

Analisis Deformasi Gunung Api Batur berdasarkan Data Pengamatan GPS Berkala Tahun 2008, 2009, 2013, dan 2015

Deformation Analysis of Batur Volcano Based on Episodic Gps Observation Data in 2008, 2009, 2013, and 2015

Achmad Faris¹, Estu Kriswati², Irwan Meilano¹, Dina Anggreni Sarsito¹

¹Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Indonesia
Jalan Diponegoro No. 57, Bandung 40122, Indonesia
e-mail: achmdfris@gmail.com

ABSTRAK

Gunung Batur yang terletak di Kabupaten Bangli, Bali, terakhir meletus pada tahun 2000. Pada 2009 terjadi peningkatan aktivitas vulkanis di gunung ini walaupun tidak terjadi letusan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola deformasi Gunung Batur serta keterkaitannya dengan peningkatan vulkanis pada tahun 2009. Analisis didasarkan pada pola vektor pergeseran dan pola regangan masing-masing titik pengamatan GPS berkala pada area Gunung Batur tahun 2008, 2009, 2013, dan 2015. Berdasarkan pengamatan GPS Oktober 2008 - November 2009 pola deformasi menunjukkan adanya inflasi dengan pola vektor pergeseran titik pengamatan GPS dominan ke arah luar dari gunung. Selain itu, pola regangan memperlihatkan bahwa pada area bagian utara dan timur laut terjadi ekstensi. Pada pengamatan GPS untuk periode November 2009 - Februari 2013, pola deformasi menunjukkan adanya deflasi pada Gunung Batur dengan pola vektor pergeseran titik pengamatan GPS berarah menuju gunung ini dan pola regangan memperlihatkan bahwa pada area Gunung Batur terjadi kompresi.

Kata kunci: Gunung Batur, deflasi, deformasi, pergeseran, GPS, inflasi, regangan.

ABSTRACT

Batur Volcano located in Bangli, Bali, the last eruption of Batur Volcano is in 2000. The increase in the volcanic activity occurred in 2009, but did not followed by eruption. This study aims to determine crustal deformation pattern of Batur Volcano and its association with the increase in volcanic activity in 2009 based on the pattern of displacement vector and strain using 2008 – 2015 campaign GPS data. During the period of October 2008 - November 2009, Batur Volcano experienced inflation and strain pattern which showed that the area of the north and northeast of Batur Volcano experienced extension. During November 2009 - February 2013, Batur Volcano experienced deflation with GPS displacement directed towards Batur Volcano and a strain pattern of compression around Batur Volcano.

Keywords: Batur Volcano, deflation, deformation, displacement, GPS, inflation, strain.

PENDAHULUAN

Gunung Batur merupakan salah satu gunung api aktif yang terletak di Kabupaten Bangli, Bali. Gunung Batur terletak di dalam kaldera yang dikelilingi oleh dinding Kaldera I dan Kaldera II dengan tinggi berkisar antara 1.267 m sampai 2.152 m. Di bagian tenggaranya terdapat sebuah danau yang disebut Danau Batur (Sutawidjaja, 1990). Pusat erupsi Gunung Batur tidak berlokasi di satu kawah melainkan di beberapa kawah yang dikenal dengan sebutan Kawah I, Kawah II, dan Kawah III (Gambar 1). Kawah-kawah tersebut membentuk kelurusan berarah timur laut – barat daya yang kemungkinan berkaitan dengan rekahan pada area Gunung Batur.

Berdasarkan catatan sejarah, kegiatan letusannya dimulai pada tahun 1804 yang bercirikan letusan strombolian dan aliran lava (PVMBG, 2014). Pada tahun 2000 terjadi letusan yang menimbulkan korban jiwa, seorang wisatawan luka-luka dan seorang tewas. Pada bulan September sampai November 2009 terjadi peningkatan aktivitas Gunung Batur tanpa disertai adanya letusan. Peningkatan terutama ditandai dengan meningkatnya jumlah gempa *Volcano Tectonic* (VT). Pada kurun waktu tersebut gempa-gempa VT berada pada kedalaman 1,5 km sampai 5,5 km dengan episentrum berarah timur laut – barat daya yang berasosiasi dengan zona lemah Kompleks Gunung Batur (Hidayati dan Sulaeman, 2013).

