

Pemanfaatan metode TLS (*Terrestrial Laser Scanning*)

untuk pemantauan deformasi gunung api.

Studi kasus: kerucut sinder Gunung Galunggung, Jawa Barat

Utilizing of TLS (Terrestrial Laser Scanning) method for volcano deformation monitoring. Case study: Cinder cone of Galunggung Volcano, West Java

Yudovan Vidyan¹, Hasanuddin Z. Abidin¹, Irwan Gumilar¹, dan Nia Haerani²

¹Kelompok Keilmuan Geodesi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132

²Badan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi,

Jln. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada konsep dasar, prosedur, dan pemantauan deformasi kerucut sinder (*cinder cone*) Gunung Galunggung dengan menggunakan metode *Terrestrial Laser Scanning* (TLS). Pemantauan deformasi dengan menggunakan titik kontrol yang selama ini biasa digunakan tidak merepresentasikan zona deformasi secara keseluruhan. Hal tersebut dapat diatasi dengan pemanfaatan teknologi TLS. Saat ini pemantauan deformasi gunung api dengan menggunakan TLS belum banyak dilakukan. Permasalahan dalam penerapan metode TLS untuk pemantauan deformasi gunung api pun belum banyak diketahui. Oleh sebab itu tulisan ini mencoba mengkaji masalah tersebut. Metodologi yang digunakan adalah studi literatur, membuat perencanaan pengukuran, melaksanakan pengambilan data, mengolah data TLS, dan membandingkan model tiga dimensi (3D) untuk menginterpretasikan deformasi kerucut sinder dari dua kala pengukuran, yaitu pada bulan April 2012 dan September 2012. Model 3D dari kedua kala kemudian dibandingkan untuk memperoleh kisaran nilai vektor deformasi vertikal serta volume permukaan kerucut sinder. Hasil akhir yang diperoleh berupa model deformasi 3D kala kedua terhadap kala pertama. Dari hasil penelitian ini didapat estimasi volume kala pertama sebesar 21.635,19 m³ dan kala kedua sebesar 21.513,15 m³ serta rentang deformasi dominan sebesar 6-10 cm. Hasil pemodelan morfologi 3D dari pengukuran TLS dapat diaplikasikan untuk pemetaan dan pemantauan deformasi kerucut sinder Gunung Galunggung. Hasil pemodelan pada kedua kala menunjukkan adanya nilai deformasi namun dengan nilai yang relatif tinggi. Hal ini disebabkan oleh permukaan objek yang tidak konsisten akibat gangguan dari vegetasi, proses pemfilteran secara manual serta belum adanya koreksi terhadap sumber kesalahan.

Kata kunci: *Terrestrial laser scanning*, deformasi, gunung api, kerucut sinder

ABSTRACT

This research is focused on basic concept and procedures of deformation monitoring of Galunggung volcano cinder cone using Terrestrial Laser Scanning (TLS) method. Deformation monitoring which has been applied using point

Naskah diterima 4 Maret 2013, selesai direvisi 26 Maret 2013

Korespondensi, email: yvidyan@yahoo.com

control approach cannot fully interpret the deformation zone. This can be overcome by the use of TLS technology. There are only a few researches about volcano deformation using TLS till these days, and consequently, the problems that may probably arise in this monitoring are still unknown. This research try tries to asses this these problems. Methodology used in this research consist of literature study, survey planning, acquiring data, TLS data processing, and comparison of 3D model to interpret cinder cone deformation from two epoch of observations that have been conducted on in April 2012 and September 2012. Three-dimensional model of these two observations are compared to obtain the deformation vector values and cinder cone surface volume. The final results obtained from this research are the volume estimation of the first and the second observations, and also the deformation range, which are 21,635.19 m³, 21,513.15 m³, and 6-10 cm, respectively. The result of 3D morphology modeling using TLS can be applied for mapping and monitoring the cinder cone deformation of Galunggung Volcano. The modeling result showed that there are deformation between two epoch but with relatively high values of displacement. This high values due to object surface inconsistency because of caused by vegetation disturbance, manual filtering process and also the absence of no correction of error sources.

Keywords: *Terrestrial laser scanning, deformation, volcano, cinder cone*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kegiatan pemantauan deformasi sudah lama dilakukan di berbagai tempat, khususnya untuk mitigasi bencana. Metode yang biasa dilakukan adalah dengan memasang titik pantau di zona deformasi dan melakukan pengukuran titik kontrol tersebut terhadap titik acuan yang dipasang pada zona yang dianggap stabil untuk menentukan besar dan arah perpindahan dari titik-titik kontrol dengan pengukuran terestris. Setelah meluasnya penggunaan satelit navigasi GPS (*Global Positioning System*), metode survei GPS geodetik pun digunakan untuk melakukan pengukuran pada titik-titik kontrol pada zona deformasi dan memberikan data yang lebih cepat dan akurat jika dibandingkan dengan pengukuran terestris.

Beberapa metode telah diterapkan untuk pemantauan deformasi, tetapi masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan (Tabel 1).

Permasalahan yang muncul dalam pengukuran dengan cara terestris maupun dengan GPS adalah pengukuran yang dilakukan hanya pada titik-titik yang dianggap mewakili zona deformasi. Sedangkan pada zona deformasi, objek yang dipantau berupa permukaan tanah yang beragam bentuknya. Selain itu dengan pengukuran berbasis titik, model yang dihasilkan merupakan hasil interpolasi dari titik-titik yang ada dan kurang merepresentasikan zona deformasi secara keseluruhan.

Saat ini telah ada teknologi yang memungkinkan untuk segera memperoleh data permukaan objek pada kerapatan tinggi dengan menggunakan instrumen *laser scanner* (pemindai laser). Salah satu penggunaan pemindai laser adalah untuk memetakan suatu lahan atau daerah secara tiga dimensi dengan kerapatan tinggi dan akurasi data yang baik yang dinamakan dengan metode *Terrestrial Laser Scanning* (pemindai laser terestris) yang selanjutnya disebut TLS dalam tulisan ini.

Tabel 1. Metode Pemantauan Deformasi Gunung Api (Mc Guire drr, 1995)

No	Metode	Kegunaan	Kelebihan	Kekurangan
1	Sipat datar (levelling)	Mengukur beda tinggi antar titik.	<ul style="list-style-type: none"> a. Hasil pengukuran diperoleh lebih cepat (langsung). b. Biaya operasional rendah. c. Ketelitian hingga mm. d. Tidak memerlukan banyak tenaga pelaksana. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Memerlukan banyak tenaga pelaksana. b. Waktu survey lebih lama c. Sering terjadi kesalahan pembacaan dan pembatasan. d. Penempatan rambu tidak vertikal. e. Harus pada tempat dengan batuan kompak. f. Paralaks yang ditimbulkan pada saat pengukuran. g. Biaya lebih mahal
2	EDM	Mengukur perubahan panjang baseline antar titik.	<ul style="list-style-type: none"> a. Memiliki resolusi spasial yang tinggi. b. Dapat digunakan untuk pengamatan kontinyu. c. Cakupan luas. d. Aman untuk daerah gunung api 	<ul style="list-style-type: none"> a. Jarak optimum hanya ≤ 3 km. b. Harus saling terlihat antara instrumen dan reflektor. c. Sangat tergantung cuaca. d. Memerlukan koreksi cuaca baik pada instrumen maupun reflektor.
3	InSAR	Menggambarkan deformasi yang kontinyu dengan resolusi spasial tinggi.	<ul style="list-style-type: none"> a. Data yang diperoleh bersifat realtime. b. Tidak memerlukan proses pengolahan 	<ul style="list-style-type: none"> a. Tidak akurat jika untuk areal hutan lebat dan tertutup salju. b. Sulit mencari pasangan citra yang koheren. c. Penyediaan citra sangat tergantung pada fihak lain
4	Tiltmeter	Mengukur kemiringan/gradien suatu area.	<ul style="list-style-type: none"> a. Dapat memberikan komponen vektor pergerakan dalam 3 dimensi. b. Sistem kordinat referensi tunggal. c. Tingkat presisi hingga mm. d. Tidak tergantung cuaca. e. Alat tidak harus saling melihat 	<ul style="list-style-type: none"> a. Sangat sensitif, penempatan alat harus pada batuan kompak. b. Harus ditempatkan mendekati titik kegiatan erupsi
5	GPS	Menentukan koordinat dalam bentuk tiga dimensi	<ul style="list-style-type: none"> a. Dapat memberikan komponen vektor pergerakan dalam 3 dimensi. b. Sistem kordinat referensi tunggal. c. Tingkat presisi hingga mm. d. Tidak tergantung cuaca. e. Alat tidak harus saling melihat 	<ul style="list-style-type: none"> a. Memerlukan lebih dari satu alat. b. Waktu pengamatan di lapangan relatif lama. c. Peralatan relatif lebih mahal. d. Tidak bisa digunakan pada saat krisis.

