



IKATAN AHLI
KEBENCANAAN
INDONESIA

ISSN:
2443-2733

Vol. 2 No. 1, Mei 2016

J U R N A L
R I S E T
K E B E N C A N A A N
I N D O N E S I A

Jurnal Riset
Kebencanaan Indonesia

Vol. 2

No. 1

Hal.
1 - 94

Mei
2016

ISSN:
2443-2733



IKATAN AHLI
KEBENCANAAN
INDONESIA

ISSN:
2443-2733

Vol. 2 No. 1, Mei 2016

J U R N A L
R I S E T
K E B E N C A N A A N
I N D O N E S I A

Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia	Vol. 2	No. 1	Hal. 1 - 94	Mei 2016	ISSN: 2443-2733
---------------------------------------	--------	-------	----------------	-------------	--------------------

JURNAL RISET KEBENCANAAN INDONESIA

Terbit 2 kali setahun, mulai Mei 2015

ISSN: 2443-2733

Volume 2 Nomor 1, Mei 2016

Pembina:

Willem Rampangilei

Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana

Prof. Dr. Sudibyakto, M.Si

Ketua Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia

Penanggung Jawab/Pemimpin Redaksi:

Lilik Kurniawan, ST, M.Si

Sekretaris Jenderal Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia

Ketua Dewan Penyunting:

Ir. Heru Sri Naryanto, M.Sc/Geologi Lingkungan dan Bencana Geologi

Anggota Dewan Penyunting:

Prof. Ir. Mashyur Irsyam, MSE, Ph.D/Gempabumi

Dr. Hamzah Latief, M.Si/Tsunami

Prof. Dr. Kirbani Sri Brotopuspito/Gunungapi

Dr. Ing. Ir. Agus Maryono/Banjir dan Kekeringan

Dr. Ir. Adrin Tohari, M.Eng/Gerakan Tanah

Dr. rer. nat Armi Susandi, MT/Cuaca dan Gelombang Ekstrim

Prof. Dr. Ir. Azwar Maas/ Kebakaran Hutan dan Lahan

Dr. I Nyoman Kandun, MPH/Epidemi dan Wabah Penyakit

Ir. Isman Justanto, MSCE/Kegagalan Teknologi

Dr. Hendro Wardhono, M.Si/ Sosio-Kultural dan Kelembagaan

Dr. Raditya Jati/ Manajemen Bencana

Mitra Bestari:

Ir. Sugeng Triutomo, DESS, Dr. Ir. Harkunti Pertiwi Rahayu,

Dr. Ridwan Djamaludin, M.Sc, Dr. Triarko Nurlambang

Pelaksana Redaksi:

Elin Linawati, SKM, MM., Ridwan Yunus, Moh Robi Amri, ST., Arezka Ari Hantyanto,

Firza Ghozalba, ST, M.Eng., Pratomo Cahyo Nugroho, ST., Arie Astuti W, S.Si.,

Novi Kumalasari, SAP., Gita Yulianti S, ST., Elfina Rozita ST., Ageng Nur Icwana,

Asfirmanto W Adi, S.Si., Triutami H, ST., Sesa Wiguna, S.Si., Ade Nugraha, ST.,

Aminudin Hamzah, ST., Lilis Mutmainnah, S.Sos., Bambang Sasongko, MK

Alamat Redaksi:

Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia (IABI)

Sekretariat: Gedung INA-DRTG lt.2,

Indonesia Peace and Security Center (IPSC), Sentul, Bogor

e-mail: sekretariat@iabi-indonesia.org/ Website: www.iabi-indonesia.org

PENGANTAR REDAKSI

Alhamdulillah Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia (JRKI) Volume 2 Nomor 1 Tahun 2016 telah terbit. Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia merupakan jurnal ilmiah yang diterbitkan oleh Ikatan Ahli Kebencanaan Indonesia (IABI). Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia terbit 2 (dua) kali dalam setahun, untuk edisi yang pertama Volume 2, Nomor 1 Tahun 2016 diterbitkan pada bulan Mei 2016. Jurnal ini dipersembahkan oleh para ahli kebencanaan Indonesia kepada bangsa Indonesia, agar menjadi bangsa tangguh bencana.

Pada edisi ini disajikan 10 makalah, dengan penulis dari berbagai institusi, yaitu: Institut Teknologi Bandung (ITB), Universitas Gadjah Mada (UGM), Institut Teknologi Yogyakarta, Balai Sabo-Puslitbang Sumber Daya Air, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta dan Badan Informasi Geospasial.

Berbagai topik dibahas dalam edisi ini, yaitu: Indeks kerentanan banjir berbasis prediksi iklim untuk mitigasi kebencanaan banjir jangka panjang di daerah aliran sungai (DAS) Bengawan Solo, Aplikasi mitigasi bencana di sub-daerah aliran Sungai Kreo pada prediksi hujan-limpasan menggunakan Openlisem, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia, Kajian penyebab dan mekanisme bencana banjir di Manado, Sulawesi Utara, Efek fenomena iklim global terhadap variasi curah hujan di Provinsi Jawa Tengah dan D. I. Yogyakarta, Analisis tingkat kerawanan longsor pada sebagian Jalan Kelas III C di Sub-DAS Gesing, Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah, Manajemen risiko bencana pada Kawasan Cagar Budaya Gunung Padang, Ciamis, Jawa Barat, Aplikasi GPS untuk monitoring deformasi Gunung Lokon, Indonesia, Aplikasi GPS untuk pengamatan deformasi sesar Baribis, Kajian kerentanan bangunan akibat bahaya gempabumi di Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, dan Pengurangan risiko bencana gempabumi: evaluasi kinerja dinamika struktur gedung bertingkat rendah menggunakan model sendi plastis dengan variasi model beban.

Kami menerima kritik dan saran yang sifatnya membangun untuk kesempurnaan Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia ini.

Editor

JURNAL RISET KEBENCANAAN INDONESIA

Vol. 2 No. 1, Mei 2016

ISSN: 2443-2733

DAFTAR ISI

	Halaman
Pengantar Redaksi	ii
Daftar Isi	iii
1. INDEKS KERENTANAN BANJIR BERBASIS PREDIKSI IKLIM UNTUK MITIGASI KEBENCANAAN BANJIR JANGKA PANJANG DI DAERAH ALIRAN SUNGAI (DAS) BENGAWAN SOLO FLOOD VULNERABILITY INDEX BASED ON CLIMATE PREDICTION FOR THE LONG TERM FLOOD DISASTER MITIGATION BENGAWAN SOLO WATERSHED Armi Susandi, Aristyo R. Wijaya dan Fadhil M. Firdaus	1-7
2. APLIKASI MITIGASI BENCANA DI SUB-DAERAH ALIRAN SUNGAI KREO PADA PREDIKSI HUJAN-LIMPASAN MENGGUNAKAN OPENLISEM, PROVINSI JAWA TENGAH, INDONESIA APPLICATION OF DISASTER MITIGATION IN KREO SUB-WATERSHED ON RAINFALL- RUNOFF PREDICTION USING OPENLISEM, CENTRAL JAVA PROVINCE, INDONESIA Khairunnisa Adhar, Muh. Aris Marfai dan Sunarto	8-18
3. KAJIAN PENYEBAB DAN MEKANISME BENCANA BANJIR DI MANADO, SULAWESI UTARA STUDY OF CAUSED AND MECHANISM OF FLOOD DISASTER IN MANADO, NORTH SULAWESI Chandra Hassan, Alidina Nurul Hidayah dan Lily Handayani	19-29
4. EFEK FENOMENA IKLIM GLOBAL TERHADAP VARIASI CURAH HUJAN DI PROVINSI JAWA TENGAH DAN D. I. YOGYAKARTA IMPACTS OF GLOBAL CLIMATE PHENOMENA ON RAINFALL VARIATIONS IN CENTRAL JAVA AND D. I. YOGYAKARTA PROVINCE Rodi Yunus, Sudibyakto dan Muh. Aris Marfai	30-39
5. ANALISIS TINGKAT KERAWANAN LONGSOR PADA SEBAGIAN JALAN KELAS IIIC DI SUB-DAS GESING, KABUPATEN PURWOREJO, JAWA TENGAH ANALYSIS OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ON A FEW ROADS CLASS IIIC IN SUB-WATERSHED GESING, PURWOREJO DISTRICT, CENTRAL JAVA Ika Indah Karlina	40-49