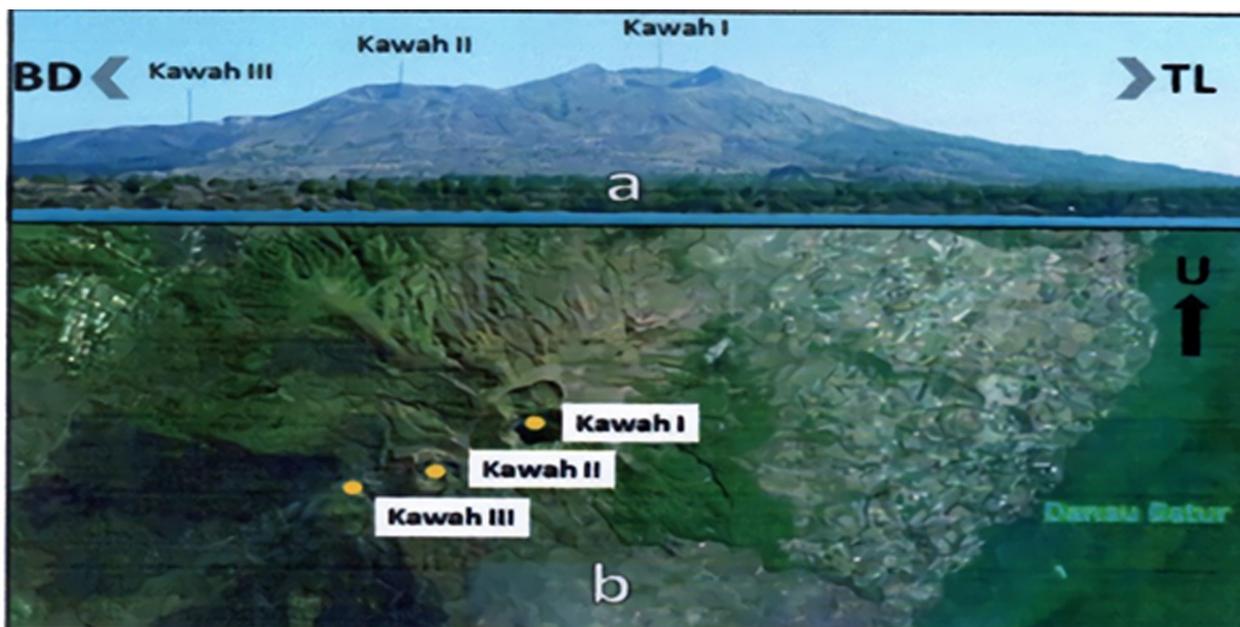
Upaya-upaya mitigasi dalam mengurangi kerugian baik korban jiwa maupun materi yang mungkin ditimbulkan akibat letusan Gunung Batur sangat penting dilakukan. Oleh karena itu, pengamatan dan pemantauan aktivitas vulkanis Gunung Batur sangat dibutuhkan. Salah satu metode dalam melakukan pemantauan aktivitas vulkanisnya dilakukan dengan metode deformasi melalui pengamatan *Global Positioning System* (GPS).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola deformasi pada Gunung Batur berdasarkan titik-titik pengamatan GPS di sekitar Gunung Batur dengan menggunakan data pengamatan GPS berkala/episodik pada tahun 2008, 2009, 2013, dan 2015 serta keterkaitannya dengan peningkatan vulkanis Gunung Batur pada tahun 2009.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan berfokus pada analisis terhadap informasi nilai pergeseran dan regangan titik-titik pengamatan GPS di sekitar Gunung Batur.

Data yang digunakan adalah data pengamatan GPS episodik yang diperoleh dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) pada tahun 2008, 2009, 2013, dan 2015 dengan penambahan dan pengurangan titik-titik stasiun GPS setiap tahunnya. Titik-titik stasiun GPS tersebut adalah



Gambar 1. Penampakan Gunung Batur: (a) Dari depan arah baratdaya ke timur laut, (b) Dari atas.

titik DB01, DB02, DB03, DB04, DB05, DB06, DB07, DB09, DB10, DB11, DB12, DB13, DB15, DB17, DB19, DB20, DB21, DB22, DB24, DB25, KW01, KW02, LB02, MUSE, PJ01, PJ05, dan TABU. Selain itu, dibutuhkan data pengamatan dari stasiun IGS sebagai titik ikat pada pengolahan data. Terdapat tujuh stasiun IGS yang digunakan, yaitu BAKO, COCO, DARW, GUAM, HYDE, PIMO, dan XMIS.

Data GPS tersebut diolah menggunakan perangkat lunak ilmiah Bernese GNSS 5.2 untuk memperoleh koordinat geodetik dan geosentrik beserta standar deviasinya yang memiliki standar kualitas dan akurasi yang tinggi untuk keperluan pengukuran geodetik (Dach dr., 2015). Hasil koordinat yang diperoleh ditransformasikan menjadi koordinat toposentrik.

Untuk mengetahui efek-efek lokal yang diakibatkan oleh aktivitas vulkanik Gunung Batur maupun proses tektonik di sekitarnya, semua titik GPS di Gunung Batur kemudian diikatkan ke titik pengamatan GPS DB01 sebagai titik referensi melalui persamaan berikut (Faris, 2016):

$$N_{fix} = N_{obs} - N_{DB01} \dots\dots\dots(1)$$

$$StDevN_{fix} = \sqrt{StdevN_{obs}^2 + StdevN_{DB01}^2} \dots\dots(2)$$

dengan N_{Fix} adalah komponen utara titik pengamatan relatif terhadap titik DB01, N_{Obs} adalah komponen utara titik pengamatan GPS di Gunung Batur, N_{DB01} adalah komponen utara titik DB01, $StDevN_{Fix}$ adalah standar deviasi komponen utara titik pengamatan relatif terhadap titik DB01, $StDevN_{Obs}$ adalah standar deviasi komponen utara titik pengamatan, dan $StDevN_{DB01}$ adalah standar deviasi komponen utara titik DB01.

Setelah semua titik pengamatan GPS bereferensi terhadap titik pengamatan GPS DB01, dilakukan proses perhitungan pergeseran titik-titik pengamatan GPS di sekitar Gunung Batur tersebut dengan membaginya menjadi lima kala. Perhitungan pergeseran dapat dilihat pada persamaan (3) dan (4).

$$N_{geser} = N_{akhir} - N_{awal} \dots\dots\dots(3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_{ee} \cos^2 \theta + 2\varepsilon_{en} \sin \theta \\ \cos \theta + \varepsilon_{mm} \sin^2 \theta & \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

dengan N_{geser} adalah pergeseran komponen utara titik pengamatan, N_{akhir} adalah pergeseran komponen utara titik pengamatan pada tahun akhir yang digunakan, N_{awal} adalah pergeseran komponen utara titik pengamatan pada tahun awal yang digunakan, dan $StDevN_{geser}$ adalah pergeseran standar deviasi komponen utara titik pengamatan, $StDevN_{akhir}$ adalah pergeseran standar deviasi komponen utara titik pengamatan pada tahun yang digunakan, dan $StDevN_{awal}$ adalah pergeseran standar deviasi komponen utara titik pengamatan pada tahun awal yang digunakan.

