAR, dan perhitungan volume sedimen.



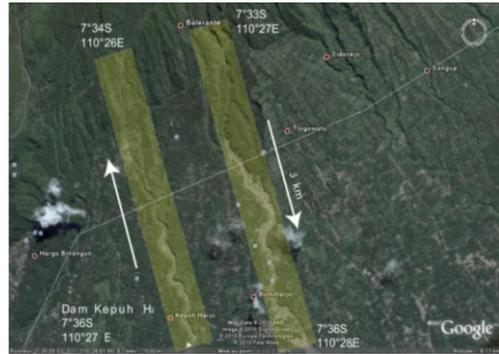
Gambar 3. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rekonstruksi Jalur terbang

Wilayah Kali Gendol dimulai dari DAM Kepuharjo pada bagian selatan menuju utara sejauh 3 km. Sepanjang jarak tersebut dapat dihasilkan 38 foto yang diharapkan dapat digunakan untuk melakukan pemetaan detail dalam skala besar. Karena objek yang dipotret berupa sungai, maka hanya terdapat satu jalur terbang di setiap alur sungai. Gambar 4.1 di bawah menunjukkan peta rencana terbang di

Kali Gendol dan Kali Woro yang diambil dari perekaman satelit tahun 2010 (pra erupsi 2010).



Gambar 4. Rencana Jalur Terbang Pemotretan Udara Kali Gendol dan Kali Woro (Sumber: Barandi, 2010)

Penyusunan mosaik dari foto udara ini dilakukan per foto dengan mencocokkan dan menampalkan satu foto ke foto yang lain. Meskipun proses penyusunan belum benar secara geometric (mengabaikan kesalahan-kesalahan saat pemotretan), namun secara umum gambaran wilayah sungai dapat direkonstruksi menurut jalur terbang. Mosaik FUFK ini tersusun menjadi satu jalur terbang menurut hasil rekonstruksi dan ini memudahkan untuk melakukan rektifikasi juga analisis lain lebih lanjut.

Identifikasi dan Penentuan GCP

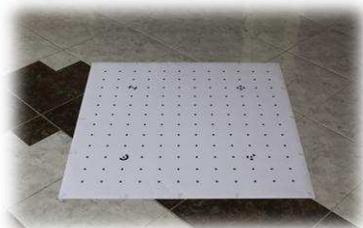
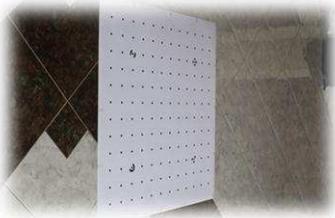
Pengambilan koordinat dari GCP di lapangan menggunakan foto udara yang dicetak, peta RBI, dan GPS, serta peta rencana terbang. Titik-titik GCP kemudian diambil dari lokasi rumah-rumah dan bangkai sisa rumah yang masih ada di sekitar sungai. Pencarian GCP dimulai dari titik acuan di peta rencana terbang yaitu pada titik lokasi DAM Kepuharjo hingga ke utara. GCP meskipun dibutuhkan 4 titik tetapi perlu diambil sebanyak mungkin untuk mengantisipasi adanya GCP yang akhirnya tidak dapat digunakan.

Selanjutnya penentuan GCP tersebut perlu mempertimbangkan banyaknya foto yang bertampalan dan luas tampalan. Jumlah foto bertampalan minimal dua foto dan memiliki luas tampalan minimal 70% dari luas foto. Jumlah foto yang diproses ialah 38 foto dengan luas tampalan kurang lebih 70%. Penelitian ini setidaknya perlu menggunakan minimal empat GCP untuk dapat memperbaiki koordinat geometric foto. GCP yang diambil sebanyak 7 titik tersebar di seluruh bagian foto (utara/ atas,

tengah, dan selatan/ bawah) dan mengutamakan foto-foto yang bertampalan lebih dari dua.

Kalibrasi Kamera

Proses kalibrasi membutuhkan kamera dan lensa yang digunakan ketika pemotretan, papan *checkerboard*, ruangan terbuka dengan pencahayaan cukup, dan peralatan pelengkap lain. Kamera yang digunakan seperti penjelasan di atas ialah Canon tipe EOS 5D III dengan lensa 50 mm. Sementara papan *checkerboard* seperti gambar di bawah dibuat dengan beberapa titik sebagai objek statis agar dapat dihitung pergeseran kamera ketika objek dipotret dari arah-arah yang berlainan. Titik-titik ini dibuat dengan jarak 10 cm pada kertas manila berukuran 1 x 1 m.