Tabel 1. Metode Pemantauan Deformasi Gunung Api (Mc Guire drr, 1995) (Lanjutan)

No	Metode	Kegunaan	Kelebihan	Kekurangan
6	TLS	Menentukan koordinat dalam bentuk tiga dimensi, memetakan morfologi 3D	<ul style="list-style-type: none"> a. Dapat memberikan kordinat tiga dimensi b. Waktu pelaksanaan survei lebih cepat c. Tidak kontak langsung dengan objek d. Akurasi hingga sub mm e. data yang diperoleh bersifat <i>near-realtime</i> 	<ul style="list-style-type: none"> a. Peralatan masih sangat mahal b. Mobilitas alat masih relatif sulit c. Kualitas hasil pengukuran dipengaruhi lingkungan dan objek

Sejak kemunculan TLS sampai saat ini, aplikasi survei dengan menggunakan TLS semakin meluas pada kalangan ahli survei dan ahli ilmu kebumihan. TLS memiliki kemampuan untuk mengambil data berupa *point clouds* (awan titik) yang sangat rapat dan akurat dalam waktu yang cepat dan cara pengambilan data yang relatif mudah. Awan titik adalah sekumpulan kordinat XYZ di dalam suatu sistem kordinat tiga dimensi (Quintero drr, 2008). Awan titik juga

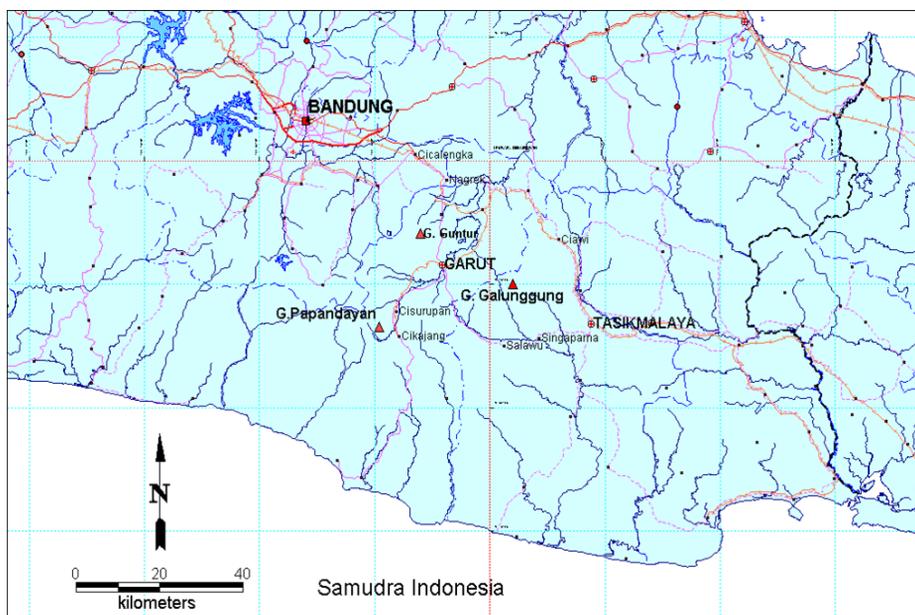
mengandung informasi lain, seperti warna dan nilai pantulan benda. TLS memberikan metode pengumpulan data dengan presisi tinggi, efektif, dalam bentuk resolusi tiga dimensi yang dapat diterapkan untuk pemantauan deformasi. Kelebihan dari penggunaan TLS untuk pengambilan data dan pemodelan deformasi terletak pada kemudahan untuk mendapatkan *Digital Surface Model* (DSM) dari suatu objek. DSM yang diperoleh akan memberikan penjelasan



Gambar 1. Kerucut sinder Gunung Galunggung, April 2012.

geometrik dari permukaan tanah secara akurat yang dapat digunakan untuk memprediksi perubahan geometrik suatu objek deformasi. Untuk pemantauan dan prediksi selanjutnya, DSM yang didapat dari waktu yang berbeda, dapat dibandingkan untuk mengevaluasi perubahan volume dan pembuatan model deformasi. Saat ini pemantauan deformasi gunung api dengan menggunakan TLS belum banyak dilakukan. Permasalahan dalam penerapan metode TLS untuk pemantauan deformasi gunung api pun belum banyak diketahui. Oleh sebab itu tulisan ini mencoba mengkaji masalah tersebut. Lokasi studi dalam penelitian ini adalah kerucut sinder (*cinder cone*) Gunung Galunggung, Jawa Barat, yang merupakan salah satu wilayah gunungapi aktif. Kerucut sinder Gunung Galunggung adalah produk terakhir dari rangkaian erupsi Gunung Galunggung 1982-1983, berbentuk kerucut dengan diameter lk. 100 m dan ketinggian 30 m (Gambar 1). Kerucut

sinder ini terbentuk di dasar kawah, terdiri atas material jatuhnya sebagai fase akhir dari letusan tipe Strombolian (Katili dan Sudradjat, 1984; Wirakusumah, 2012). Pemilihan lokasi studi didasarkan adanya kenaikan aktivitas vulkanik Gunung Galunggung pada bulan Februari 2012, sehingga pemantauan deformasi kerucut sinder diharapkan dapat dikaitkan dengan kenaikan aktivitas vulkanik tersebut. Studi deformasi Gunung Galunggung telah dilakukan sebelumnya pada tahun 2007 dengan menggunakan metode GPS dan sipat datar teliti (*precise levelling*). Kegiatan penelitian dengan metode TLS ini dilaksanakan oleh KK Geodesi FITB ITB bekerja sama dengan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Badan Geologi, sebanyak dua kali, yaitu pada April dan September 2012. Lokasi Gunung Galunggung ditunjukkan pada Gambar 2. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan membuat model deformasi tiga dimensi kerucut sinder



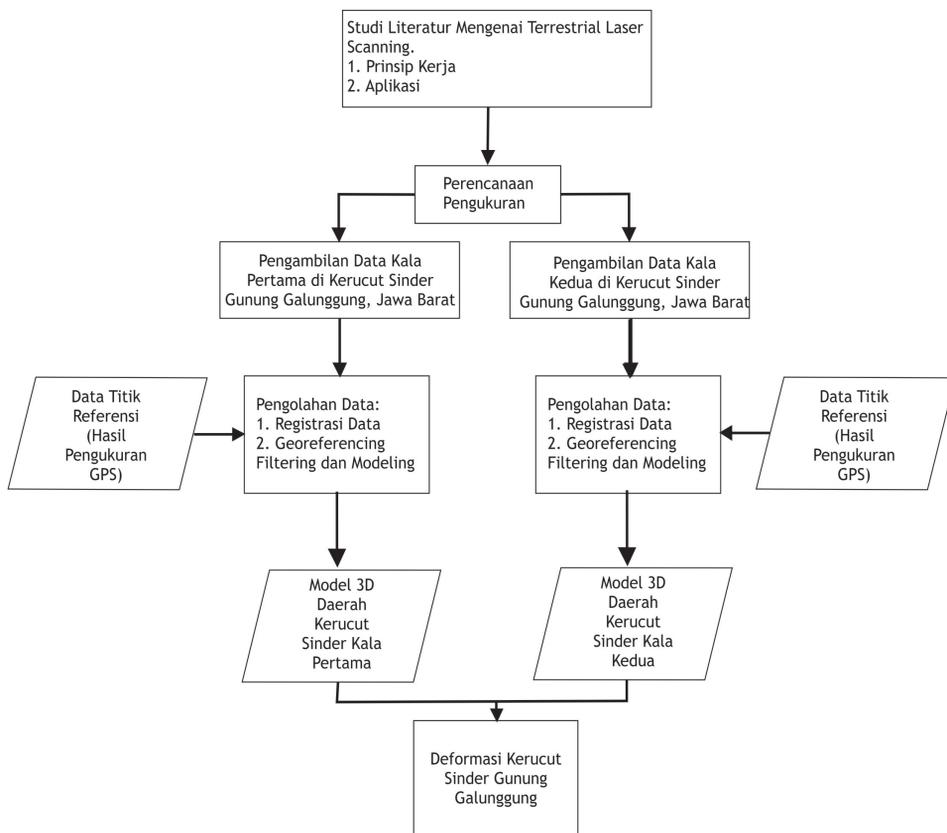
Gambar 2. Lokasi Gunung Galunggung (Triastuty dan Haerani 2012).