6. MANAJEMEN RISIKO BENCANA PADA KAWASAN CAGAR BUDAYA GUNUNG PADANG, CIAMIS, JAWA BARAT
DISASTER RISK MANAGEMENT IN GUNUNG PADANG CULTURAL HERITAGE, CIAMIS, WEST JAVA
Sudibyakto dan Anggit Priatmodjo 50-58
7. APLIKASI GPS UNTUK MONITORING DEFORMASI GUNUNG LOKON, INDONESIA
GPS APPLICATION FOR MONITORING DEFORMATION IN LOKON VOLCANO, INDONESIA
Aditya Fikri Ghozali, Dina Anggreni Sarsito, Estu Kriswati dan Irwan Meilano 59-69
8. APLIKASI GPS UNTUK PENGAMATAN DEFORMASI SESAR BARIBIS
GPS APPLICATION FOR CRUSTAL DEFORMATION MONITORING ON BARIBIS FAULT
Fuad Ramadhana, Irwan Meilano, Dina A. Sarsito, Endra Gunawan, Hasanuddin Z. Abidin dan Joni Efendi 70-76
9. KAJIAN KERENTANAN BANGUNAN AKIBAT BAHAYA GEMPABUMI DI KOTA MATARAM, NUSA TENGGARA BARAT
BUILDING VULNERABILITY TO EARTHQUAKE IN MATARAM CITY, WEST NUSA TENGGARA
Uzlifatul Azmiyati, Kirbani Sri Brotopuspito dan Suprpto Dibyosaputro 77-84
10. PENGURANGAN RISIKO BENCANA GEMPABUMI: EVALUASI KINERJA DINAMIKA STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT RENDAH MENGGUNAKAN MODEL SENDI PLASTIS DENGAN VARIASI MODEL BEBAN
DISASTER RISK REDUCTION OF EARTHQUAKE: THE EVALUATION OF DYNAMIC STRUCTURAL PERFORMANCE OF A LOW-RISE BUILDING USING PLASTIC HINGE MODEL AND LOAD MODEL VARIATIONS
Sarwidi, Widodo dan RPM Trisusilo 85-93

APLIKASI GPS UNTUK MONITORING DEFORMASI GUNUNG LOKON, INDONESIA

GPS APPLICATION FOR MONITORING DEFORMATION IN LOKON VOLCANO, INDONESIA

Aditya Fikri Ghozali¹, Dina Anggreni Sarsito¹, Estu Kriswati² dan Irwan Meilano¹

¹Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa No. 10 Bandung 40132

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

Abstrak

Gunung Lokon merupakan bagian dari busur gunungapi Sangihe yang berada pada zona kolisi Maluku. Interval antar erupsi terjadi antara 1-4 tahun dengan periode dormansi 8-64 tahun. Erupsi besar yang terakhir terjadi pada tahun 1991. Pada tanggal 22 Februari 2011, terjadi erupsi yang dimulai dengan letusan freatik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola deformasi dari titik-titik pengamatan GPS Gunung Lokon menggunakan perangkat lunak GAMIT di titik KKVO, KINL, dan WALN antara tahun 2009-2014. Pergerakan titik direferensikan terhadap titik KKVO untuk menghilangkan pengaruh pergerakan blok dan melihat pergerakan akibat aktivitas vulkanik. Analisis regangan dilakukan dengan melihat perubahan panjang baseline antar titik dan juga regangan pada bidang yang dibentuk oleh ketiga titik pengamatan. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan pola pergeseran antara sebelum, saat, dan setelah periode erupsi 2011-2013. Selain itu terjadi pemendekan pada panjang baseline dari ketiga titik pengamatan. Deformasi pada Gunung Lokon ditandai dengan adanya kompresi yang semakin menguat ketika mendekati erupsi.

Kata Kunci: Lokon, deformasi, GPS, erupsi.

Abstract

Lokon volcano is part of the Sangihe volcanic arc system related to the Maluku collision zone. The intervals of eruptive activities were typically 1-4 years with variation of dormancy periods of 8-64 years. The last big eruption took place in 1991. On February 22nd, 2011 eruption occurred, began with a phreatic eruption that occurred on. This research analyze deformation of continuous GPS (CGPS) observation point in Lokon volcano. GAMIT software is used to analyse continuous GPS observation data of KKVO, KINL, and WALN station in 2009-2014. The movement then referenced to KKVO station to eliminate block motion and extract the volcanic displacement. Strain analysis is done by computing baseline strain and area strain formed by three CGPS station of Lokon Volcano. Results shows a difference of displacement patterns in three period of eruption activity in 2009-2014. Strain pattern among observation point from baseline analysis is compression. Deformation of Lokon volcano is characterized by increasing compression in north-south direction toward Tompaluan crater when it about to erupt.

Keywords: Lokon, deformation, GPS, eruption.

1. PENDAHULUAN

Gunung Lokon merupakan salah satu gunungapi aktif di Indonesia yang terletak di ujung selatan dari busur gunungapi Sangihe, yang memanjang dari Sulawesi ke Mindanao

seperti tampak pada Gambar 1. Berdasarkan bentuk morfologinya, puncak Gunung Lokon berdampingan dengan puncak Gunung Empung dengan jarak antara keduanya 2,3 km dan merupakan gunungapi kembar, sehingga sering disebut Kompleks Gunungapi Lokon-Empung.

Pada punggungannya antara Gunung Lokon dan Empung terdapat Kawah Tompaluan (1210 m dpl.) yang merupakan kawah aktif dan pusat aktivitas vulkanik saat ini (Suparman dkk., 2013).



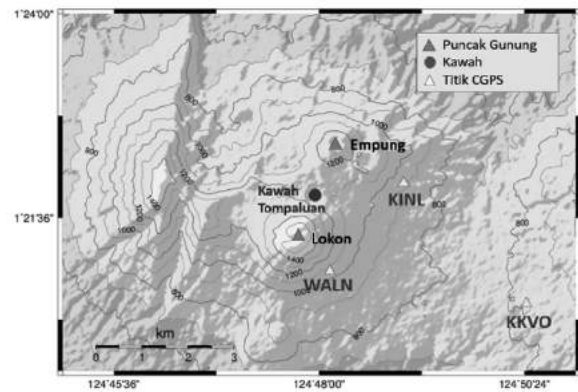
Gambar 1. Lokasi Gunung Lokon pada Busur Gunungapi Sangihe (MacPherson, 2003)

Gunung Lokon termasuk salah satu gunungapi dengan aktivitas vulkanik yang tinggi. Erupsi besar terakhir terjadi tahun 1991 (PVMBG, 2014). Pada bulan Juni 2011, terjadi rentetan erupsi yang menyebabkan peningkatan status kegiatan Gunung Lokon menjadi siaga sejak 24 Juli 2011 pukul 22.00 WITA (PVMBG, 2015). Untuk kepentingan mitigasi perlu dilakukan pemantauan aktivitas Gunung Lokon. Pemantauan aktivitas gunungapi dapat dilakukan dengan metode serta peralatan/sensor tertentu serta dapat diimplementasikan secara episodik maupun kontinu (Abidin dkk., 2007).