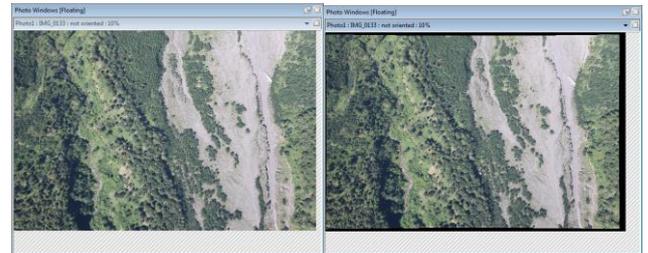
Gambar 5. Foto hasil kalibrasi

Kalibrasi dilakukan dengan bantuan software Photo Modeler Scanner dan menghasilkan nilai-nilai parameter intrinsik untuk memperbaiki bentuk foto. Foto yang diinput ialah foto yang baik dengan memperlihatkan jumlah titik-titik statis lengkap (jangan sampai ada bagian yang tidak masuk dalam foto). Sebaliknya jangan sampai ada titik-titik lain yang teridentifikasi. Titik-titik ini kemudian akan ditandai satu per satu oleh software tersebut. Hasil kalibrasi sebenarnya merupakan angka-angka yang kemudian akan dipadukan dengan koordinat piksel pada data foto udara. Hasil akhir dari kalibrasi ini dapat dilihat seperti gambar di bawah. Gambar kedua menunjukkan bentuk foto yang sudah tidak lagi berbentuk persegi empat sama sisi. Bagian hitam foto menunjukkan adanya penyesuaian ukuran bentuk. Foto akan diletakkan sesuai posisi ketika kamera memotret. Kesalahan kecondongan

(pergeseran) kamera dan tinggi terbang dapat dihilangkan pada proses ini.

Orientasi Dalam

Kalibrasi kamera menghasilkan beberapa perubahan parameter-parameter intrinsik seperti table di bawah. Angka-angka tersebut menunjukkan kondisi stabil ketika pemotretan saat itu. Parameter tersebut terdiri dari panjang focus, format foto (ukuran foto), letak principal point, besar distorsi lensa, RMS keseluruhan, dan cakupan foto efektif. Karena angka yang berubah maka posisi foto juga akan menyesuaikan seperti perbedaan gambar di bawah.



Gambar 6. (a) Foto sebelum proses orientasi dalam, (b) Foto setelah proses orientasi dalam

Tabel 1. Tabel hasil kalibrasi kamera

Aspek	Keterangan
Panjang focus	53.3803
Format Foto	W = 36.4978 H = 24.3332
Letak principal point	X = 18.6171 Y = 12.1529
Distorsi Lensa	K1 = 5.038×10^{-5} K2 = 1.459×10^{-8} K3 = -5.850×10^{-11} P1 = -2.427×10^{-6} P2 = 6.137×10^{-6}
Overall residual RMS	0.0900
Maximum residual	0.3737
Photo coverage	70%

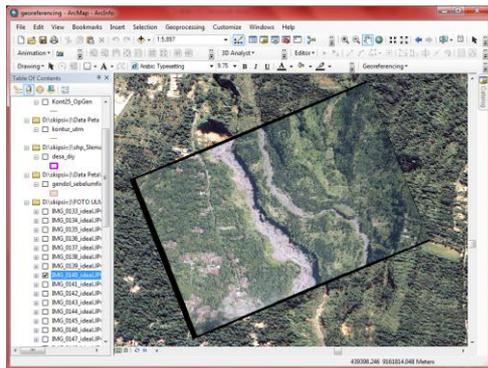
Sumber: Pengolahan data

Koreksi Geometrik

Proses koreksi dilakukan secara non sistematis atau acak, yaitu dengan mereferensikan citra acuan terhadap citra yang belum memiliki sistem koordinat. Awalnya data acuan menggunakan peta RBI, namun karena perbedaan kepentingan dari skala (terlalu banyak generalisasi) maka digunakanlah yang resolusinya mendekati foto udara. Dari sekian data akhirnya digunakanlah citra quickbird (dalam bentuk tiff) dengan koordinat UTM sebagai referensi. Citra quickbird memiliki

resolusi spasial hingga 0,6 m dan cukup mendekati skala foto.

Foto asli hasil kalibrasi menunjukkan arah yang berlawanan sehingga perlu merotasikan foto udara sebesar 180 derajat. Hasil koreksi dapat dilihat di bawah Koreksi geometric atau disebut juga *georeferencing* pada foto udara sebaiknya memiliki nilai RMSE yang lebih kecil dari 0,714 piksel (Rio dkk, 2008). Nilai RMSE tersebut menunjukkan selisih sebesar 0,561 m antara ukuran objek di lapangan dan di foto.