Uji statistik dilakukan menggunakan *t-distribution* atau yang dikenal sebagai *Student's distribution (t-student)*. *T-student* biasa digunakan dalam pengujian hipotesis untuk memeriksa validitas sebuah sampel terhadap populasi dan untuk menurunkan interval kepercayaan rata-rata populasi yang mempunyai set sampel yang relatif kecil (Wolf dan Ghilani, 1997). Selang kepercayaan yang digunakan adalah 90 % dengan $\alpha/2 = 0,05$.

Uji statistik dilakukan untuk mengetahui titik-titik yang mengalami pergeseran dengan membandingkan resultan pergeseran horizontal titik-titik pengamatan dengan standar deviasi resultan pergeseran horizontalnya. Nilai v yang merepresentasikan derajat kebebasan (*degrees of freedom*) diartikan sebagai banyaknya pengamatan bebas total pengamatan sampel. Dengan data pergeseran titik diturunkan dari data pengamatan beberapa satelit dengan lama pengamatan pada masing-masing titik GPS di area Gunung Batur selama 1 - 24 jam dengan interval waktu 15 detik, maka dapat diasumsikan v bernilai tak terhingga (∞). Oleh sebab itu, nilai $t_{v,\alpha/2}$ adalah 1,645. Pada tes ini, hipotesis nol ($V_r = 0$) menunjukkan bahwa pergeseran tidak signifikan, sedangkan bila ($V_r \neq 0$), berarti bahwa pergeseran cukup signifikan. Hipotesis nol akan ditolak jika nilai T lebih besar daripada nilai *t-condition* ($T > t_{v,\alpha/2}$).

Nilai pergeseran ini divisualisasikan menggunakan perangkat lunak *Mapping Tools* (GMT) yang berfungsi untuk memudahkan analisis tampilan

suatu kumpulan data (Wessel dan Smith, 1998), dan untuk mengetahui pola vektor pergeseran masing-masing titik pengamatan GPS di sekitar Gunung Batur.

Estimasi nilai regangan ditentukan menggunakan pendekatan nilai pergeseran yang telah diperoleh. Komponen-komponen regangan berupa besaran dan arah regangan dihitung berdasarkan pembuatan area segitiga yang dibentuk dari titik-titik pengamatan GPS dengan menggunakan perhitungan regangan GPS. Besaran dan arah area regangan ditentukan berdasarkan komponen-komponen maksimum (ϵ_1) dan minimum (ϵ_2) regangan pada tiap area segi tiga yang terbentuk, sehingga diketahui area yang mengalami ekstensi dan area yang mengalami kompresi. Parameter ϵ_1 dan ϵ_2 dinyatakan dengan satuan *microstrain* (μ strain), dan keduanya didapat melalui persamaan Ma'ruf (2001):

$$\epsilon_1 = \epsilon_{ee} \cos^2 \theta + 2\epsilon_{en} \sin \theta \cos \theta + \epsilon_{nn} \sin^2 \theta \quad \dots\dots\dots(5)$$

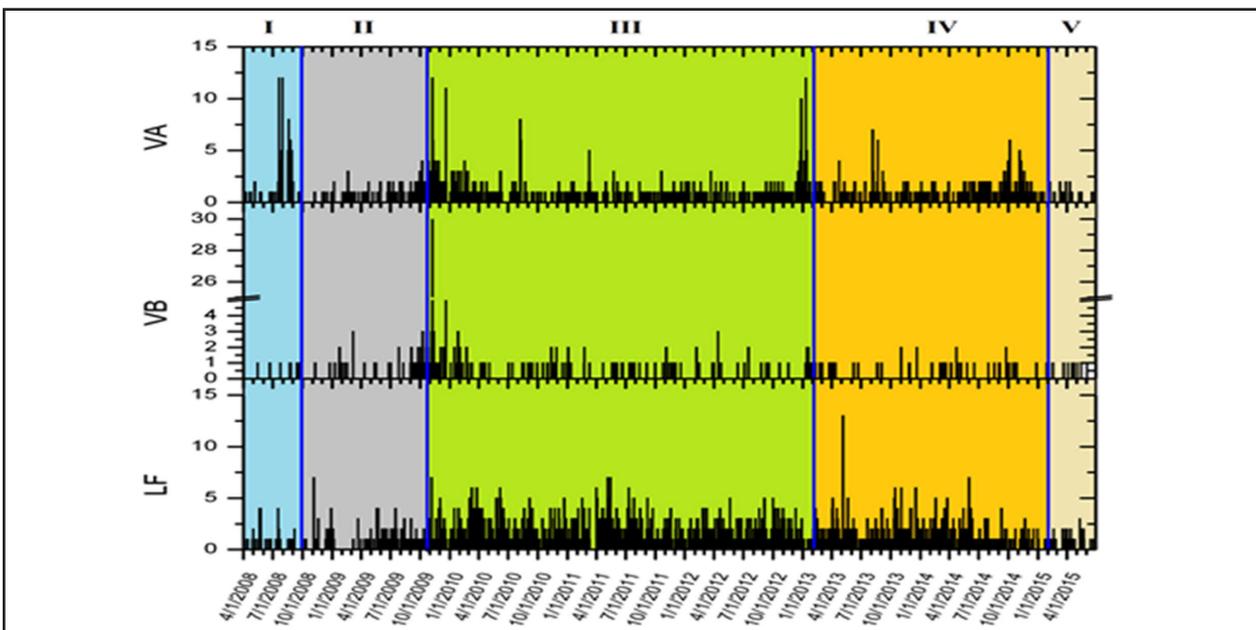
$$\epsilon_2 = \epsilon_{ee} \cos^2 \theta + 2\epsilon_{ne} \sin(\theta + 90^\circ) \cos(\theta + 90^\circ) + \epsilon_{nn} \sin^2(\theta + 90^\circ) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\epsilon_{ne}}{\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

dengan ϵ_e , ϵ_n = parameter regangan normal arah timur - barat dan utara - selatan, dan ϵ_{e} = parameter regangan geser.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Vektor pergeseran titik-titik pengamatan yang telah lolos uji statistik dan besarnya regangan diketahui, diplot menggunakan perangkat lunak GMT. Pola vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS di sekitar Gunung Batur dan regangan digunakan untuk menganalisis pola deformasi yang terjadi. Analisis tersebut didukung oleh informasi aktivitas vulkanis berupa data kegempaan yang terekam di Gunung Batur selama masa pengamatan (Gambar 2).