Gunung Galunggung dengan metode TLS dan mengetahui permasalahan yang ada pada pemanfaatan TLS untuk pemantauan deformasi, khususnya pada kasus kerucut sinder Gunung Galunggung. Metodologi penelitian ini terdiri atas studi literatur mengenai TLS untuk mendapatkan model deformasi gunungapi, membuat perencanaan pengukuran, melaksanakan pengambilan data pada bulan April dan September 2012, mengolah data awan titik yang didapat, dan membandingkan model tiga dimensi antar kedua periode pengukuran untuk membuat model deformasi kerucut sinder Gu-

nung Galunggung. Gambar 3 menunjukkan diagram alur kerja dari penelitian ini.

Gunung Galunggung

Galunggung merupakan gunungapi aktif tipe strato, yang di dalam pembagian fisiografi Jawa Barat, termasuk di dalam zona gunungapi Kuartar yang terbentuk di bagian tengah Jawa Barat, dan secara pembagian karakteristik sedimen batuan Tersier terletak di dalam cekungan Bogor. Gunung Galunggung menempati daerah seluas 275 km² dengan diameter 27 km (barat laut-tenggara) dan 13 km (timur laut-barat



Gambar 3. Alur metodologi penelitian.

daya). Di bagian barat berbatasan dengan Gunung Karacak, dibagian utara dengan Gunung Talagabodas, di bagian timur dengan Gunung Sawal dan di bagian selatan berbatasan dengan batuan Tersier Pegunungan Selatan (Bronto dr, 1989).

Karakter kegiatan Gunung Galunggung berupa erupsi leleran sampai dengan erupsi besar yang berlangsung secara singkat atau lama, atau dari erupsi yang bertipe Strombolian hingga Pellean. Letusan yang tercatat dalam sejarah letusan terjadi sebanyak empat kali, yaitu pada 1822, 1894, 1918, dan 1982–1983. Periode letusan terjadi selama beberapa jam hingga beberapa bulan. Letusan 1822, terjadi dalam satu hari, pada tanggal 8 Oktober 1822, antara pukul 13.00 hingga pukul 17.00 WIB. Letusan 1894, terjadi dalam 13 hari, pada tanggal 7-19 Oktober 1894. Letusan 1918, terjadi dalam empat hari, pada tanggal 16-19 Juli 1918. Letusan 1982-1983, terjadi dalam sembilan bulan, pada tanggal 5 April 1982-8 Januari 1983 (Badan Geologi, 2011).

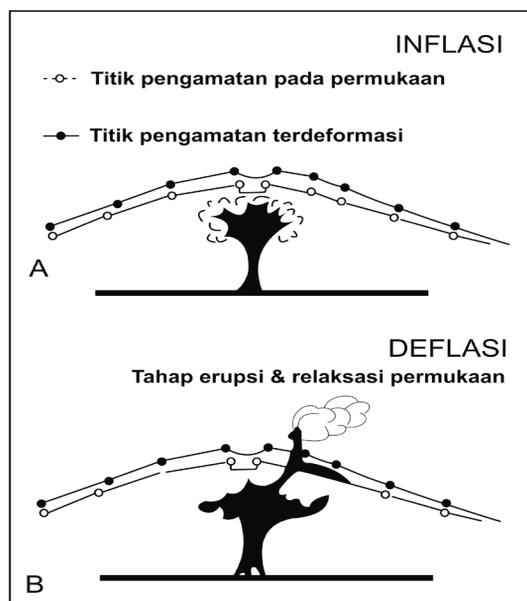
Deformasi Gunung Api

Pergerakan magma ke arah permukaan akan menghasilkan beberapa perubahan, misalnya peningkatan aktivitas kegempaan dan (atau) aktivitas fumarol, deformasi pada permukaan, serta gejala geofisika dan geokimia lainnya. Umumnya pergerakan material di bawah permukaan merupakan indikasi awal akan terjadinya erupsi dan kenaikan tekanan akan menghasilkan deformasi di permukaan (*ground deformation*).

Pengertian deformasi adalah perubahan bentuk, posisi dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Deformasi dapat diartikan sebagai pe-

rubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Dalam kaitannya dengan deformasi gunung api, perubahan yang dimaksud adalah perubahan atau pergeseran titik-titik pantau yang ditempatkan di sekitar tubuh gunung api. Secara kuantitatif, deformasi gunung api ditunjukkan dengan adanya perubahan geometrik dari titik-titik pantau.

Perubahan geometrik dari suatu benda dipengaruhi oleh gaya, fenomena fisik batuan (elastik, visko-elastik, nonelastik/*rigid*), serta waktu. Dalam deformasi gunungapi semua aktivitas erupsi sangat berhubungan erat dengan kegiatan magma. Kegiatan ini dicerminkan dan diidentifikasi sebagai peningkatan tekanan di dalam gunungapi yang disebabkan oleh gerakan magma di bawah permukaan (Gambar 4).



Gambar 4. Sketsa deformasi gunung api (Scarpa dan Tillig, 1996). (A) Pengangkatan permukaan gunung api, umumnya merupakan gejala pre-erupsi diakibatkan oleh naiknya magma. (B) Penurunan yang terjadi selama atau setelah periode letusan, terjadi karena tekanan magma berkurang.

DASAR TEORI

Pada bagian dasar teori akan dijelaskan mengenai konsep dasar dari TLS, teknik registrasi data dan *georeferencing*.

Terrestrial Laser Scanning

Terrestrial Laser Scanning adalah sebuah teknik menggunakan cahaya laser untuk mengukur titik-titik dalam sebuah pola secara langsung dalam tiga dimensi dari suatu permukaan objek, dari sebuah tempat di permukaan bumi. Hasil yang didapatkan dari pengukuran TLS ini adalah awan titik yang berkoordinat tiga dimensi terhadap tempat berdiri alat. Awan titik adalah kumpulan titik-titik dalam jumlah banyak yang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan model tiga dimensi (Quintero drr, 2008). Warna yang didapatkan oleh TLS adalah intensitas pantulan dari benda yang ditembak oleh laser, bukan warna objek pindai sebenarnya, karena TLS mempunyai kekurangan

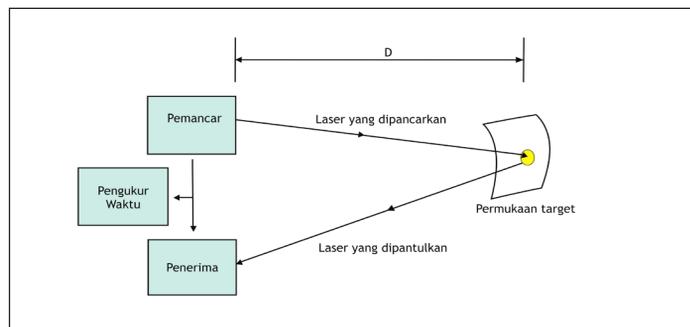
yaitu ketidakmampuan dalam mengakuisisi warna yang sesuai dengan warna aslinya.

Teknik pengukuran TLS dibagi menjadi dua metode yaitu metode statik dan dinamik. Prinsip dari metode statik adalah menempatkan alat TLS di lokasi yang tetap (tidak bergerak). Keuntungan metode ini adalah ketelitian yang tinggi dan jumlah titik yang lebih banyak. Prinsip metode dinamik adalah menempatkan alat TLS pada wahana bergerak seperti pesawat terbang, pesawat tanpa awak dan sebagainya. Metode ini membutuhkan komponen tambahan seperti GPS atau INS (*Inertial Navigation System*) yang menyebabkan metode ini lebih kompleks dan mahal. Beberapa jenis pemindai laser dapat dilihat pada Gambar 5.