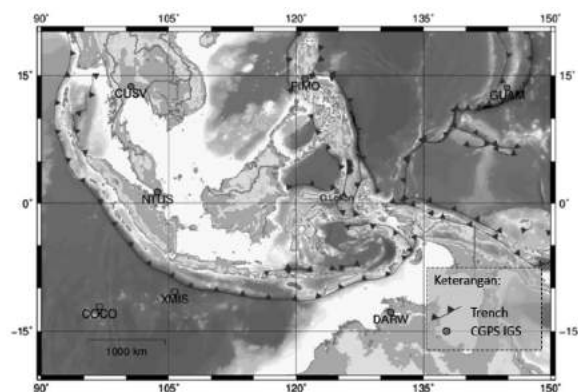
Pada penelitian ini pemantauan aktivitas tersebut mengaplikasikan metode deformasi permukaan berdasarkan pengamatan *Global Positioning System* (GPS) geodetik yang dilakukan secara kontinu.

2. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data tiga titik pengamatan GPS kontinu Gunung Lokon yang diperoleh dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) selama enam tahun (2009-2014). Persebaran ketiga titik pengamatan diperlihatkan pada Gambar 2. Ketiga titik pengamatan diikatkan terhadap tujuh stasiun IGS (*International GNSS Service*) yang terdistribusi melingkupi wilayah Indonesia, diantaranya GUAM, PIMO, CUSV, NTUS, XMIS, COCO, dan DARW. Persebaran stasiun pengamatan GPS milik IGS yang disertakan bisa dilihat pada Gambar 3.

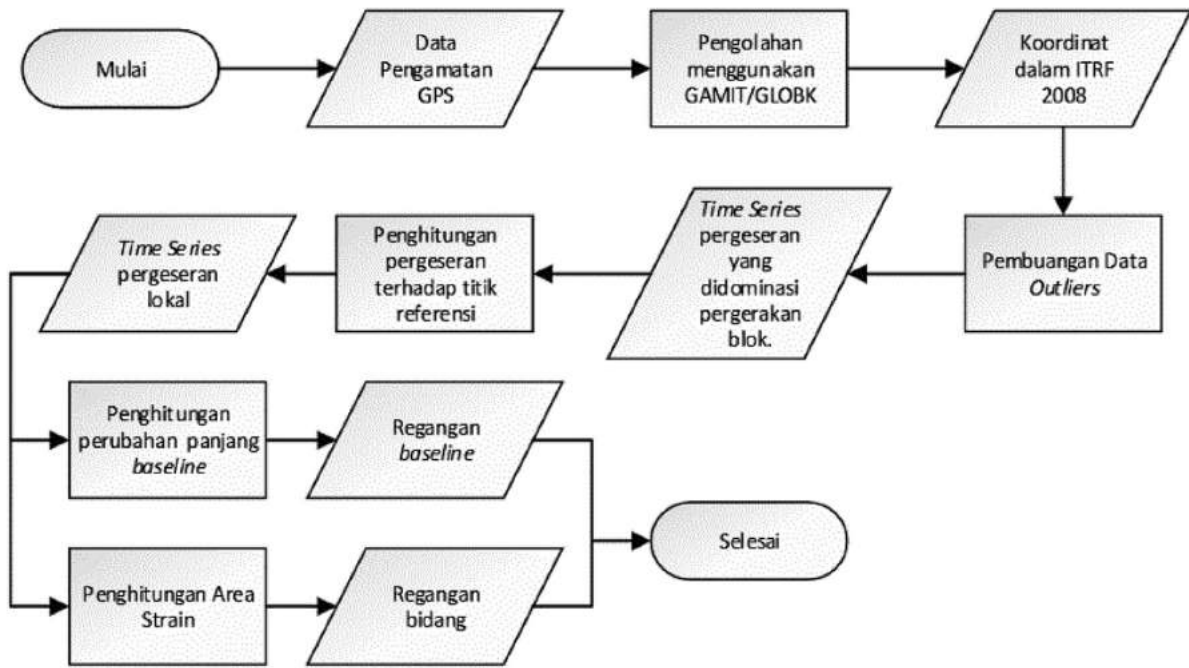


Gambar 2. Titik CGPS Gunung Lokon



Gambar 3. Persebaran Titik IGS yang Digunakan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pengolahan data pengamatan GPS untuk menganalisis deformasi yang terjadi. Diagram alir dari pengolahan data yang dilakukan bisa dilihat pada Gambar 4. Data pengamatan GPS diolah menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK 10.5 (Herring dkk., 2010). Selain data RINEX dari tiap stasiun pengamatan, pengolahan data juga menggunakan data *precise ephemeris* (SP3), data koreksi ionosfer (IONEX), dan data navigasi orbit satelit. Output dari pengolahan ini adalah solusi koordinat harian dari stasiun pengamatan GPS beserta matriks kovariansinya. Berdasarkan solusi koordinat harian tersebut dapat dilihat pola pergerakan dari titik pengamatan yang menunjukkan proses tektonik dan vulkanik yang ditransmisikan ke permukaan melalui sifat mekanik dari kerak bumi (Lisowski, 2007). Selanjutnya pola pergerakan dianalisis untuk memahami karakteristik dan pola deformasi yang terjadi dan kaitannya dengan aktivitas erupsi Gunung Lokon pada tahun 2011 - 2013 (Kristianto dkk., 2012).



Gambar 4. Diagram Alir Metode Pengolahan Data

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Solusi Koordinat Harian

Pengolahan data menggunakan GAMIT 10.5 menghasilkan koordinat geosentrik dan geodetik beserta standar deviasi dari setiap titik pengamatan dan nilai pergeseran yang diikatkan terhadap kerangka koordinat ITRF 2008. Standar deviasi dari koordinat titik pengamatan dapat dilihat pada Tabel 1.

Komponen Z memiliki standar deviasi terkecil, hal ini dikarenakan posisi titik pengamatan yang dekat dengan ekuator yaitu berada sekitar 1,3° Lintang Utara sehingga pengaruh ketelitian vertikal dari pengamatan GPS sangat kecil. Pada equator komponen vertikal hanya diwakili oleh sumbu X dan sumbu Y. Ketelitian dari penghitungan koordinat juga dipengaruhi oleh kualitas data dan geometri dari stasiun IGS yang digunakan pada penelitian ini. Pada koordinat toposentrik, standar deviasi