Gambar 2. Grafik jumlah gempa Gunung Batur, VA adalah gempa Vulkanik Dalam, VB adalah gempa Vulkanik Dalam, dan LF adalah gempa frekuensi rendah (Low Frequency). Warna dan angka romawi menggambarkan pembagian waktu menjadi lima kala.

Berdasarkan data tersebut, kurun waktu 2008 – 2013 dibagi menjadi lima kala. Berikut penjabaran hasil yang diperoleh pada masing-masing kala:

Kala Pertama (April - Oktober 2008)

Kala pertama merupakan kala sebelum adanya peningkatan aktivitas vulkanik di Gunung Batur, yang dicirikan oleh tingginya jumlah gempa VA tapi miskin gempa VB dan LF.

Berdasarkan hasil uji statistik, ada beberapa titik pengamatan yang tidak memperlihatkan pergeseran yang signifikan, sehingga titik tersebut tidak digunakan. Berikut hasil uji statistik pada kala pertama yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Uji Statistik Kala Pertama

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
DB02	-0.021	-0.003	0.009	0.003	0.021	0.010	2.159	1.645	Lolos
DB03	0.007	-0.004	0.004	0.002	0.008	0.004	1.874	1.645	Lolos
DB04	0.013	0.002	0.004	0.002	0.013	0.004	3.029	1.645	Lolos
DB06	0.028	0.003	0.004	0.003	0.029	0.005	5.570	1.645	Lolos
DB07	-0.011	0.015	0.004	0.003	0.018	0.005	3.803	1.645	Lolos
DB09	0.002	-0.010	0.003	0.002	0.010	0.004	2.482	1.645	Lolos
DB10	-0.064	-0.058	0.028	0.013	0.087	0.031	2.836	1.645	Lolos
DB11	-0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.004	0.216	1.645	Tidak Lolos
DB12	-0.014	-0.009	0.004	0.002	0.016	0.004	3.720	1.645	Lolos
DB15	0.016	-0.021	0.004	0.003	0.027	0.005	5.372	1.645	Lolos

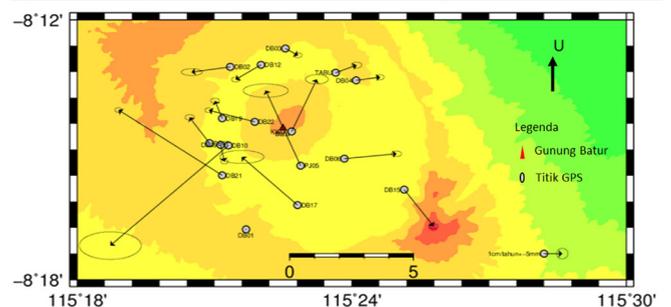
Tabel 2. Hasil Uji Statistik Kala Pertama (lanjutan)

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
DB17	-0.030	0.028	0.020	0.006	0.041	0.021	1.990	1.645	Lolos
DB19	-0.004	0.010	0.004	0.002	0.011	0.005	2.350	1.645	Lolos
DB21	-0.057	0.038	0.003	0.002	0.068	0.004	17.520	1.645	Lolos
DB22	-0.025	0.007	0.003	0.002	0.026	0.004	6.512	1.645	Lolos
KW01	0.014	0.030	0.010	0.004	0.033	0.011	3.023	1.645	Lolos
KW02	0.004	0.017	0.010	0.004	0.018	0.011	1.571	1.645	Tidak Lolos
PJ01	-0.021	0.017	0.020	0.006	0.027	0.021	1.275	1.645	Tidak Lolos
PJ05	-0.019	0.044	0.020	0.006	0.048	0.021	2.256	1.645	Lolos
LB02	0.005	-0.002	0.004	0.002	0.005	0.004	1.262	1.645	Tidak Lolos
TABU	0.011	0.004	0.004	0.003	0.012	0.005	2.312	1.645	Lolos

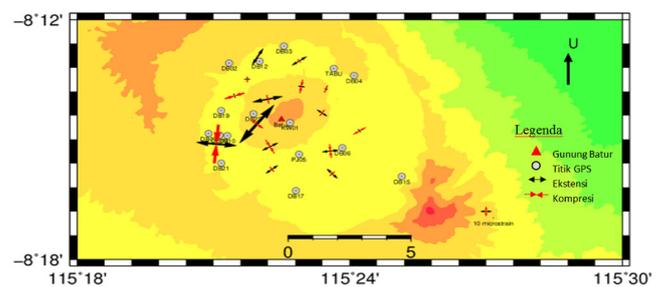
Gambar 3 memperlihatkan vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS, dan Gambar 4 merupakan hasil plot regangan yang terjadi pada area Gunung Batur pada kala pertama.

Pola vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS yang berada di bagian barat Gunung Batur dominan vektor pergeserannya berarah ke barat laut, sedangkan titik-titik pengamatan GPS yang berada di bagian timur Gunung Batur vektor pergeserannya berarah ke timur. Rentang besar vektor pergeseran semua titik-titik pengamatan GPS antara ± 8 mm sampai ± 9 cm.