Dalam penelitian ini, alat yang digunakan menggunakan metode pengukuran *pulse based*. Prinsip kerja *pulse based* adalah pengukuran yang didasarkan kepada waktu tempuh gelom-



Gambar 5. Beberapa jenis pemindai laser (Quintero dkk, 2008).



Gambar 6. Ilustrasi pengukuran jarak *pulse based* (diadaptasi dari Quintero dkk, 2008).

bang laser sejak dipancarkan sampai diterima kembali oleh penerima pulsa laser tersebut. Waktu tempuh tersebut digunakan untuk menghitung jarak antara alat TLS dengan target. Perhitungan jarak tersebut dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 6.

Jarak D dihitung dengan persamaan (Quintero dkk, 2008):

$$D = \frac{1}{2} \times c \times \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

D : jarak dari alat ke objek

c : kecepatan rambat gelombang (m/s)

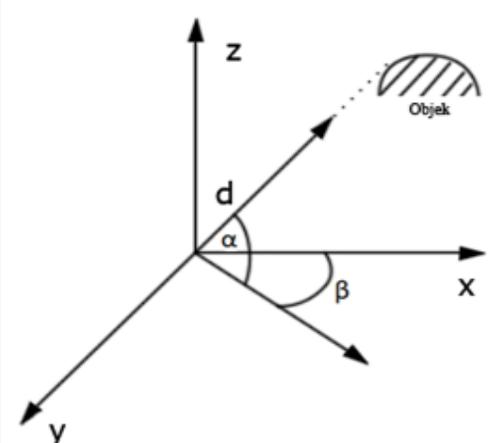
Δt : waktu tempuh (s)

Pulsa laser tersebut dipancarkan dari sumber laser mengenai titik di permukaan objek, kemudian dipantulkan kembali mengenai penerima sinyal laser. Alat penerima dan penghitung pulsa laser tersebut disebut *laser range finder*. *Laser range finder* ini hanya mendeteksi satu arah dari alat TLS tersebut. Bila arah tembakan laser tersebut diubah, jarak antara objek dengan pemancar sinyal pun akan berubah. Namun, *laser range finder* ini dapat diubah arahnya sesuai dengan arah tembakan dan besarnya daerah pandang yang akan dipindai. Secara garis besar, konsep pengukuran *laser scanner range finder* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Umumnya satu kali pemindaian tidak akan menghasilkan suatu model yang lengkap dari objek yang diinginkan. Dengan melakukan pemindaian berkali-kali, bahkan terkadang hingga ratusan kali, dari berbagai arah dapat diperoleh informasi tentang semua sisi dari objek. Hasil pindai yang banyak ini harus dibawa kedalam suatu sistem referensi umum dengan suatu

proses yang disebut registrasi, dimana *common point* (titik sekutu) pada sesi pindai yang berbeda disatukan sehingga semua awan titik berada dalam satu sistem referensi yang kemudian digabungkan untuk menciptakan suatu model yang lengkap.

$d_{horizontal} = d \times \cos(\alpha) \dots\dots\dots$	(2)
$X = d_{horizontal} \times \cos(\beta) \dots\dots\dots$	(3)
$Y = d_{horizontal} \times \sin(\beta) \dots\dots\dots$	(4)
$Z = d \times \sin(\alpha) \dots\dots\dots$	(5)



The diagram shows a 3D Cartesian coordinate system with axes x, y, and z. A laser beam is shown as a vector originating from the origin (0,0,0) and extending to a point labeled 'Objek'. The length of this vector is labeled 'd'. The angle between the vector and the x-axis is labeled 'alpha' (α). The angle between the vector and the z-axis is labeled 'beta' (β). The 'Objek' is represented by a shaded, dome-like shape in the upper right quadrant.

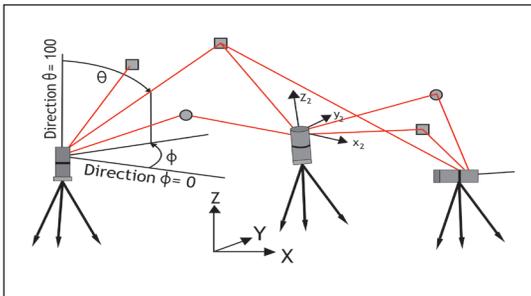
Gambar 7. Konsep pengukuran koordinat tiga dimensi pada pemindai laser range finder (Quintero dkk, 2008). Keterangan: α adalah sudut vertikal antara bidang horizontal dengan arah penembakan laser β adalah sudut horizontal antara arah penembakan laser dengan sumbu x alat. d adalah jarak yang didapatkan dari pengukuran waktu tempuh laser.

Teknik Registrasi Data Pemindai Laser

Teknik registrasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *target to target*. Metode ini merupakan metode yang paling umum digunakan. Target yang digunakan adalah target yang mempunyai reflektivitas tinggi dan dapat dikenali oleh alat sebagai target. Target ini selanjutnya digunakan sebagai titik ikat dari minimal dua tempat berdiri alat. Jumlah target minimal

adalah dua. Pada proses pengolahan, target tersebut menjadi titik ikat yang menggabungkan kedua tempat berdiri alat sehingga mempunyai arah orientasi relatif yang sama. Gambar 8 merupakan ilustrasi registrasi *target to target*.

Proses registrasi menggunakan perangkat lunak *Cyclone*. Tahap pertama dalam melakukan proses ini adalah mentransformasikan semua



Gambar 8. Ilustrasi registrasi *target to target* (Pfeifer, 2007)

data awan titik dari sistem koordinat lokal pemindai ke sistem koordinat yang digunakan dalam proses registrasi. Pada tahap ini, proses tersebut menggunakan transformasi Helmert tiga dimensi tanpa faktor skala (Cyra, 2003).

Georeferencing

Dalam pemantauan deformasi, penggunaan sistem referensi yang stabil sangat penting untuk membandingkan tempat pengambilan data pada kala yang berbeda. Oleh karena itu dibutuhkan titik referensi yang memiliki koordinat geodetik dengan ketelitian tinggi.

Ada dua cara yang dapat digunakan dalam proses *georeferencing*, yaitu *known backsight* dan *known azimuth* (Hasibuan, 2012). Pada *known backsight* diperlukan dua buah titik referensi yang koordinatnya diketahui. Selanjutnya satu koordinat berfungsi sebagai titik awal dan

yang satu lagi berfungsi sebagai *backsight*. Pada *known azimuth*, hanya diperlukan satu buah titik berkoordinat yaitu titik awal dan nilai *azimuth* dari titik awal ke titik selanjutnya. Pada kedua metode tersebut titik-titik referensi harus saling terlihat.

Alat yang digunakan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah: satu unit *Leica ScanStation C10* (Gambar 9), *Leica 3 inch* dan *6 inch HDS Target* masing-masing 2 set, satu unit *Leica Twin Pole Target* dengan ekstensi, lima set kaki tiga dan empat set *tribrach*.



Gambar 9. *Leica ScanStation C10* (Leica GeoSystems, 2011).

Akuisisi dan Pengolahan Data

Pada bagian akuisisi dan pengolahan data akan dijelaskan proses pengukuran pada kala pertama dan kala kedua serta pengolahan data berupa registrasi data dan pembersihan *noise* (derau).

Pengukuran Kala Pertama

Pengukuran TLS kala pertama dilakukan pada bulan April 2012. Skema pengambilan data TLS kala pertama ditunjukkan pada Gambar 10.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode statik dengan metode registrasi

target to target. Sebaran tempat berdiri alat dan tempat target divisualisasikan dalam Gambar 11. Sedangkan Tabel 2 menunjukkan urutan akuisisi dan target yang digunakan.