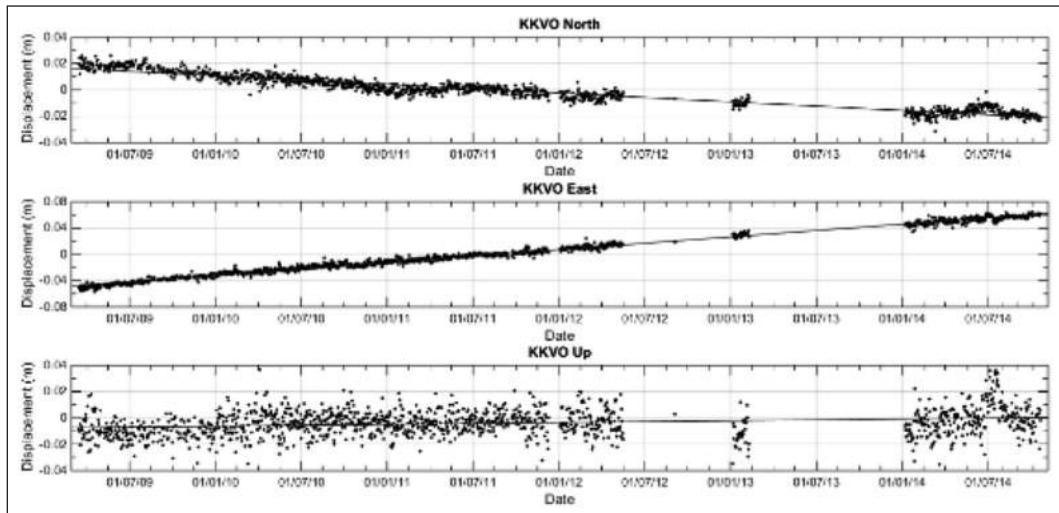
dari komponen horizontal berkisar antara 3 mm sampai 5 mm. Sementara ketelitian komponen vertikal tiga kali lebih besar dari ketelitian horizontalnya, dengan nilai 1,5 cm sampai 2 cm. Titik KKVO merupakan titik pengamatan dengan nilai standar deviasi paling kecil.

3.2. Pergeseran Terhadap ITRF 2008

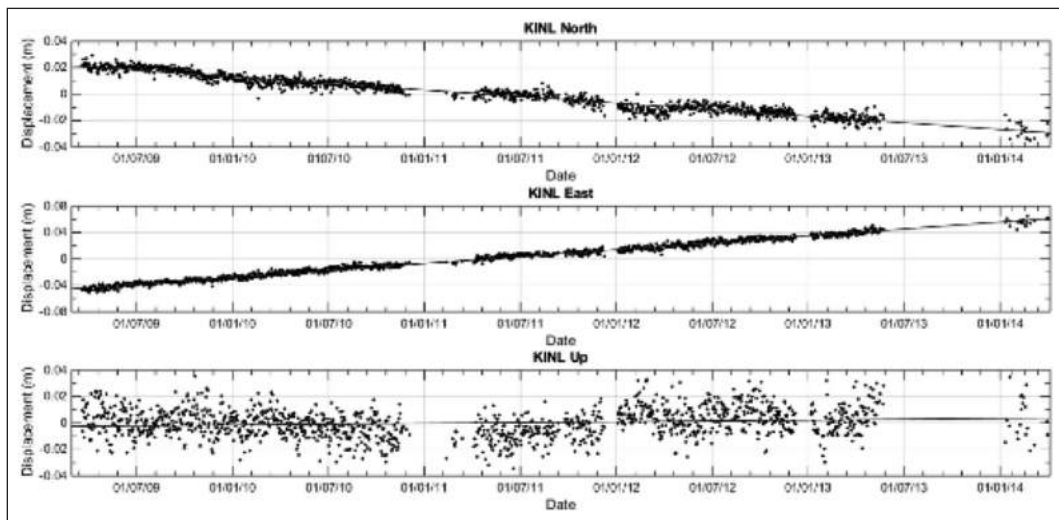
Pergeseran titik pengamatan GPS diplot menggunakan koordinat toposentrik. Sebelum dilakukan plotting, terlebih dahulu dilakukan pembuangan data *outlier* agar didapat distribusi data yang baik dan meminimalisasi error. Pada penelitian ini digunakan tingkat kepercayaan 95%, data yang berada di luar $\pm 2\sigma$ dianggap sebagai *outlier*. *Time series* dari pergeseran koordinat toposentrik titik pengamatan KKVO, KINL, dan WALN yang sudah terbebas dari data *outlier* masing-masing bisa dilihat pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.

Tabel 1. Standar Deviasi Koordinat Kartesian Geosentrik dan Toposentrik

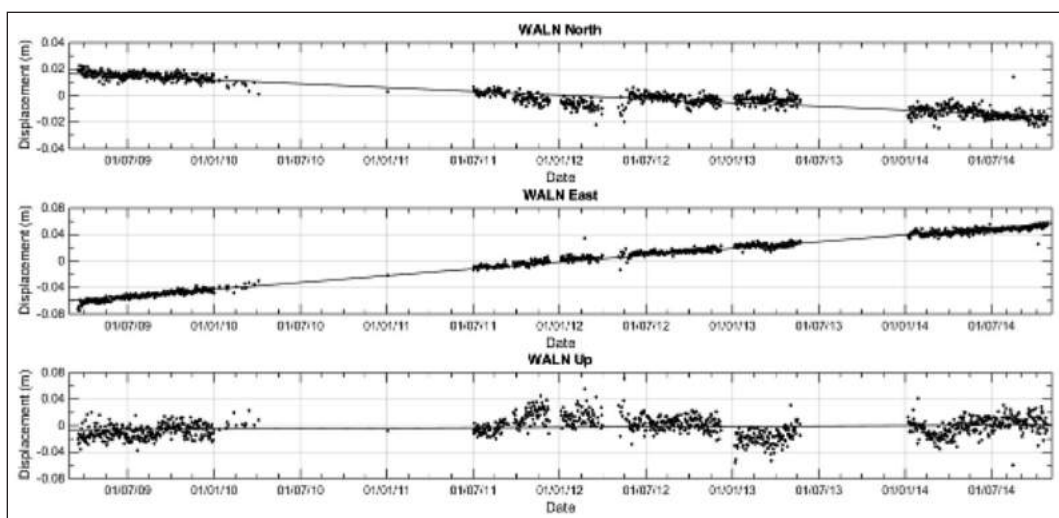
Titik	Standar Deviasi (mm)					
	X	Y	Z	N	E	U
KKVO	9,2	12,0	3,8	3,6	4,0	14,2
KINL	10,8	13,4	3,6	3,7	4,4	16,1
WALN	12,9	15,6	4,4	4,5	5,0	19,1



Gambar 5. *Time Series* Pergeseran dari Titik Pengamatan KKVO pada Rentang Tahun 2009-2014



Gambar 6. *Time Series* Pergeseran dari Titik Pengamatan KINL pada Rentang Tahun 2009-2014

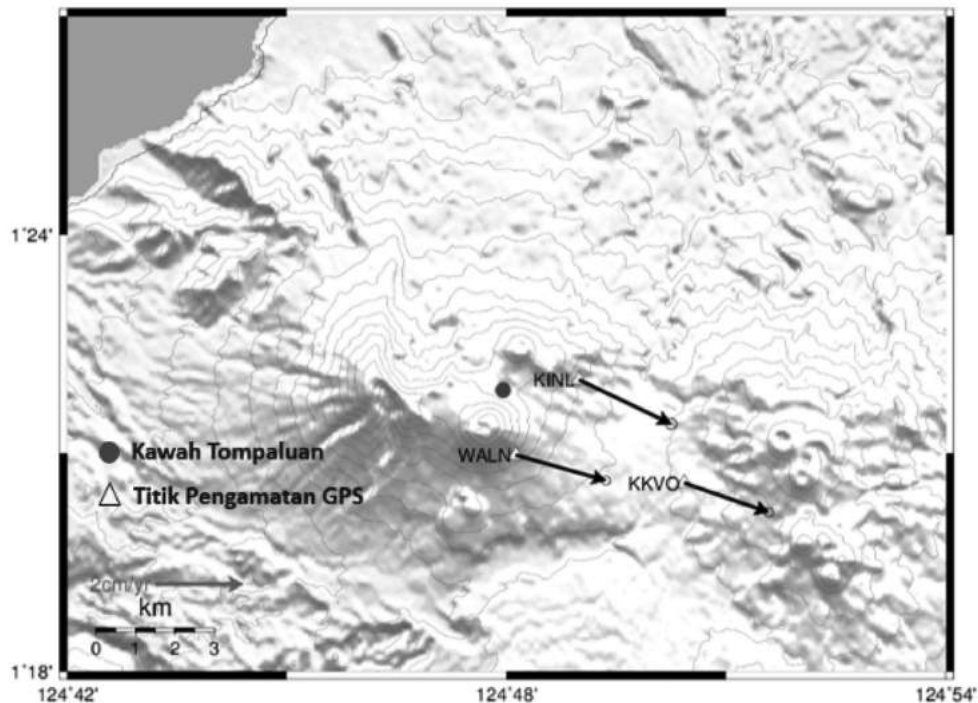


Gambar 7. *Time Series* Pergeseran dari Titik Pengamatan WALN pada Rentang Tahun 2009-2014