Pola regangan pada area Gunung Batur memperlihatkan dominan ekstensi. Pada area yang dibentuk oleh titik-titik pengamatan KW01, DB22, dan DB10 atau yang berada di bagian barat daya Gunung Batur terjadi ekstensi sebesar 50,8 μ strain. Regangan berupa ekstensi juga terjadi di bagian selatan dan utaranya.



Gambar 3. Vektor pergeseran titik titik pengamatan GPS pada kala pertama.



Gambar 4. Regangan pada kala pertama.

Pola vektor pergeseran dan regangan tersebut mengindikasikan terjadi peregangan pada rekahan di bagian barat daya Gunung Batur dan merupakan tanda-tanda permulaan peningkatan aktivitas vulkanis Gunung Batur.

Kala Kedua (Oktober 2008 - November 2009)

Kala kedua merupakan kala peningkatan aktivitas vulkanis Gunung Batur, yang dicirikan oleh adanya peningkatan kegempaan, terutama peningkatan yang terjadi sepanjang bulan September - November 2009 yang mencapai puncaknya pada 8 November 2009.

Tabel 3 memperlihatkan hasil uji statistik pada tiap titik pengamatan. Ada empat titik yang merepresentasikan pergeseran yang signifikan.

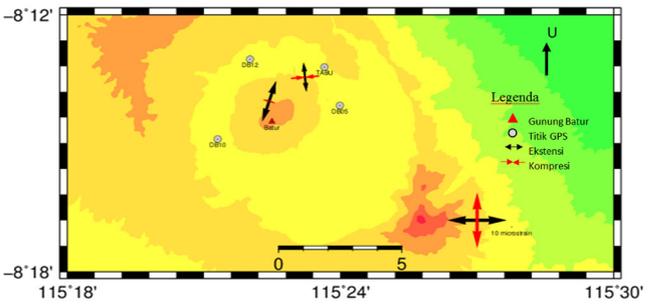
Tabel 3. Hasil Uji Statistik Kala Kedua

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
DB05	0.004	-0.016	0.005	0.003	0.016	0.005	3.098	1.645	Lolos
DB06	-0.006	-0.003	0.004	0.003	0.006	0.005	1.237	1.645	Tidak Lolos
DB10	-0.003	-0.010	0.005	0.003	0.011	0.006	1.962	1.645	Lolos
DB12	0.025	0.009	0.004	0.002	0.027	0.005	5.848	1.645	Lolos
DB19	-0.005	0.003	0.004	0.002	0.006	0.005	1.217	1.645	Tidak Lolos
TABU	0.011	-0.005	0.004	0.003	0.012	0.005	2.365	1.645	Lolos

Gambar 5 memperlihatkan vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS, dan Gambar 6 merupakan hasil plot regangan yang terjadi pada area Gunung Batur pada kala kedua.

Pola vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS di sekitar Gunung Batur, yaitu titik DB05, DB10, DB12, dan TABU memperlihatkan arah dengan pola melingkar, yaitu berarah timur, tenggara, dan selatan. Besarnya pergeseran titik-titik pengamatan GPS berada pada rentang antara ± 1 sampai ± 3 cm.

Pola regangan pada area Gunung Batur



Gambar 6. Regangan pada kala kedua.

memperlihatkan bahwa pada area Gunung Batur terjadi ekstensi pada bagian utara dan timur laut Gunung Batur sebesar 0,5 μ strain dan 5,6 μ strain.

Pola vektor pergeseran dan regangan pada kala ini dibandingkan dengan kala pertama: terjadi perpindahan area ekstensi dari barat daya menuju utara – timur laut. Hal ini diperkirakan terjadi karena adanya perpindahan magma dari bagian yang dalam di area barat daya ke bagian yang dangkal di area timur laut Gunung Batur.

Kala Ketiga (November 2009 - Februari 2013)

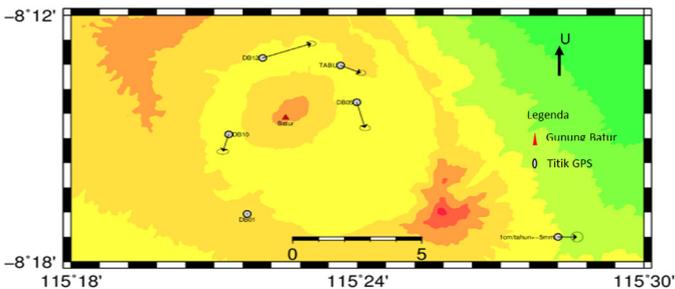
Kala ketiga merupakan kala sesudah adanya peningkatan aktivitas pada Gunung Batur. Rekaman kegempaan lebih didominasi oleh gempa-gempa LF yang diperkirakan merupakan manifestasi pergerakan fluida di dekat permukaan Gunung Batur.

Pada Tabel 4 terdapat satu titik pengamatan yang tidak lolos uji statistik karena tidak menunjukkan pergeseran yang signifikan. Hasil uji statistik dapat dilihat di bawah ini.

Tabel 4. Hasil Uji Statistik Kala Ketiga

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
DB05	-0.030	-0.001	0.009	0.004	0.030	0.010	2.978	1.645	Lolos
DB06	-0.022	0.012	0.007	0.003	0.025	0.007	3.406	1.645	Lolos
DB19	0.013	0.000	0.007	0.003	0.013	0.007	1.753	1.645	Lolos
TABU	-0.011	-0.009	0.008	0.004	0.014	0.009	1.608	1.645	Tidak Lolos

Gambar 7 merupakan hasil plot vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS, dan Gambar 8 adalah



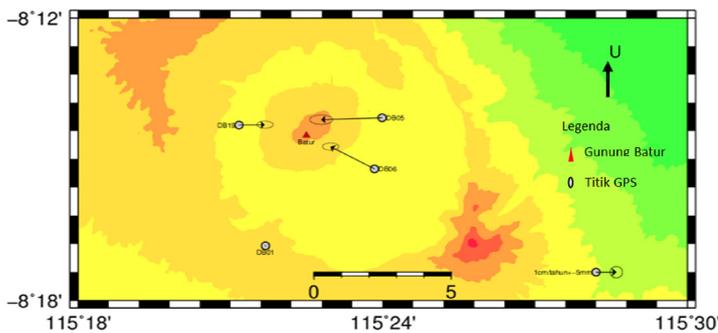
Gambar 5. Vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS pada kala kedua.

hasil plot regangan yang terjadi pada area Gunung Batur pada kala ketiga.