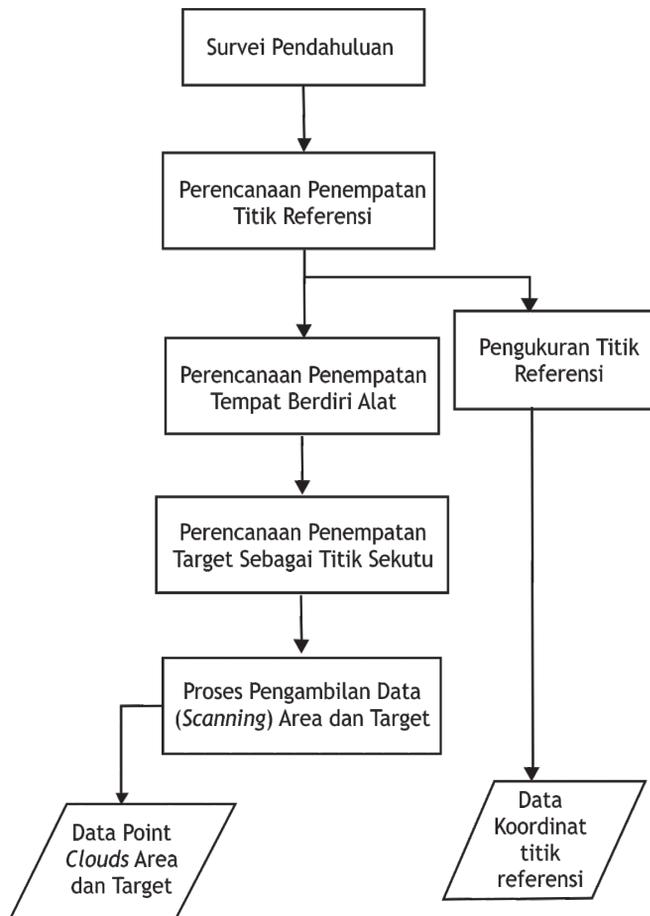
Pengukuran Kala Kedua

Pengukuran TLS kala kedua dilakukan pada bulan September 2012. Skema pengukuran TLS dan metode pengukuran yang digunakan sama dengan kala pertama. Tetapi pada kala kedua ini terdapat perbedaan tempat dan jum-

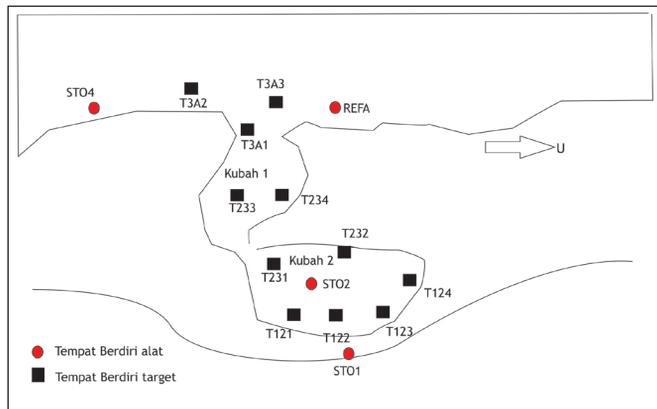
lah berdiri alat. Sebaran tempat berdiri alat dan tempat target pada kala kedua divisualisasikan dalam Gambar 3, sedangkan urutan akuisisi dan target ditunjukkan pada Tabel 3.

PENGOLAHAN DATA

Hasil pengukuran TLS dari dua kala diregistrasi dan dibersihkan dari derau dengan menggunakan perangkat lunak *Cyclone* v.8. Galat registrasi kala pertama yang dihasilkan berkisar



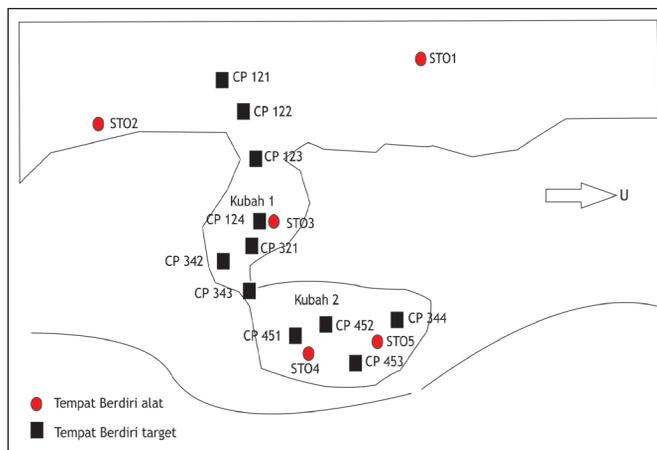
Gambar 10. Skema pengambilan data TLS.



Gambar 11. Persebaran tempat berdiri alat dan target, April 2012.

Tabel 2. Persebaran Target yang dibidik dari Tempat Berdiri Alat April 2012

	Target 1	Target 2	Target 3	Target 4	Target 5	Target 6	Target 7	Target 8
ST 01	T121	T122	T123	T124				
ST 02	T121	T122	T123	T124	T231	T232	T233	T234
REF A	T231	T232	T233	T234	T3A1	T3A1	T3A3	
ST 04	T234	T23A1	T3A2	T3A3				



Gambar 12. Persebaran tempat berdiri alat dan target, September 2012.

Tabel 3. Persebaran Target yang dibidik dari Tempat Berdiri Alat September 2012

	Target 1	Target 2	Target 3	Target 4	Target 5	Target 6	Target 7	TArget 8
ST01	CP 121	CP 122	CP 123	CP 124				
	CP 121	CP 122	CP 123	CP 124				
	CP 341	CP 342	CP 343	CP 344				
	CP 341	CP 342	CP 343		CP 451	CP 452	CP 453	
	CP 451	CP 452	CP 453					

antara 1-3 cm, hal ini lebih banyak disebabkan oleh jarak antara alat pemindai dan target yang terlalu jauh dan juga pengaruh awan/kabut di sekitar kawah. Galat registrasi kala kedua berkisar antara 1-8 mm. Galat lebih tinggi dengan kisaran 5-8 mm terdapat pada target *backsight top* dikarenakan target tersebut sangat rentan berpindah posisi saat target diputar untuk proses pemindaian target. Tabel 4 memperlihatkan perbedaan kondisi pada saat pengambilan data.

Kondisi kerucut sinder Gunung Galunggung banyak tumbuh pepohonan dan rumput liar sehingga memerlukan proses pemfilteran yang merupakan tahapan terpenting untuk mendapatkan data yang konkret dan akurat. Produk akhir yang diinginkan adalah model tiga dimensi permukaan tanah sehingga objek-objek lain selain permukaan tanah harus dihilangkan. Kesulitan utama terdapat pada objek rerumputan yang banyak terdapat di kedua kerucut sinder Gunung Galunggung. Beberapa metode pemfilteran dapat digunakan, salah satunya adalah metode *intensity cut*. Objek yang dipetakan akan memantulkan pulsa laser dalam intensitas yang berbeda tergantung dari kecerahan objek tersebut. Pada kasus penyediaan data pemantauan deformasi alamiah dimana data yang diperlukan adalah data permukaan tanah, dapat dilakukan pemisahan awan titik berdasarkan intensitas pantulan sinar laser yang

diterima oleh pemindai. Hal pertama yang harus dilakukan adalah melakukan *sampling* intensitas dari objek yang akan dipisahkan, pada kasus ini adalah permukaan tanah. Berdasarkan *sampling* di area yang diketahui merupakan permukaan tanah, pada kala pertama didapat intensitas pantulan tanah maksimal 0,17 dan pada kala kedua didapat intensitas pantulan tanah maksimal 0,12, sehingga objek dari masing-masing kala dengan intensitas pantulan yang lebih dari nilai tersebut dapat dipisahkan. Setelah dilakukan pemisahan berdasarkan intensitas (*intensity cut*), awan titik akan terbagi menjadi dua sesuai batasan intensitas yang diberikan. Sebagian besar awan titik dengan nilai intensitas di bawah 0,17 untuk kala pertama dan 0,12 untuk kala kedua merupakan permukaan tanah, namun tetap terdapat sejumlah daerah yang harus dibersihkan secara manual. Tabel 5 menunjukkan jumlah awan titik sebelum dan sesudah pemfilteran. Contoh data awan titik sebelum dan sesudah pemfilteran (contoh data bulan September 2012) ditunjukkan pada Gambar 13. Banyaknya awan titik yang hilang dikarenakan permukaan objek yang hampir seluruhnya adalah vegetasi sehingga permukaan tanah memiliki jumlah awan titik yang sedikit. Kondisi deformasi kerucut sinder Gunung Galunggung salah satunya dapat diidentifikasi dari pergeseran bidang vertikal serta perbedaan *volume* pada kedua kala. Untuk mengetahui

Tabel 4. Kondisi Kala Pertama dan Kedua

Kondisi	April 2012	September 2012
Jumlah Berdiri Alat	4	5
Jumlah Sebaran Target	11	11
Kondisi Cuaca	Cerah berawan, sedikit berkabut	Mendung
Kondisi Objek	Tertutup Vegetasi	Tertutup Vegetasi
Galat Registrasi	10 s/d 30 mm	1 s/d 8 mm

volume kerucut sinder, pertama kali data harus dirubah ke dalam bentuk TIN (*Triangulated Irregular Network*), yaitu suatu representasi permukaan yang tersusun dari jaring segitiga yang tidak saling bertampalan (Quintero drr, 2008). Selain itu, model TIN ini kemudian akan digunakan untuk keperluan pemodelan serta interpretasi deformasi.