Berdasarkan *time series*, pola pergeseran dari ketiga titik menunjukkan pergerakan yang seragam dan hampir linear pada rentang tahun 2009-2014. Plot pergeseran dari ketiga titik diperlihatkan pada Gambar 8, kecepatan pergeseran bisa dilihat pada Tabel 2. Laju Pergeseran dari titik-titik pengamatan GPS Gunung Lokon tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Ketiga titik bergerak ke arah tenggara dengan laju pergeseran sekitar 2 cm/tahun dengan standar deviasi sekitar 0,06 mm/tahun. Hal tersebut menunjukkan pergerakan titik-titik pengamatan masih didominasi oleh pergerakan blok. Oleh karena itu pergeseran ini harus direferensikan terhadap salah satu titik pengamatan.

3.3. Pergeseran Lokal

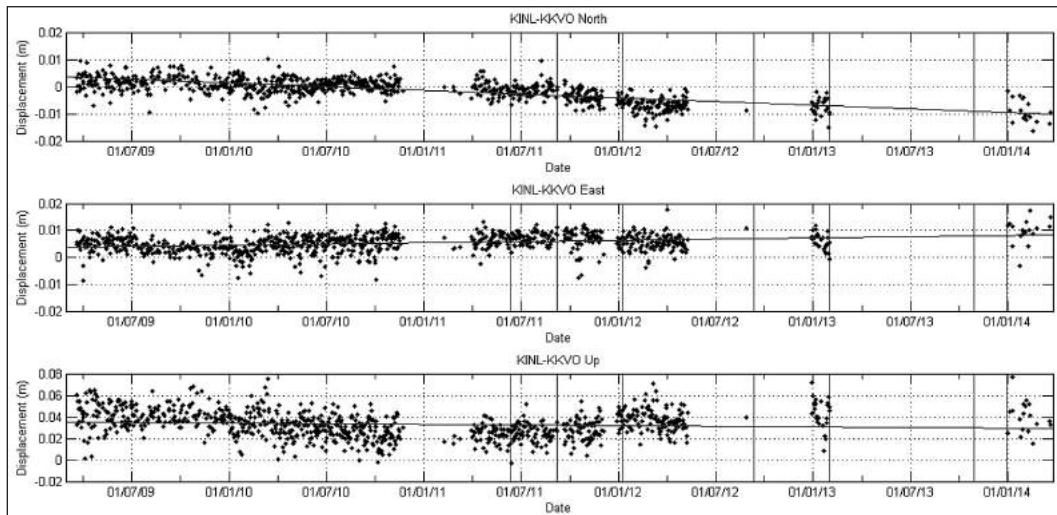
Pergeseran kemudian direferensikan terhadap titik KKVO. Jadi diasumsikan titik KKVO tidak bergeser. Pemilihan titik KKVO sebagai titik referensi berdasarkan nilai standar deviasinya yang paling kecil serta posisi yang paling jauh dari sumber aktivitas vulkanik Gunung Lokon. Pergerakan relatif titik KINL dan WALN terhadap titik KKVO bisa dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10. Pergeseran yang direferensikan terhadap titik KKVO terlihat lebih kompleks. Garis tegak pada Gambar 9 dan Gambar 10 adalah waktu terjadinya letusan pada Gunung Lokon.



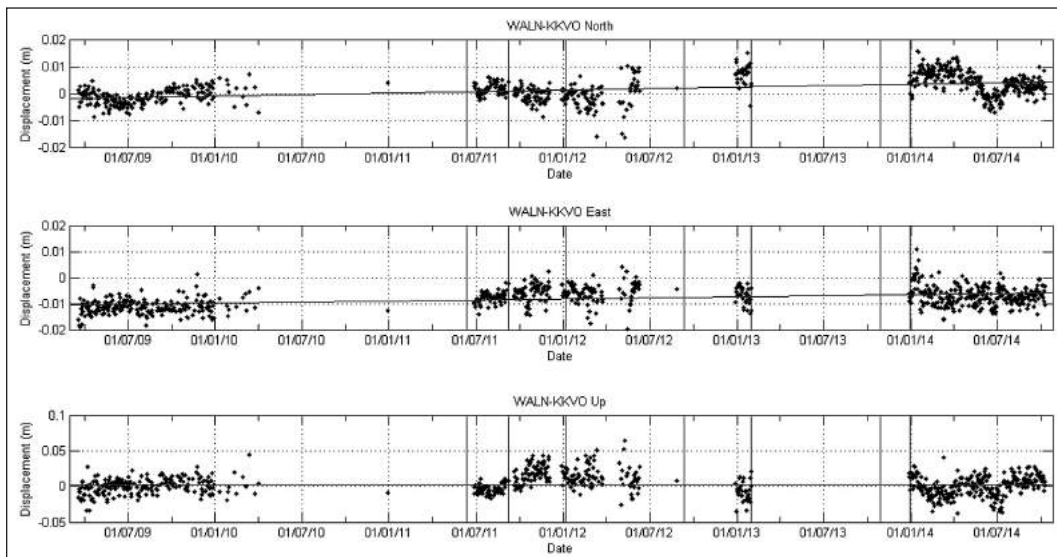
Gambar 8. Vektor Pergeseran Titik Pengamatan GPS Gunung Lokon Terhadap ITRF 2008 Dari Tahun 2009-2014

Tabel 2. Kecepatan Pergeseran Titik-Titik Pengamatan GPS Kontinu Gunung Lokon

No.	Titik	Bujur	Lintang	V_e (mm/ tahun)	V_n (mm/ tahun)	σ_{ve} (mm)	σ_{vn} (mm)	V_r (mm)	σ_{Vr} (mm)
1	KKVO	124,816	1,366	19,30	-6,69	0,04	0,04	20,43	0,06
2	KINL	124,802	1,349	21,00	-10,06	0,05	0,05	23,29	0,07
3	WALN	124,84	1,343	20,59	-5,82	0,04	0,04	21,40	0,06



Gambar 9. *Time Series* Pergeseran Titik KINL Relatif Terhadap KKVO



Gambar 10. *Time Series* Pergeseran Titik WALN Relatif Terhadap KKVO

Pergeseran titik-titik pengamatan dibagi menjadi tiga periode berdasarkan aktivitas kegempaan Gunung Lokon pada Gambar 11, yaitu periode Maret 2009-Juli 2011, periode Juli 2011-Februari 2013, dan periode Februari 2013-Maret 2014. Pembagian ini dilakukan untuk melihat perbedaan vektor pergeseran pada saat peningkatan aktivitas, puncak aktivitas, dan penurunan aktivitas erusif dari Gunung Lokon.