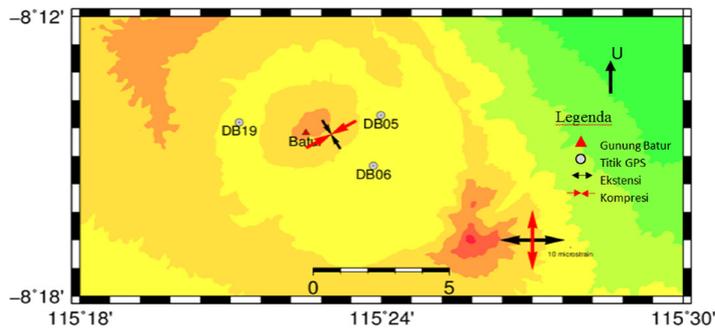
Pola vektor pergeseran semua titik pengamatan menunjukkan pola yang cenderung berarah sama, yaitu ke arah kawah Gunung Batur. Rentang besar vektor pergeseran semua titik-titik pengamatan GPS antara ± 1 cm sampai ± 3 cm.

dalam kondisi tenang atau tidak memperlihatkan peningkatan aktivitas vulkanis. Gempa-gempa VA masih cukup tinggi, tetapi tidak diiringi oleh jumlah VB yang tinggi dan gempa LF menunjukkan kecenderungan menurun.

Hasil uji statistik pada kala keempat yang diperlihatkan pada Tabel 5 menunjukkan ada enam titik pengamatan yang memperlihatkan pergeseran yang signifikan.



Gambar 7. Vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS pada kala ketiga.



Gambar 8. Regangan pada kala ketiga.

Pola regangan pada area Gunung Batur memperlihatkan bahwa pada area gunung ini terjadi kompresi pada rentang antara $-8,95$ μ strain.

Berdasarkan pola vektor pergeseran dan pola regangan tersebut tampak jelas terjadi deflasi yang mencerminkan adanya penurunan aktivitas vulkanis Gunung Batur setelah peningkatan yang terjadi pada kala kedua. Meskipun aktivitas kegempaan masih cukup tinggi tetapi aktivitas vulkanisnya lebih merupakan pergerakan fluida di area yang lebih dangkal.

Kala Keempat (Februari 2013 - Februari 2015)

Kala keempat merupakan kala ketika Gunung Batur

Tabel 5. Hasil Uji Statistik Kala Keempat

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
DB02	-0.001	-0.002	0.010	0.004	0.002	0.011	0.201	1.645	Tidak Lolos
DB03	-0.009	0.005	0.009	0.004	0.010	0.010	1.016	1.645	Tidak Lolos
DB05	-0.017	0.021	0.011	0.005	0.027	0.012	2.165	1.645	Lolos
DB06	0.003	-0.005	0.009	0.004	0.005	0.010	0.511	1.645	Tidak Lolos
DB07	0.040	0.039	0.013	0.005	0.056	0.014	4.075	1.645	Lolos
DB17	-0.010	0.013	0.008	0.004	0.017	0.009	1.945	1.645	Lolos
DB19	-0.004	-0.010	0.008	0.004	0.011	0.009	1.155	1.645	Tidak Lolos
DB25	-0.008	-0.003	0.010	0.005	0.008	0.011	0.736	1.645	Tidak Lolos

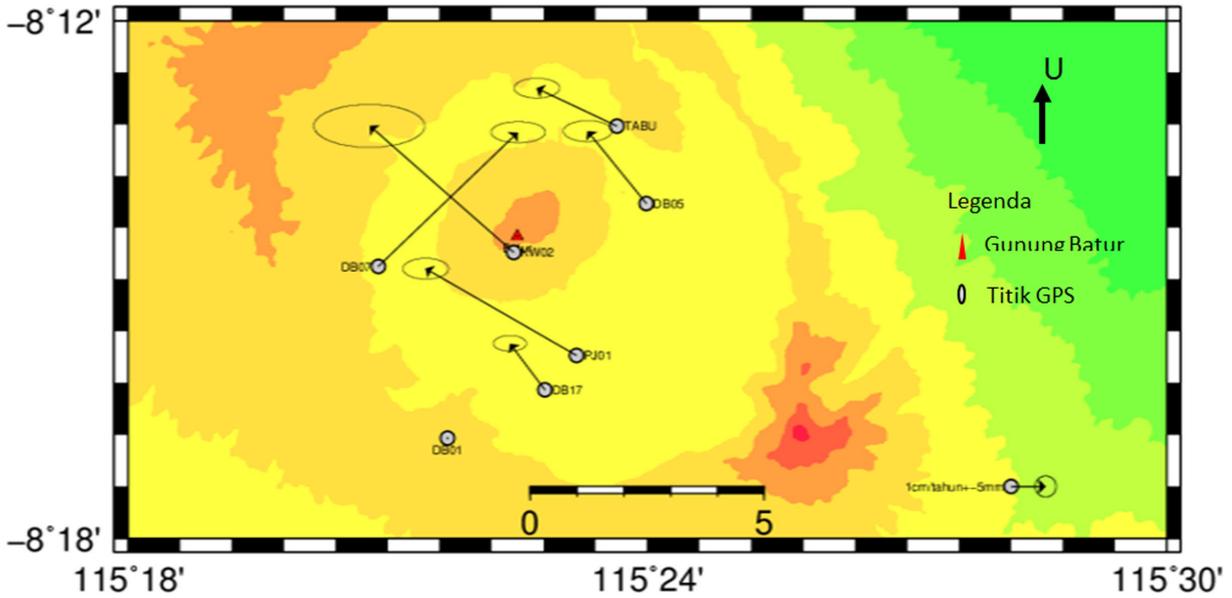
Tabel 6. Hasil Uji Statistik Kala Keempat (lanjutan)