Perhitungan volume menggunakan perangkat lunak *Cyclone* v.8, pemodelan 3D menggunakan perangkat lunak *Geomagic Studio* v.12, dan in-

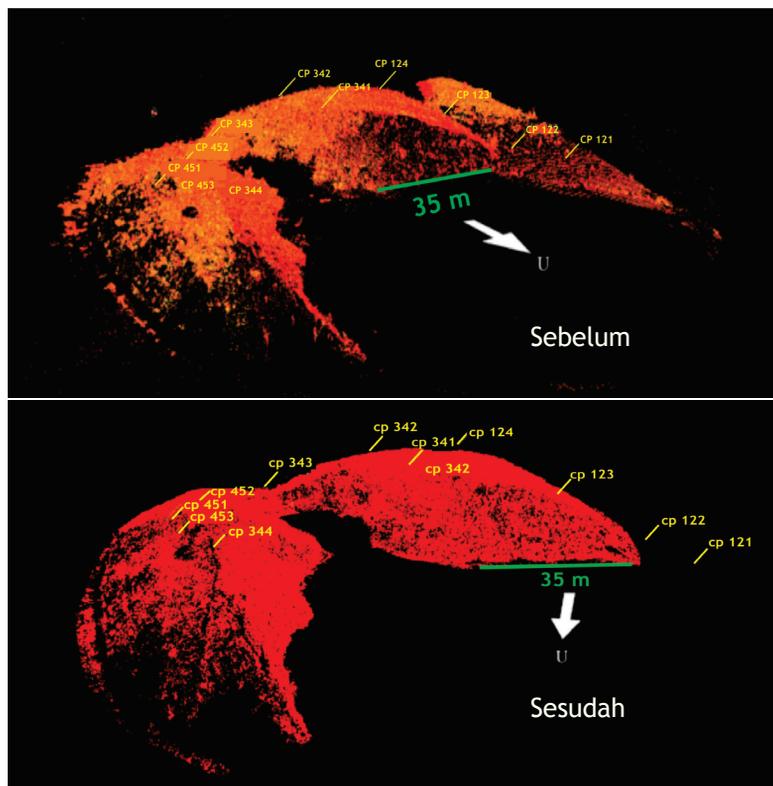
terpretasi deformasi menggunakan perangkat lunak *Geomagic Qualify* v.12. Pengolahan awan titik menggunakan *Geomagic Studio* menghasilkan model 3D secara garis besar melalui tahap *sampling*, *wrapping*, dan *smoothing*.

HASIL DAN ANALISIS

Pada bagian hasil dan analisis akan dijelaskan hasil dari pengolahan data yang berupa estimasi volume, model tiga dimensi, dan interpretasi deformasi kerucut sinder.

Tabel 5. Jumlah awan titik sebelum dan sesudah pemfilteran.

Kala Pengukuran	Sebelum	Sesudah	Persentase Setelah Pemfilteran
April 2012	20.239.514	252.444	1,25
September 2012	25.118.506	1.633.347	6,50



Gambar 13. Data awan titik kala kedua sebelum dan sesudah pemfilteran, contoh data September 2012.

Volume

Hasil pengolahan data dengan menggunakan perangkat lunak *Cyclone* merubah awan titik menjadi model TIN yang kemudian digunakan untuk menghitung volume dari model tersebut. Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan volume. Sebagai referensi digunakan titik DGF2, yaitu salah satu titik GPS yang digunakan sebagai tempat berdiri alat TLS. Penghitungan volume kerucut sinder pada kedua kala menunjukkan adanya perbedaan hasil. Adanya perbedaan ini diakibatkan oleh adanya perbedaan tempat dan jumlah berdiri alat dan sebaran target pada kedua kala. Dalam penelitian ini dianggap bahwa metode pengambilan data pada kala kedua lebih baik dibandingkan kala pertama, ditinjau dari sisi sebaran target, jumlah tempat berdiri alat, jarak pindai alat ke objek serta luas cakupan objek pindai.

Pada kala pertama, luas cakupan permukaan objek pindai lebih sedikit sehingga pada pembentukan model TIN mesh banyak dilakukan proses interpolasi oleh perangkat lunak *Cyclone* untuk menutup area yang kosong. Selain itu proses *smoothing model* juga dapat mempengaruhi jumlah *volume*, hanya saja tidak terlalu banyak berpengaruh jika proses *smoothing* tidak dilakukan secara ekstrim. Untuk mengetahui pengaruh perbedaan luas cakupan objek pindai terhadap volume, maka dilakukan perhitungan kembali volume kerucut sinder per bagian. Kerucut sinder dibagi menjadi dua bagian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14. Kemudian volume dan luas masing-masing bagian ditunjukkan pada Tabel 7. Perbedaan nilai estimasi volume pada bagian A menunjukkan pola inflasi. Namun pada bagian B menunjukkan sebaliknya (deflasi). Perbedaan nilai estimasi

Tabel 6. Hasil perhitungan estimasi volume kerucut sinder.

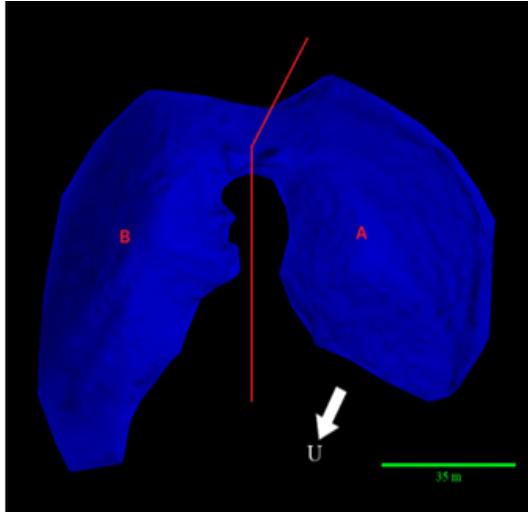
Kala Pengukuran	Bidang Referensi Terhadap DGF2 (m)	Volume (m ³)
April 2012	-6,11	21.635,19
September 2012	-6,11	21.513,15

volume cenderung diakibatkan data kala pertama yang tidak lengkap (terdapat area kosong pada kerucut sinder bagian B) seperti ditunjukkan pada model 3D (Gambar 15). Dengan asumsi kerucut sinder bagian A memiliki cakupan area pindai yang lebih banyak bertampalan pada kedua kala, maka kerucut sinder bagian A diambil sebagai acuan kondisi deformasi. Perbedaan nilai estimasi luas dikarenakan pemotongan wilayah kerucut sinder yang tidak seragam pada saat pemodelan untuk menghitung estimasi volume.

Model 3D

Setelah pengolahan data awan titik kala pertama dan kedua dengan menggunakan perangkat lunak *Cyclone*, data kemudian diekspor ke dalam format xyz untuk selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak *Geomagic Studio*, dimana data awan titik masing-masing kala diolah lebih lanjut menjadi model 3D yang akan digunakan untuk analisis deformasi. Hasil pemodelan kerucut sinder kedua kala ditunjukkan pada Gambar 15 dan 16. Pada pemodelan kala pertama (Gambar 15), kerucut sinder bagian B cenderung masih banyak kekosongan data dikarenakan sebaran posisi berdiri alat serta jarak pengambilan data TLS yang kurang sempurna. Model kala pertama ini tidak dapat dijadikan acuan deformasi karena sebaik apapun data kala kedua, analisis wilayah deformasinya tetap akan mengacu pada model kala per-

tama. Konsekuensinya adalah analisis deformasi kerucut sinder bagian B akan tidak selengkap kerucut sinder bagian A. Pada pengambilan data TLS kala kedua dilakukan penambahan tempat berdiri alat, sehingga hampir seluruh



Gambar 14. Pembagian daerah kerucut sinder Gunung Galunggung.

wilayah kerucut sinder tercakupi, dan diperoleh bentuk model 3D yang lebih lengkap. Namun masih terdapat sedikit kekosongan data, terutama kerucut sinder bagian B (Gambar 16). Kekosongan data tersebut cenderung dikarenakan strategi pengambilan data yang kurang sempurna. Pada proses pengambilan data TLS, strategi dan manajemen penempatan berdiri alat serta titik ikat sangat penting dikarenakan akan berpengaruh pada hasil. Untuk kasus ini

kekosongan data yang banyak tidak dilakukan manipulasi pada model 3D, seperti menambah boundary berlebih untuk interpolasi, dikarenakan untuk pertimbangan kualitas interpretasi deformasi. Sehingga interpretasi deformasi akan mengacu pada data nyata dan bukan dari data hasil interpolasi.