Pergeseran horizontal antara awal dan akhir periode secara matematis dapat diestimasi dengan persamaan (1) dan persamaan (2)

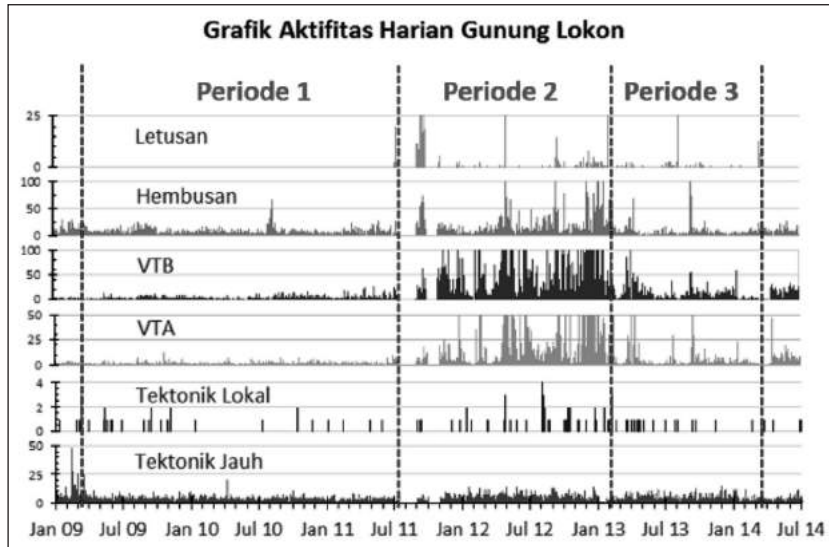
$$de = e_{t2} - e_{t1} \quad (1)$$

$$dn = n_{t2} - n_{t1} \quad (2)$$

Sementara standar deviasi dari pergeseran dapat dihitung melalui persamaan (3)

$$Std\ dr = \sqrt{(\sigma e_{t2})^2 + (\sigma e_{t1})^2} \quad (3)$$

Setelah mendapatkan nilai pergeseran titik-titik pengamatan, dilakukan uji statistik yang bertujuan untuk mengetahui pergeseran titik-titik yang cukup signifikan. Uji statistik yang digunakan dalam penelitian ini adalah *t-distribution* atau yang dikenal sebagai *Student-distribution (t-student)*. *T-student* digunakan dalam pengujian hipotesis untuk memeriksa validitas sebuah sampel terhadap populasi dan untuk menurunkan interval kepercayaan dari rata-rata populasi yang mempunyai set sampel yang yang relatif kecil (Ghillani, 2010). Selang kepercayaan yang digunakan adalah 95% dengan $\alpha/2 = 0,025$. Pada



Gambar 11. Pembagian Periode Berdasarkan Kegempaan Harian Gunung Lokon

tes ini, hipotesis nol ($V_r = 0$) menunjukkan bahwa pergeseran tidak signifikan, sedangkan bila ($V_r \neq 0$) menunjukkan bahwa pergeseran cukup signifikan. Maka hipotesis nol akan ditolak jika nilai t lebih besar daripada nilai t -condition ($T > t_{v, \alpha/2}$). Nilai T diperoleh dengan persamaan (4).

$$T = \frac{V_r}{StdV_r} \quad (4)$$

Pergeseran titik KINL dan WALN relatif terhadap titik KKVO pada tiap periode beserta uji signifikansi yang dilakukan bisa dilihat pada Tabel 3. Nilai pergeseran horizontal pada titik KINL dan WALN setelah direferensikan terhadap titik KKVO berada dibawah 1 cm pada setiap periodenya dengan standar deviasi pada komponen horizontal rata-rata dibawah 5 mm. Pada pergeseran titik KINL pada periode ketiga, standar deviasi hampir 4 mm. Bila dibandingkan dengan nilai pergeseran yang sangat kecil (hanya

dalam orde mm), standar deviasi sebesar 4 mm bisa lebih dominan dari pada pergeserannya sendiri. Oleh karena itu pergeseran pada periode ketiga tidak lolos uji signifikansi.

3.4. Penghitungan Regangan

Berdasarkan nilai pergeseran kemudian dihitung regangan dengan dua metode yaitu regangan *baseline* dan regangan bidang. Regangan bidang dihitung pada segitiga yang dibentuk oleh tiga titik pengamatan berdasarkan data pergeseran. *Normal strain* dan *shear strain* dihitung dalam fungsi dari nilai pergeseran menggunakan persamaan (5).

$$\begin{bmatrix} de \\ de \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & n & -n & 0 & 1 & 0 \\ 0 & e & e & -n & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \Omega \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

Tabel 3. Nilai Pergeseran Titik KINL dan WALN Relatif Terhadap KKVO pada Tiap Periode serta Hasil Uji Signifikansinya

Periode	Titik	Pergeseran (mm)		σ (mm)		Resultan (mm)		Uji-T		
		dN	dE	σ_N	σ_E	dR	σ_dR	T-S	T	Hasil
1	KINL	-4,33	0,7	1,89	0,64	4,38	2,00	1,96	2,18	Lolos
	WALN	-2,06	5,42	0,65	2,56	5,79	2,65	1,96	2,18	Lolos
2	KINL	-4,12	-1,77	0,97	0,73	4,40	1,22	1,96	3,68	Lolos
	WALN	7,05	1,50	1,71	1,72	7,20	2,43	1,96	2,96	Lolos
3	KINL	-3,77	6,72	4,04	3,73	7,70	5,50	1,96	1,40	Tidak Lolos
	WALN	-1,36	1,51	0,14	0,92	2,03	0,93	1,96	2,18	Lolos

Analisis *strain* bisa dilihat melalui nilai *principal strain* terbesar (ϵ_1) dan nilai *principal strain* terkecil (ϵ_2). Nilai ϵ_1 dan ϵ_2 bisa dihitung menggunakan persamaan (6), sementara nilai *regangan bidang* didapat dengan menjumlahkan ϵ_1 dan ϵ_2 .

$$\epsilon_1, \epsilon_2 = \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \epsilon_{xy}^2} \quad (6)$$

Nilai *regangan bidang* pada tiap periode bisa dilihat pada Tabel 4. Nilai negatif pada *regangan bidang* dari ketiga periode menunjukkan terjadinya kompresi yang terjadi secara terus menerus pada bidang segitiga yang dibentuk oleh titik pengamatan KKVO, KINL, dan WALN. Terjadi peningkatan nilai kompresi pada periode kedua, namun pada periode ketiga nilai kompresi mengecil.

Tabel 4. Regangan Bidang Tiga Titik CGPS Gunung Lokon Pada Tiap Periode

Per.	ϵ_1 (μ strain)	ϵ_2 (μ strain)	θ	Strain Area
1	-0,82	-3,23	31,3°	-4,06
2	0,20	-4,68	23,2°	-4,48
3	0,92	-2,18	148,7°	-1,25

Sementara itu, *Regangan baseline* dihitung berdasarkan perubahan panjang *baseline* pada tiap periode. Panjang *baseline* yang dihitung yaitu jarak horizontal antara 2 titik pengamatan. Panjang *baseline* KINL-KKVO, WALN-KKVO, dan WALN-KINL masing-masing sekitar 3,7 Km; 4,3 Km; dan 2,5 Km. *Regangan baseline* didefinisikan secara matematis sebagai perbandingan antara perubahan panjang dan panjang *baseline* awal, seperti pada persamaan (7).

$$e = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad (7)$$

Nilai *regangan* pada tiap periode bisa dilihat pada Tabel 5. Pada semua *baseline* terjadi kompresi pada semua periode. Kompresi terbesar terjadi pada *baseline* KINL-WALN pada periode Juli 2011-Februari 2013. Pada periode tersebut terjadi puncak aktivitas letusan Gunung Lokon. Selain itu, dibandingkan dua *baseline* lainnya *baseline* KINL-WALN merupakan yang paling dekat dengan Kawah Tompaluan.