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
KW01	-0.010	0.029	0.021	0.009	0.031	0.023	1.348	1.645	Tidak Lolos
KW02	-0.042	0.037	0.026	0.010	0.056	0.028	1.982	1.645	Lolos
PJ01	-0.044	0.025	0.011	0.005	0.050	0.012	4.251	1.645	Lolos
TABU	-0.023	0.011	0.011	0.005	0.026	0.012	2.188	1.645	Lolos

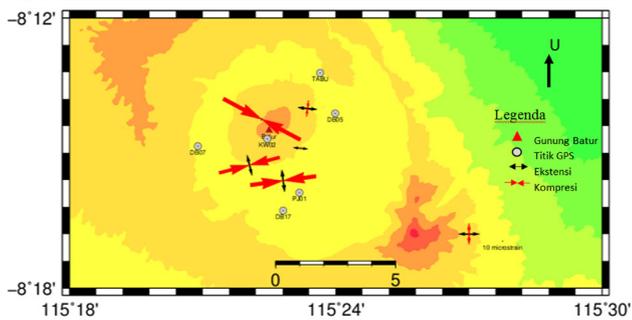
Pada Gambar 9 ditunjukkan vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS, dan Gambar 10 merupakan hasil plot regangan yang terjadi pada area Gunung Batur pada kala keempat.

Pola vektor pergeseran semua titik pengamatan dominan berarah pergeseran ke barat laut. Rentang besar vektor pergeseran untuk semua titik pengamatan antara ± 1 sampai ± 5 cm.

Pola regangan pada area Gunung Batur memperlihatkan bahwa pada bagian timur laut dan timur Gunung Batur terjadi ekstensi masing-masing sebesar $9,07$ μ strain dan $6,9$ μ strain, sedangkan pada bagian utara dan selatannya terjadi kompresi dengan rentang sebesar $-29,2$ sampai $-40,8$ μ strain.



Gambar 9. Vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS pada kala keempat.



Gambar 10. Regangan pada kala keempat.

Oleh karena itu, pola vektor pergeseran dan pola regangan tersebut mengindikasikan bahwa tidak terdapat peningkatan aktivitas vulkanis di Gunung Batur. Perubahan besaran regangan lebih disebabkan oleh perbedaan kecepatan pergeseran titik-titik pengamatan GPS yang bergerak relatif searah. Pola pergeseran yang demikian diperkirakan dominan dipengaruhi oleh aktivitas tektonik.

Kala Kelima (Februari 2015 - Juni 2015)

Kala kelima merupakan kala ketika Gunung Batur dalam kondisi tenang, yang dicirikan oleh rendahnya jumlah rekaman gempa VA, VB, maupun LF di Gunung Batur.

Tabel 6 memperlihatkan hasil uji statistik pada kala

ini yang menunjukkan ada enam titik pengamatan yang pergeserannya signifikan.

Tabel 7. Hasil Uji Statistik Kala Kelima

Titik	de	dn	σ_e	σ_n	Vr	StdVr	T	t syarat	Hasil
DB02	0.009	0.004	0.008	0.004	0.010	0.009	1.052	1.645	Tidak Lolos
DB03	0.009	-0.013	0.009	0.004	0.016	0.010	1.676	1.645	Lolos
DB05	0.015	-0.027	0.010	0.005	0.031	0.011	2.785	1.645	Lolos
DB06	0.012	0.000	0.008	0.004	0.012	0.009	1.238	1.645	Tidak Lolos
DB07	-0.024	-0.017	0.013	0.005	0.029	0.014	2.053	1.645	Lolos
DB17	-0.018	-0.005	0.007	0.003	0.018	0.007	2.487	1.645	Lolos
DB19	0.006	-0.001	0.008	0.005	0.006	0.009	0.698	1.645	Tidak Lolos
DB25	0.010	-0.010	0.008	0.004	0.014	0.009	1.540	1.645	Tidak Lolos
KW01	0.016	-0.021	0.020	0.009	0.027	0.021	1.235	1.645	Tidak Lolos
KW02	0.058	-0.027	0.026	0.010	0.064	0.028	2.301	1.645	Lolos
PJ01	-0.021	-0.001	0.007	0.004	0.021	0.008	2.692	1.645	Lolos

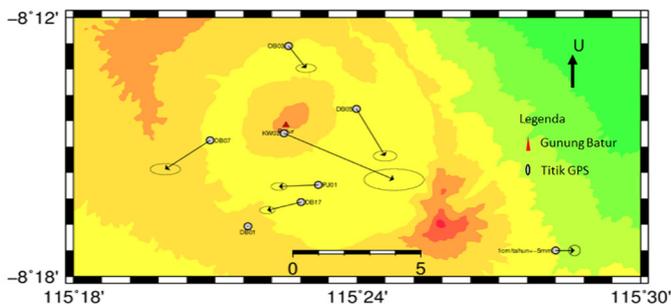
Gambar 11 merupakan hasil plot vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS, dan Gambar 12 merupakan hasil plot regangan yang terjadi pada area Gunung Batur pada kala kelima.