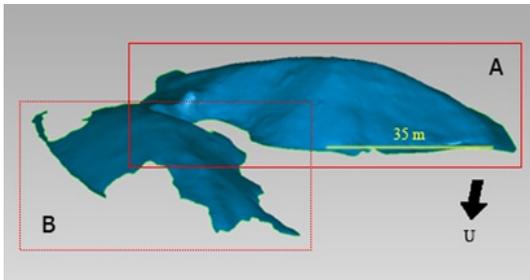
Interpretasi Deformasi

Dari kedua model 3D tersebut selanjutnya dilakukan interpretasi deformasi 3D dengan menggunakan perangkat lunak *Geomagic Qualify*. Pada perangkat lunak ini kedua model dianalisis perbedaannya dengan menggunakan fasilitas 3D Compare pada menu Analysis. Model kala pertama digunakan sebagai acuan (*reference*). Gambar 17 menunjukkan tampilan model deformasi kerucut sinder Gunung Galunggung periode April-September 2012.

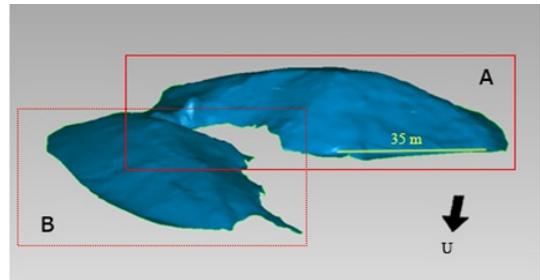
Model deformasi 3D tersebut merupakan perubahan vertikal dari dua DEM (*Digital Elevation Model*) ditunjukkan oleh area yang mengalami deformasi vertikal beserta nilainya seperti yang tertera pada legenda. Deformasi vertikal dengan nilai -2,6 cm-2,6 cm terdistribusi sebesar 24,6% dari wilayah yang dimodelkan. Deformasi vertikal dengan nilai 8,1 cm s.d. 10 cm terdistribusi 15,9% dari wilayah yang dimodelkan. Distribusi nilai deviasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 8. Untuk area yang berwarna abu-abu merupakan area

Tabel 7. Perhitungan estimasi volume kedua bagian kerucut sinder pada kedua kala

Data	Bagian A		Bagian B	
	Volume (m ³)	Luas (m ²)	Volume (m ³)	Luas (m ²)
April 2012	12.407,45	3.326,04	9.225,21	2.744,00
September 2012	12.602,80	3.046,71	8.912,89	2.857,95
Selisih	194,35	-279,33	-312,31	113,95



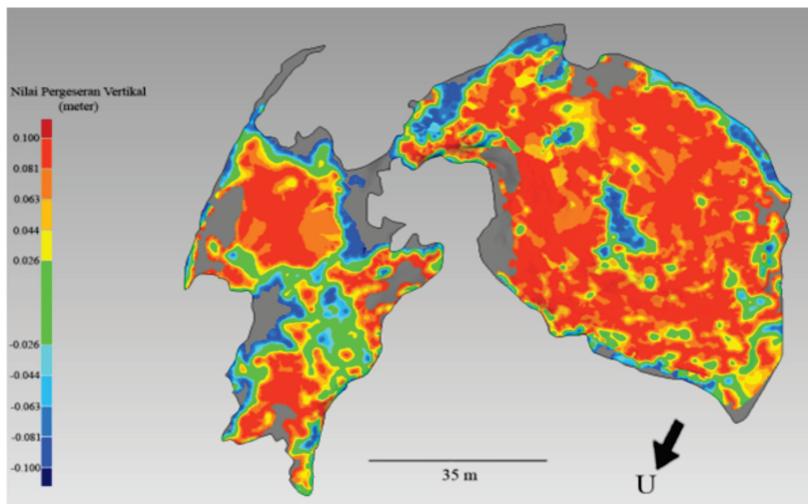
Gambar 15. Model 3D kerucut sinder Gunung Galunggung kala pertama.



Gambar 16. Model 3D kerucut sinder Gunung Galunggung kala kedua.

yang tidak memiliki pasangan antara model kala pertama dan kala kedua. Hal tersebut dikarenakan model kala kedua memiliki area berlebih. Pada pembahasan mengenai volume sebelumnya disebutkan bahwa kerucut sinder bagian A akan digunakan sebagai acuan kondisi deformasi. Dengan demikian dari Gambar 17 terlihat bahwa kerucut sinder bagian A (sebelah kanan gambar) memiliki distribusi dominan 6-10 cm, mengindikasikan besarnya pergeseran vertikal yang terjadi. Jika besarnya perubahan vertikal tersebut dikorelasikan dengan aktivitas vulkanik Gunung Galunggung selama periode yang sama, menunjukkan bahwa tidak terjadi

aktivitas vulkanik yang signifikan. Sehingga diduga bahwa pada pemodelan deformasi vertikal ini tidak seluruhnya merupakan sinyal deformasi Gunung Galunggung. Hasil pemodelan deformasi kerucut sinder Gunung Galunggung pada penelitian ini masih dipengaruhi oleh adanya sumber-sumber kesalahan, terutama yang berasal dari perbedaan metode pengambilan data, metode pemfilteran yang masih bersifat manual serta sifat objek pindai, dalam hal ini vegetasi yang menutupi hampir seluruh tubuh kerucut sinder. Untuk mengetahui pengaruh sumber-sumber kesalahan tersebut sehingga bisa dilakukan koreksi dan diperoleh sinyal de-



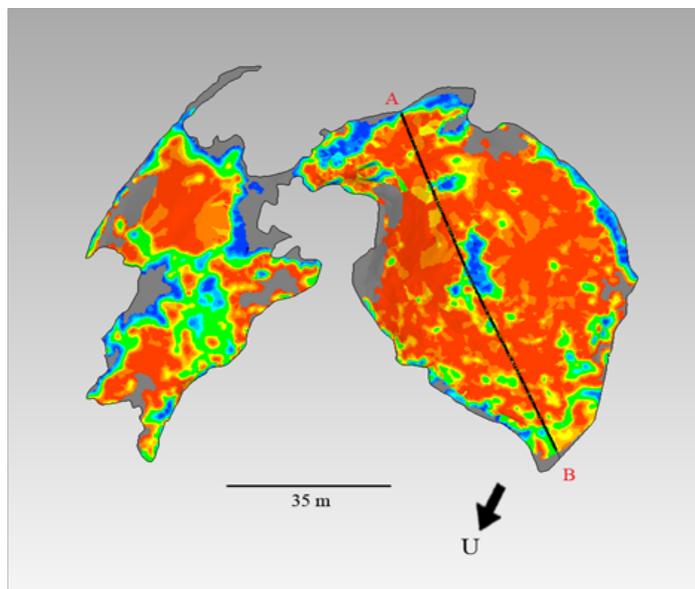
Gambar 17. Model pergeseran vertikal kerucut sinder Gunung Galunggung dalam periode April s.d. September 2012.

formasi yang sebenarnya perlu kajian lebih lanjut dan validasi dengan hasil metode lain.

Vektor deformasi vertikal tidak dapat ditampilkan seluruhnya dalam media 2D, karena untuk melihat keseluruhan hasil vektor deformasi dengan jelas harus menggunakan perangkat lunak *Geomagic Qualify*. sebagai gambaran, dibuat contoh penampang melintang sebagian

wilayah kerucut sinder, sehingga dapat vektor deformasi vertikalnya. Penampang melintang tersebut dapat dilihat pada Gambar 18 dan 19. Vektor deformasi pada gambar 19 ditunjukkan oleh garis vertikal yang menjauhi bidang. Vektor tersebut merupakan vektor deformasi bidang kala kedua terhadap kala pertama.