3.5. Pola Pergeseran dan Regangan

Nilai vektor pergeseran titik-titik pengamatan dan nilai *regangan* yang diperoleh kemudian diplot menggunakan perangkat lunak *Generic Mapping Tools* (GMT) untuk melihat pola deformasi yang terjadi. Selanjutnya dilakukan analisis mengenai deformasi yang terjadi di Gunung Lokon. Pola *regangan* dan pergeseran tiap periode bisa dilihat pada Gambar 12.

Pada periode pertama pergeseran yang terjadi yaitu titik KINL dan WALN bergerak menuju sebelah timur dari Kawah Tompaluan. Besar pergeseran kedua titik pengamatan sekitar 5 mm. Sementara itu, terjadi pemendekan pada ketiga *baseline*. Pemendekan *baseline* yang paling besar terjadi pada *baseline* antara titik KINL dan WALN, yaitu memendek sebesar -7,4 mm dan dalam satuan *regangan* sebesar -2,9 μ -strain. Sementara itu pola *regangan bidang* menunjukkan terjadi kompresi pada kedua *principal strain*. Kompresi yang terjadi dominan pada arah timur laut-barat daya dengan nilai sebesar -3,2 μ -strain. Sementara kompresi pada arah barat laut-tenggara sebesar -0,8 μ -strain.

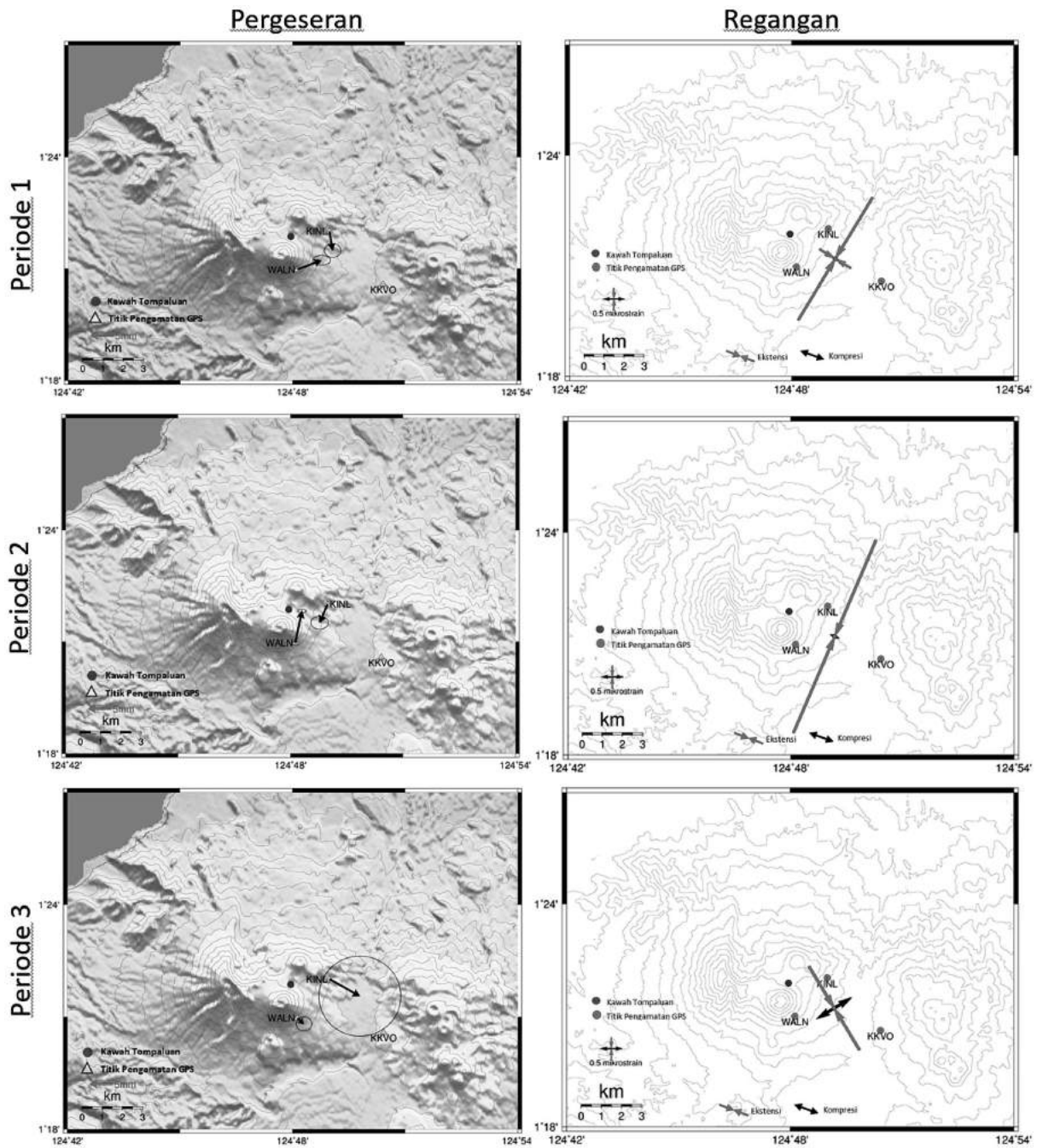
Pada periode kedua pergeseran kedua titik (KINL dan KKVO) mengarah ke pusat aktivitas vulkanik Gunung Lokon, yaitu Kawah Tompaluan. Besar pergeseran yaitu 4 cm pada titik KINL dan 7 cm pada titik WALN. Pada *regangan bidang* juga terjadi peningkatan kompresi dan pergeseran arah kompresi menuju arah utara-selatan. Pada periode ketiga titik KINL dan WALN justru bergeser menjauh dari Kawah

Tabel 5. Nilai Regangan pada Tiap Perubahan Panjang *Baseline*

Baseline	2009-2011		2011-2013		2013-2014	
	ΔL (mm)	μ -Strain	ΔL (mm)	μ -Strain	ΔL (mm)	μ -Strain
KKVO-KINL	-3,53	-0,94	-1,95	-0,52	-8,97	-2,40
KKVO-WALN	-4,38	-1,01	-0,34	-0,07	-0,96	-0,22
KINL-WALN	-7,44	-2,99	-11,93	-4,79	-0,17	-0,07

Pergeseran

Regangan



Gambar 12. Pola Pergeseran dan Regangan Titik Pengamatan GPS Gunung Lokon pada Tiga Periode

Tompaluan. Sesuai dengan pergerakan tersebut, pemendekan *baseline* juga terjadi dominan pada *baseline* KINL-KKVO. Dari regangan bidang terlihat kompresi searah *baseline* KINL-KKVO. Nilai standar deviasi posisi titik pengamatan yang terlalu besar dengan nilai yang hampir sama dengan pergerakan pada periode ketiga membuat pergerakan yang dihitung tidak signifikan. Oleh karena itu, pergerakan dan arah regangan pada periode ketiga ini tidak dapat dijadikan acuan (dengan derajat kepercayaan 95%).

3.6. Analisis Deformasi

Perubahan pergeseran dan regangan yang terjadi antara periode pertama dan periode kedua menunjukkan peningkatan kompresi yang semakin mengarah ke Kawah Tompaluan seiring dengan meningkatnya aktivitas letusan Gunung Lokon. Pada periode pertama terlihat pergerakan titik KINL dan WALN yang mulai beranjak ke arah pusat aktivitas vulkanik Gunung Lokon. Pada periode ketiga titik KINL dan WALN justru bergeser menjauh dari Kawah Tompaluan.