Pola vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS tersebut mempunyai arah yang sama pada masing-masing lokasi, yaitu lokasi yang mencakup bagian selatan sampai barat dan lokasi yang mencakup bagian utara sampai timur Gunung

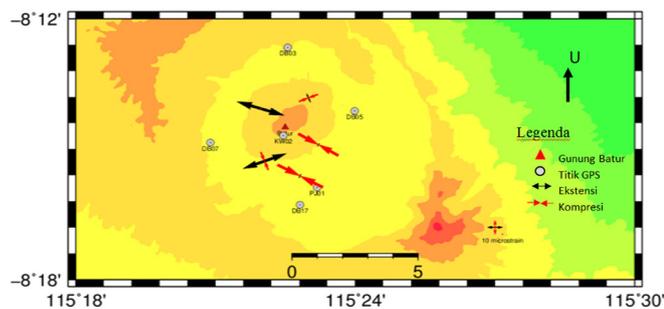
Batur. Pada bagian selatan sampai barat arah vektor pergeserannya mengarah ke arah barat. Namun untuk bagian utara sampai timur vektor pergeserannya menuju tenggara. Rentang besar vektor pergeseran untuk semua titik pengamatan antara ± 1 sampai ± 6 cm.

Pola regangan pada area Gunung Batur memperlihatkan bahwa pada bagian barat laut terjadi ekstensi sebesar $33,03 \mu\text{strain}$, sedangkan pada bagian timur dan timur laut Gunung Batur terjadi kompresi sebesar $-13,5 \mu\text{strain}$ dan $-30,8 \mu\text{strain}$.

Pola vektor pergeseran dan pola regangan tersebut mengindikasikan bahwa terdapat dua blok yang bergerak berlawanan arah yang kemungkinan besar lebih disebabkan oleh aktivitas tektonik



Gambar 11. Vektor pergeseran titik-titik pengamatan GPS pada kala kelima.



Gambar 12. Regangan pada kala kelima.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh berdasarkan penelitian ini adalah pada kala pertama, pola deformasi menunjukkan ekstensi di bagian barat daya, dilanjutkan perpindahan ekstensi ke arah timur laut yang diiringi oleh peningkatan aktivitas kegempaan ke arah yang lebih dangkal.

Namun pada kala kedua, yaitu pengamatan GPS bulan Oktober 2008 - bulan November 2009, pola deformasi yang terjadi pada Gunung Batur menunjukkan adanya inflasi dengan pola vektor pergeseran titik pengamatan GPS dominan ke arah luar (menuju timur, tenggara, dan selatan) dari Gunung Batur. Selain itu, pola regangan memperlihatkan bahwa pada area bagian utara dan timur laut Gunung Batur dominan terjadi ekstensi. Hal ini mengindikasikan ada kesesuaian terhadap data kegempaan terkait adanya peningkatan aktivitas vulkanis Gunung Batur, yaitu pada bulan September - bulan November 2009.

Sementara, pada kala ketiga, yaitu pengamatan GPS untuk periode bulan November 2009 - bulan Februari 2013, Gunung Batur didominasi gempa-gempa dangkal dengan pola deformasi yang menunjukkan adanya deflasi pada Gunung Batur dengan pola vektor pergeseran titik pengamatan GPS berarah menuju Gunung Batur dan pola regangan yang memperlihatkan bahwa pada area Gunung Batur terjadi kompresi yang menunjukkan mulai menurunnya aktivitas vulkanis. Pada kala keempat dan kelima, ketika aktivitas vulkanis tidak memperlihatkan adanya peningkatan, pola deformasi yang dipengaruhi oleh tektonik lebih terlihat dominan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) No. PRJ-1048/LPDP/2015, dan *Australian Department of Foreign Affairs and Trade (DFAT)* untuk riset kegempaan dan tektonik aktif di Institut Teknologi Bandung. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) atas bantuan dalam perolehan data pengamatan GPS episodik pada area Gunung Batur yang menjadi data utama dalam penelitian ini. Terima kasih juga untuk Endra Gunawan yang telah meluangkan waktunya untuk membantu penulis dalam mengoreksi dan me-review tulisan ini. Terakhir terima kasih untuk *Graduate Research on Earthquake and Active Tectonics (G.R.E.A.T)* atas bantuan dan bimbingan selama penelitian dan perangkat lunak GMT (Wessel dan Smith, 1998) dalam memvisualisasikan hasil yang telah diperoleh dalam bentuk gambar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., 2007. Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., dan Fridez, P., 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern.
- Faris, A., 2015. Analisis Deformasi Gunung Api Batur Berdasarkan Data Pengamatan GPS Berkala Tahun 2008, 2009, 2013, dan 2015. Institut Teknologi Bandung.
- Hidayati, S. dan Sulaeman, C., 2013. Magma Supply System at Batur Volcano Inferred from Volcano-Tectonic Earthquakes and Their Focal Mechanism. *Indonesian Journal of Geology*, Vol. 8, No. 2 Juni , 97 - 105.
- Ma'ruf, B., 2001. Analisis Deformasi Gunung Merapi dengan Metode Geodetik-GPS. Institut Teknologi Bandung.
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVBMG), 2014. Gunung Batur. 1 - 8.
- Soedomo, A. S., dan Sudarman, 2004. Sistem dan Transformasi Koordinat. Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Bandung.
- Sutawidjaja, I. S., 1990. *G. Batur, Berita Berkala Vulkanologi, Edisi Khusus*. Direktorat Vulkanologi.
- Wessel, P. dan Smith, W.H.F., 1998. *New, improved version of generic mapping tools released*. EOS, 79: 579 - 579.
- Wolf, P. R. dan Ghilani, C. D., 1997. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, Fourth Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.