Gambar 7. Salah satu foto yang telah melalui georeferencing

Penentuan Tie Points

Tie Points merupakan pasangan titik dengan objek yang sama dari dua atau lebih foto udara. Suatu *tie point* dicari pada foto yang telah diorientasi oleh data kalibrasi. *Tie point* harus dipilih pada area yang termasuk area terorientasi dan berjumlah minimal enam titik setiap foto. Dua titik, agar menjadi berpasangan pada dua foto atau beberapa foto, perlu direferensikan dengan titik yang sudah ada sebelumnya.

Orientasi Luar

Orientasi luar merupakan suatu proses yang akan menghasilkan parameter ekstrinsik dari foto udara yang berupa koordinat tanah (x, y, z). *Tie points* yang telah dipilih dan diberi koordinat akan menjadi sampel atau acuan bagi *tie points* lain, sehingga akhirnya semua titik mempunyai koordinat tanah. Koordinat tanah setiap titik pada foto dapat dilihat pada gambar tabel di bawah pada kolom X (m), Y (m), dan Z (m). Tabel akan memperlihatkan pula keberadaan nilai RMS pada masing-masing foto untuk melihat keakuratan proses.

ID	Na...	RMS Residual (piksel)	Largest Residual (piksel)	Photo Largest Residual	Photos	X Precisi...	Y Precisi...	Z Precisi...	Tightne...	Angle (deg.)	Use In Process...	X (m)	Y (m)	Z (m)	Frc
193		2.0847...	2.9032...	7	6,7,8	0.2153...	0.5649...	1.5623...	0.5784...	10.680...	yes	439532...	916152...	974.42...	no
196		1.3858...	1.6771...	7	6,7,8,9	0.1373...	0.3695...	0.9766...	0.2442...	17.525...	yes	439452...	916142...	1019.8...	no
197		0.9595...	1.2968...	7	6,7,8	0.2188...	0.8506...	1.7003...	0.3341...	10.487...	yes	439324...	916137...	1022.5...	no
199		0.7975...	1.1091...	7	6,7,8	0.3110...	0.8027...	1.4765...	0.1821...	10.832...	yes	439249...	916137...	1077.0...	no
203		0.9876...	1.3975...	7	6,7,8	0.4408...	0.8158...	1.4992...	0.2580...	10.901...	yes	439155...	916141...	1079.2...	no
207		0.6712...	1.0952...	7	6,7,8,9	0.4491...	0.4326...	1.6138...	0.0494...	16.690...	yes	439658...	916164...	923.29...	no
230		0.9898...	0.9909...	8	7,8	0.5741...	1.0723...	2.9241...	0.2804...	5.1909...	yes	439630...	916145...	991.14...	no
234		0.5339...	0.6877...	8	7,8,9	0.4811...	0.6944...	1.6403...	0.1667...	11.385...	yes	439646...	916138...	976.35...	no
236		1.4146...	1.4152...	8	7,8	0.3172...	1.1198...	2.8823...	0.4102...	5.2199...	yes	439533...	916142...	996.89...	no
240		0.0816...	0.0816...	8	7,8	0.2849...	1.3157...	2.7269...	0.0233...	5.2443...	yes	439504...	916134...	1049.2...	no

Gambar 8 Tabel hasil proses orientasi luar

Interpolasi

Tie points (hanya yang digunakan) dapat diinterpolasi dengan metode IDW dan menghasilkan DSM. Gambaran DSM merepresentasikan kondisi lapangan dengan bagian badan sungai yang lebih rendah dari tanggul-tanggul di sebelah. Sebelah timur dan barat sungai utama terdapat alur sungai kecil sehingga gambaran DSM lebih bervariasi.

Uji Akurasi DEM (DSM)

Perhitungan DEM dari DSM menghasilkan factor pengurang seperti table di bawah. Nilai untuk setiap faktor pengurang disesuaikan dengan keberadaan dan keberagaman objek di daerah penelitian. Daerah Merapi khususnya Kali Gendol dan sekitarnya memiliki objek yang cukup beragam di antaranya hutan, kebun, semak/ belukar, permukiman, sawah, dan lahan terbuka. Objek-objek tersebut dikelaskan berdasar klasifikasi penutup lahan menurut Malingreau.