Pemendekan *baseline* terjadi dominan pada *baseline* KINL-KKVO. Dari regangan bidang terlihat kompresi searah *baseline* KINL-KKVO. Fenomena pada periode ketiga bisa saja dikaitkan dengan penurunan aktivitas vulkanik yang terjadi, namun hal tersebut tidak didukung oleh nilai standar deviasi titik pengamatan yang terlalu besar pada periode ketiga sehingga membuat pergerakan yang dihitung tidak signifikan.

Kompresi yang terjadi selama periode aktif Gunung Lokon relevan dengan karakteristik Gunung Lokon berdasarkan data kegempaan pada periode aktif tahun 2007 dan periode normal tahun 2008 yang dinyatakan oleh (Suparman, 2010) bahwa pada periode erupsi terjadi kontraksi dengan arah utara-selatan yang disebabkan oleh dikeluarkannya gas dan menyebabkan menurunnya tekanan pada sumber magma. Sebagai pembanding, karakter kompresi yang terjadi pada fase peningkatan aktivitas dan fase puncak erupsi juga terjadi pada Gunung Hekla, Islandia pada tahun 2001. Pada fase pertama, sebelum terjadi erupsi, terjadi kompresi yang disebabkan oleh dike yang terbentuk secara cepat dan terus-menerus menjalar dari sumber magma ke permukaan. Pada fase kedua, saat periode terjadinya erupsi, dike masih membesar dan tekanan menurun pada sumber magma. Pada fase ketiga dike sudah tumbuh sepenuhnya dan terjadi ekstensi yang disebabkan penurunan tekanan pada sumber magma (Geirsson, 2003). Untuk lebih jelasnya, perbandingan antara hasil penelitian dan fenomena kompresi yang terjadi selama erupsi pada penelitian sebelumnya bisa dilihat pada Tabel 6. Dapat dikatakan bahwa fenomena kompresi yang terjadi bisa diindikasikan juga sebagai adanya intrusi magma berupa *dike*.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Titik KINL dan WALN bergeser saling mendekat ke arah timur Kawah Tompaluan sebelum periode erupsi tahun 2011-2013 dengan besar sekitar 5 mm. Pada periode erupsi, titik pengamatan bergerak saling mendekat ke arah Kawah Tompaluan dengan besar 4 mm pada titik KINL dan 7 mm pada titik WALN. Setelah periode erupsi, pergerakan titik KINL dan WALN tidak dapat dianalisis dikarenakan nilai standar deviasi yang terlalu besar. Selama 2009-2014 terjadi pemendekan pada *baseline* KKVO-KINL, KKVO-WALN, dan KINL-WALN. Pemendekan *baseline* ini menunjukkan adanya kompresi secara terus menerus di sebelah timur Kawah Tompaluan. Pemendekan terbesar terjadi pada *baseline* KINL-WALN yaitu sebesar $-4,79 \mu\text{strain}$. Regangan pada bidang segitiga yang dibentuk ketiga titik pengamatan menunjukkan adanya kompresi sebesar $-4,058 \mu\text{strain}$ dengan sudut 31° (timur laut-barat daya) dan hampir sejajar dengan *baseline* KINL-KKVO pada periode pertama. Pada periode kedua kompresi meningkat menjadi $-4,481 \mu\text{strain}$ dengan arah bergeser 8° menuju utara menjadi 23° .
2. Kompresi dengan arah utara-selatan yang terjadi selama periode pertama dan semakin meningkat pada periode kedua menunjukkan adanya aktivitas magmatik, yaitu tekanan yang semakin menurun pada sumber magma yang berkaitan dengan dikeluarkannya magma pada periode erupsi 2011-2013 baik itu dalam bentuk gas maupun erupsi magmatik. Kompresi tersebut juga dapat

Tabel 6. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Fenomena Kompresi Selama Masa Erupsi yang Pernah Diteliti Sebelumnya

Periode	Lokon (Suparman, 2010)	Penelitian ini	Hekla (Geirsson, 2003)	Penelitian ini
Peningkatan Aktivitas	Ekstensi Magma bermigrasi dan terakumulasi pada sumber magma dangkal	X	Kompresi Dike terbentuk secara cepat dan terus menjalar dari sumber magma ke permukaan	✓
Aktivitas Erupsi	Kompresi Penurunan tekanan pada sumber magma dangkal karena emisi gas	✓	Kompresi Dike masih membesar tekanan sedikit menurun	✓

diindikasikan sebagai adanya intrusi dike yang terus menjalar dari sumber magma ke permukaan.

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 *Graduate Research on Earthquake and Active Tectonic* di Institut Teknologi Bandung. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk mendapatkan data pengamatan GPS kontinu Gunung Lokon yang menjadi data pokok pada penelitian ini. Sebagian gambar diplot menggunakan perangkat lunak GMT (Wessel & Smith, 1998).

DAFTAR PUSTAKA

1. Abidin, H. Z., M. Hendrasto, H., Andreas, M. Gamal, M.A. Kusuma, U. Rosadi & F. Kimata, 2007, Karakteristik Deformasi Gunungapi Ijen dalam Periode 2002-2005 Hasil Estimasi Metode Survei GPS. *ITB Sains & Tek*, 39 A, 1-22.
2. Geirsson, H., 2003, Continuous GPS Measurements in Iceland 1999-2002, Technical Report, University of Iceland, Department of Geophysics, Reykjavic.
3. Herring, T. A., R.W., King & S.C. McClusky, 2010, Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science.
4. Kristianto, H. Gunawan, N. Haerani, I. Mulyana, A. Basuki, S. Primulyana & F.U. Bina, 2012, Gejala Awal Letusan Gunung Lokon Februari 2011-Maret 2012. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 3, 151-168.
5. Lisowski, M., 2007, Analytical Volcano Deformation Source Model, Dalam D. Dzurisin, *Volcano Deformation : Geodetic Monitoring Techniques* (hal. 279). Chichester: Praxis Publishing.
6. MacPherson, 2003, Map of Molucca Sea Region with Collision Zone and Volcanic Arcs indicated. Special Publication, Geologist Society, London.
7. PVMBG, 2014, Data dasar Gunung Lokon. Diambil kembali dari situs web PVMBG:<http://www.vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/520-g-lokon>
8. PVMBG, 2015, Evaluasi Kegiatan G. Lokon Pada Tingkat Aktivitas Siaga (level III) Hingga Tanggal 17 Juni 2015 Pukul 06:00 Wita. Bandung: PVMBG.
9. Suparman, Y., 2010, Comparison of Focal Mechanism of Volcano-Tectonic Earthquakes Between Active and Normal Periods at Lokon Volcano. *Jurnal Gunungapi dan Bencana Geologi*.
10. Suparman, Y., U.B. Saing & A. Zaennudin, 2013, Erupsi Gunung Lokon Berdasarkan Kegempaan, Deformasi, dan Geokimia pada Januari 2011. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 4, 199-217.
11. Wessel, P. & W.H.F. Smith, 1998, New, Improved Version Of Generic Mapping Tools Released. *EOS*, 79: 579-579.
12. Ghillani, C.D., 2010, Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, 5th edition. New Jersey: John Wiley & Sons, inc.

Diterima : 1 Maret 2016

Disetujui setelah revisi: 2 Mei 2016

Diterbitkan oleh:



IKATAN AHLI KEBENCANAAN INDONESIA
www.iabi-indonesia.org

Bekerjasama dengan:



BNPB

BADAN NASIONAL PENANGGULANGAN BENCANA
www.bnpb.go.id