Hasil interpretasi deformasi dengan menggu-



Gambar 18. Lintasan penampang melintang sebagian wilayah kerucut sinder Gunung Galunggung.

Tabel 8. Distribusi nilai deviasi model deformasi

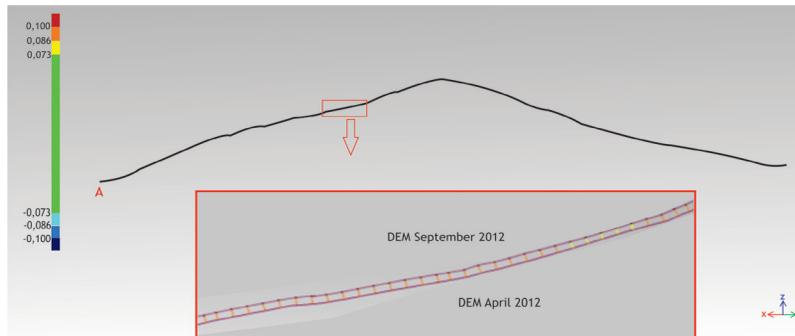
.> = Min (m)	< Max (m)	Jumlah Awan Titik	Persentase
-0,100	-0,081	734	3,383
-0,081	-0,063	920	4,240
-0,63	-0,044	1287	5,931
-0,044	-0,026	1251	5,765
-0,026	0,026	5337	24,596
0,026	0,044	2701	12,448
0,044	0,063	2998	13,816
0,063	0,81	3023	13,932
0,081	0,100	3447	15,886

nakan TLS kemudian dikorelasikan dengan data pemantauan kegempaan dan suhu air danau kawah menunjukkan bahwa selama periode April-September 2012 masih terjadi aktivitas magma (walaupun tidak signifikan) yang dapat diketahui dari terekamnya gempa-gempa vulkanik, sehingga perubahan geometri dapat terjadi pada kerucut sinder Gunung Galunggung. Data jumlah gempa dan suhu air danau dari tahun 2011-2012 ditampilkan pada Gambar 20 dan 21.

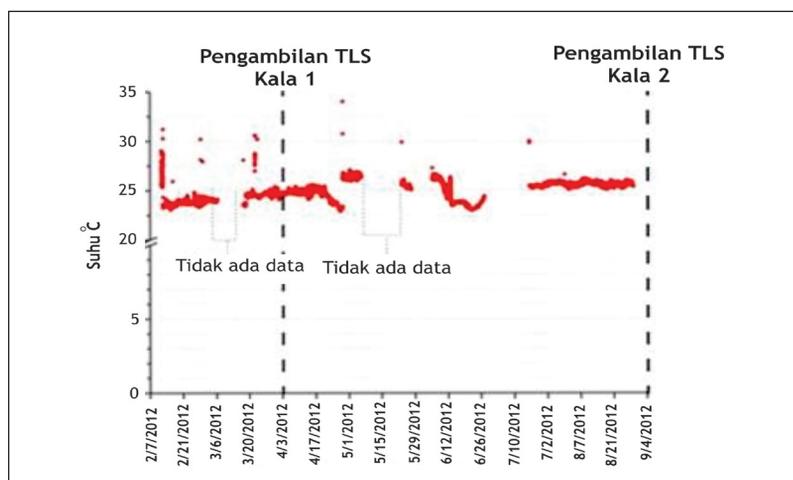
5. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan.

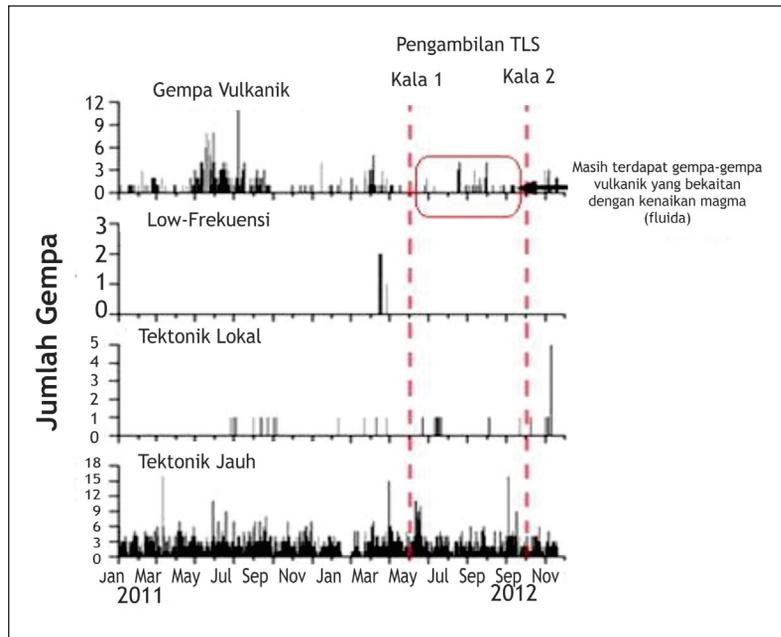
1. Pemanfaatan teknologi TLS dapat digunakan untuk menentukan volume dan interpretasi deformasi kerucut sinder Gunung Galunggung.
2. Estimasi volume kerucut sinder Gunung Galunggung yang diperoleh dari bidang referensi yang sama (-6,11 m dari titik DGF2) pada kala pertama adalah 21.635,19 m³ dan pada kala



Gambar 19. Model pergeseran vertikal kerucut sinder Gunung Galunggung dalam periode April s.d. September 2012.



Gambar 20. Jumlah gempa harian (Triastuty dan Haerani 2012).



Gambar 21. Suhu air danau kawah (Triastuty dan Haerani 2012).

kedua adalah 21.513,15 m³.

3. Nilai deformasi vertikal kerucut sinder Gunung Galunggung hasil pemodelan yang diperoleh dari metode TLS mempunyai rentang dominan dari 6-10 cm, sebaran nilai dominan mengindikasikan adanya pengembangan (inflasi), terutama di kerucut sinder bagian A.

4. Nilai deformasi vertikal hasil pemodelan yang diperoleh dari metode TLS masih relatif besar dibandingkan dengan kondisi aktivitas vulkanik Gunung Galunggung, hal ini disebabkan proses pemfilteran yang masih bersifat manual serta belum dilakukannya koreksi terhadap sumber-sumber kesalahan.

ACUAN

Badan Geologi, 2011, Data Dasar Gunungapi Indonesia, Badan Geologi, Bandung.

Bronto, S., 1989, Volcanic Geology of Galunggung, West Java, Indonesia, A Thesis of Doctor of Philosophy in Geology, University of Canterbury.

Cyra, 2003, Cyclone 4.0 and Cyrax Basic Training Course Session I, Cyra Technologies Inc., European Office, Rijswijk, The Netherlands.

Hasibuan, I., 2012, Penggunaan Teknologi Laser Scanner Dalam Penyediaan Data Pemantauan Longsor. Skripsi Departemen Teknik Geodesi dan Geomatika FITB ITB.

Katili, J.A, dan Sudradjat, A., 1984, Galunggung The 1982-1983 Eruption, Volcanological Survey of Indonesia, Directorate General of Geology and Mineral Resources, Department of Mines and Energy Republic of Indonesia.

Kuang, S., 1996, Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications, Chelsea, Mich. : Ann Arbor Press.

Leica Geosystems, 2011, The All-in-One Laser Scan-

ner for Any Application, http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-C10_79411.htm

McGuire, B., Kilburn, R.J.C. dan Murray, J., 1995, *Monitoring Active Volcanoes: Strategies, Procedures and Techniques*, University College London Press.

Pfeifer, N., 2007, July 1-7, Overview of TLS system, overall processing and applications, Ljubljana, Slovenia: ISPRS Summer School.

Triastuty, H. dan Haerani, N., 2012, *Laporan Penelitian G. Galunggung - Jawa Barat*, Bandung: PVM-BG.

Quintero, M. S., Genechten, B. V., Bruyne, M. D., Ronald, P., Hankar, M., dan Barnes, S., 2008, *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Project (3DriskMapping)*.

Scarpa, R., dan Tilling, R.I., 1996, *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Springer, Germany.

Wirakusumah, A.D., 2012, *Gunung Api Ilmu dan Aplikasinya*, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