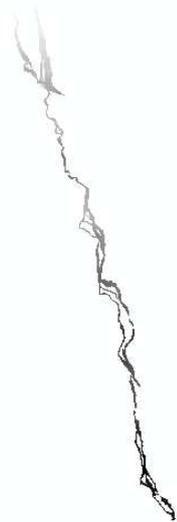
Tabel 4.2 Faktor pengurang DSM

Objek Faktor Pengurang	Nilai Pengurang (m)
Hutan	10
Kebun	6
Permukiman	3
Semak/ belukar	2
Sawah	1
Lahan terbuka	0

Perhitungan Volume

Volume sedimen diestimasi dengan metode *cut and fill* yang juga termasuk dalam *tool* yang ada di ArcGIS. Metode ini melibatkan penggunaan dua kondisi yang berbeda dari permukaan sungai untuk dapat menghitung material yang bertambah dan berkurang di permukaan sungai tersebut. Kondisi pertama yaitu dengan menggunakan DEM pra erupsi yang dihasilkan dari ekstraksi FUFK (2010), kondisi yang kedua menggunakan DEM pasca erupsi yaitu LiDAR (2012). Bagian yang diproses hanya pada bagian badan sungai tanpa

mempertimbangkan luapan ke tanggul sungai. Hal ini karena pada data DEM LiDAR sulit diidentifikasi mana tanggul hasil luapan lahar dingin dan mana tanggul asli sungai. Namun pada data LiDAR terlihat jelas perbedaan antara lembah dan tanggul sungai (rona lebih gelap). Gambar di bawah menunjukkan kondisi sungai pasca erupsi di wilayah penelitian. Bentuk sungai dipilih pada bentuk sungai pasca erupsi karena sebagai dasar dalam perhitungan *cut and fill*.



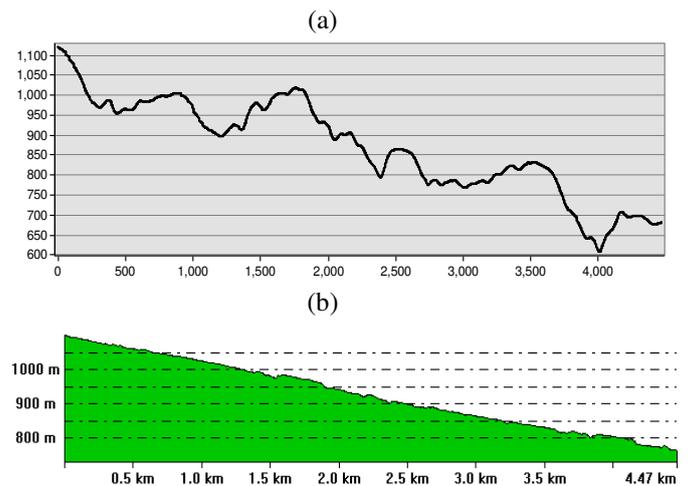
Gambar 9 Kondisi Kali Gendol pasca erupsi

Pengolahan volume ini dilakukan pada setiap *cell* raster dengan prinsip menyeimbangkan nilai. Nilai-nilai setiap *cell* yang berkurang, bertambah, maupun tidak berubah akan bersatu dengan nilai yang seragam terdekat membentuk suatu area atau polygon. Semakin luas area yang seragam semakin banyak perhitungan atau pengulangan *count*. Gambar polygon dapat dilihat seperti peta estimasi. Polygon ini kemudian memiliki atribut informasi yang menunjukkan hasil seperti table di bawah. Warna merah pada polygon merupakan *netgain* dimana ada penambahan material, sedangkan warna biru merupakan *netloss* dimana ada pengurangan material, sementara warna abu-abu dimana tidak ada perubahan apapun. Berdasar table, nilai total penambahan material ialah sebesar 5,27 juta m³ dan nilai total pengurangan material sebesar 4,96 juta m³, jadi apabila dicari selisih untuk mengetahui volume akhir sebenarnya sebesar 0,31 juta m³.

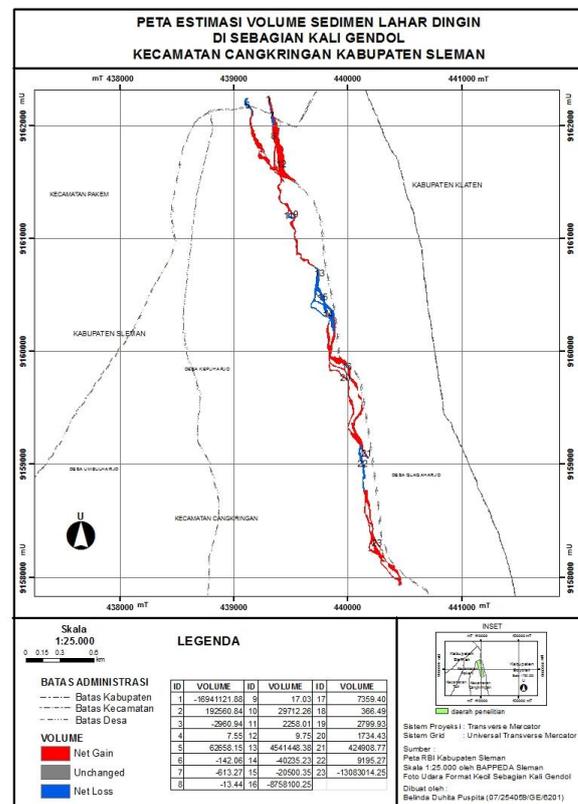
Tabel 4.3 Hasil Proses Cut and Fill

ID	VOLUME	ID	VOLUME	ID	VOLUME
1	-16941121.88	9	17.03	17	7359.40
2	192560.84	10	29712.26	18	366.49
3	-2960.94	11	2258.01	19	2799.93
4	7.55	12	9.75	20	1734.43
5	62658.15	13	4541448.38	21	424908.77
6	-142.06	14	-40235.23	22	9195.27
7	-613.27	15	-20500.35	23	-13083014.25
8	-13.44	16	-8758100.25		

Sumber: Hasil pengolahan



Gambar 4.22 Profil melintang (a) pra erupsi, (b) pasca erupsi



KESIMPULAN

1. Pembuatan DEM dari FUFK melalui beberapa proses fotogrammetri digital. Pada prinsipnya, proses fotogrammetri digital mirip dengan proses fotogrammetri konvensional kecuali dengan menambah pertimbangan distorsi lensa. Tahapan proses fotogrammetri digital untuk mendapat DEM dan akurasi yaitu rekonstruksi jalur terbang, identifikasi dan pengambilan GCP (sehingga bila berhasil tidak diperlukan lagi registrasi FUFK), kalibrasi kamera, orientasi dalam, penentuan *tie points* (titik-titik yang sama pada beberapa foto), perhitungan orientasi luar, pembuatan DEM, serta uji akurasi DEM.
2. Akurasi dari FUFK dinilai dari dua aspek yaitu akurasi horizontal dan vertical. Akurasi horizontal menghasilkan 12,9 m sementara akurasi vertical sebesar 17,51 m.
3. Volume sedimen didapat dengan terlebih dulu mengolah DEM LiDAR sehingga dapat dilakukan proses *cut and fill* untuk perhitungan volume dari kondisi pra erupsi (dari FUFK) dan pasca erupsi. Volume total sedimen yang bertambah di badan sungai sebesar 5,27 juta m³, sedangkan yang berkurang 4,96 juta m³, sementara nilai total setelah dicari selisih mendapatkan volume akhir sebesar 0,31 juta m³.

DAFTAR PUSTAKA

- Adityo, R. D., (2012). *Kalibrasi Parameter Kamera dengan Proyeksi Pattern Menggunakan Projector pada Proses Rekonstruksi 3D Berbasis Structered Light*. Semantik 2012. Surabaya: Politeknik Sakti Surabaya.
- Hanifa, N. R. 2007. *Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non Metric Auto-Focus untuk Pemantauan Deformasi*. Bandung: Teknik Sipil dan Lingkungan ITB.
- Harintaka, dkk. 2006. *Otomatisasi Pembuatan Mosaik Menggunakan Teknik Korelasi Silang pada Foto Udara Format Kecil*. Yogyakarta: Teknik Geodesi UGM.
- Harintaka, dkk. (2008). *Evaluasi Penerapan Mini Bundle Adjustment pada Foto Udara Format Kecil*. Media Teknik (No.3 Tahun XXX Edisi Agustus). Yogyakarta: UGM.

Harintaka, dkk. *Pemodelan Ketidakstabilan Kamera dan Gerakan Pesawat pada Saat Pemotretan Foto Udara Format Kecil*. Yogyakarta: UGM.

Jaya, I. N. S dan Agung Budi C. 2001. *Kajian Teknis Pemanfaatan Potret Udara Non-Metrik Format Kecil pada Bidang Kehutanan*. Jurnal Manajemen Hutan Tropika Vol VII No 1: 55-64.

Rio Muhammad, dkk. *Studi Perbandingan Ketelitian Planimetris Foto Udara Format Kecil dengan Citra Satelit Resolusi Tinggi (Quickbird)*. Surabaya: ITS.

Rokhmana, C. A. *Sistem Pemantauan Tata Ruang Kota dengan Wahana Udara Nir-Awak sebagai Penyedia Foto Udara Murah*. Yogyakarta: Teknik Geodesi UGM.