

PEMODELAN KANTUNG MAGMA GUNUNG SINABUNG DENGAN BERDASARKAN DATA GPS TAHUN 2015–2016

Ratih Kumalasari^{1*}

¹ *Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Jl. Harsono Rm Dalam No.46, RT.7/RW.4, Ragunan, Kec. Ps. Minggu, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta, Indonesia 12550*

*e-mail: ratih.kumalasari@dsn.ubharajaya.ac.id

ABSTRAK

Gunung Sinabung mulai erupsi pada tahun 2010 hingga saat ini (2021), berdasarkan hal tersebut maka perlu dilakukan analisis terkait Gunung Sinabung guna memprediksi posisi dan perubahan sumber tekanan dari Gunung Sinabung. Untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dari Gunung Sinabung maka dilakukan inversi dari data diatas permukaan yang dimiliki salah satunya yaitu data GPS (Global Positioning System), yang kemudian dat tren perubahan posisi dari GPS diinversi dengan metode Very Fast Simulated Annelaing (VFSA). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pada tahun 2015 hingga 2016 dikarenakan pada tahun tersebut terjadi erupsi yang kontinyu sehingga perubahan data terlihat dengan jelas. Dari hasil inversi diketahui bahwa sumber tekanan pada Gunung Sinabung terletak pada kedalaman dangkal yaitu 0,5km hingga 1,5km dibawah permukaan laut dibawah Gunung Sinabung, dan diketahui juga adanya perubahan sumber tekanan yang fluktuatif yaitu adanya kenaikan dan penurunan perubahan sumber tekanan yang berasosiasi dengan adanya inflasi dan deflasi pada tubuh Gunung Sinabung.

Kata Kunci: *Gunung Sinabung; Inversi; VFSA; GPS; Sumber tekanan*

ABSTRACT

[Title: Magma Chamber Inversion Scheme of Sinabung Volcano Based on GPS Data 2015–2016] Sinabung Volcano began to erupt in 2010 and continues to this day (in 2021), it is need to do an analysis related to Sinabung Volcano to predict the position and changes in pressure from Sinabung Volcano. To find out the subsurface conditions of Sinabung Volcano, we can do an inversion of the data above the surface that is GPS (Global Positioning System) data, then we look at the trend of the data and we invert it using Very Fast Simulated Annealing method (VFSA). The data used in this study is from 2015 to 2016 because in that year there was a continuous eruption so that changes in the data were clearly visible. From the results of the inversion, it is known that the source of pressure on Sinabung Volcano is located at a shallow depth of 0.5 km to 1.5 km below sea level under Sinabung Volcano, and also there is a change in the source of fluctuating pressure, the increase and decrease in changes in the pressure source associated with the presence of inflation and deflation on Sinabung Volcano.

Keywords: *Sinabung Volcano; Inversion; VFSA; GPS; Pressure Source*

PENDAHULUAN

Gunung Sinabung adalah salah satu gunung api aktif di Indonesia yang terletak di provinsi Sumatera Utara. Berdasarkan data dan klasifikasi oleh PVMB Sebelum tahun 2010 Gunung Sinabung merupakan gunung api tipe B yaitu gunung api yang belum pernah erupsi kembali sejak tahun 1600, kemudian sejak erupsinya yang pertama pada tahun 2010 maka Gunung Sinabung dinaikan klasifikasinya menjadi gunung api tipe A dan hingga saat ini Gunung Sinabung masih terus erupsi. (Gunawan, 2017., PVMBG, 2010).

Sesaat sebelum erupsi hingga setelah erupsi pada gunung api akan mengalami berbagai perubahan aktivitas seperti peningkatan aktivitas sesmik, peningkatan suhu dan hembusan gas, deformasi permukaan, dan lain-lain. Untuk mengetahui perubahan-perubahan tersebut maka dilakukan pengamatan terhadap aktivitas gunung api, salah satunya adalah pemantauan deformasi permukaan tubuh gunung api dengan menggunakan GPS (Global Positioning System). Data dari GPS kemudian dapat dimodelkan dengan pemodelan numerik salah

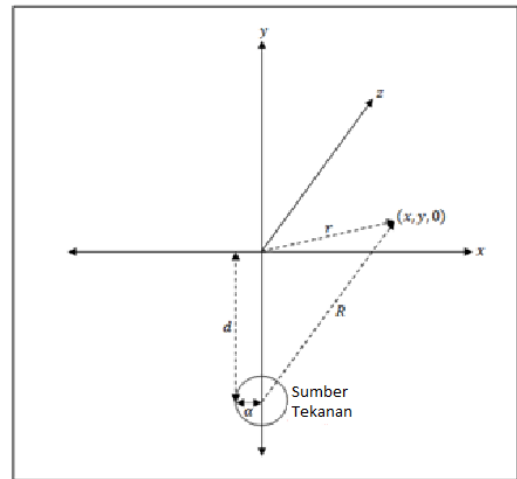
satunya adalah metode Very Fast Simulated Annealing (VFSA) untuk mengetahui kondisi bawah permukaan Gunung Sinabung. Pemodelan numerik menggunakan VFSA telah dilakukan digunakan dalam bidang lain antara lain untuk pemodelan kegempaan, pemodelan cuaca, pemodelan tomografi sehingga memungkinkan juga untuk digunakan dalam pemodelan sumber tekanan ini (Chaoshu et al., 2008; Haerani et al., 2012., Grabito et al., 2006; Kumalasari et al., 2017., Kumalasari et al., 2018., Kumalasari et al., 2019., Kumalasari et al., 2020.).

METODE

Terdapat banyak model gunung api yang dapat digunakan untuk menganalisis faktor fisis dari gunung api antara lain adalah Model Mogi. Model Mogi (1958) mengasumsikan bahwa kerak bumi merupakan medium setengah elastik dan deformasi yang terjadi pada gunungapi disebabkan oleh sumber tekanan berupa bola magma yang terletak pada kedalaman tertentu. Apabila terjadi perubahan hidrostatik pada bola tersebut maka akan terjadi deformasi secara simetris. Dijelaskan dalam buku volcano deformation bahwa perubahan posisi suatu titik (displacement) di permukaan yang diakibatkan oleh perubahan tekanan hidrostatik di dalam rongga kerak bumi dengan radius lebih kecil dari kedalaman ($a \ll d$) dinyatakan dalam Persamaan model mogi sebagai berikut:

$$\begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} = \frac{P}{G} \begin{pmatrix} 1 - \frac{2\nu}{3} \\ \frac{2\nu}{3} \\ \frac{2\nu}{3} \end{pmatrix} \begin{matrix} \frac{x}{R^3} \\ \frac{y}{R^3} \\ \frac{z}{R^3} \end{matrix} \quad (1)$$

Dimana d adalah kedalaman sumber tekanan, r adalah jarak radial sumber tekanan terhadap titik pantau, V adalah perubahan volume sumber tekanan, ν adalah poisons ratio, G adalah shear modulus, dan P adalah perubahan tekanan. Yang secara grafik digambarkan sebagai berikut:

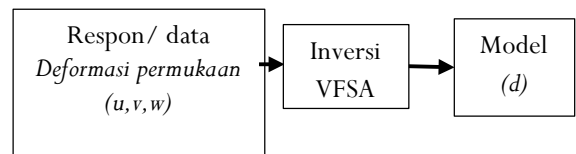


Gambar 1. Model Mogi

u, v, w adalah perubahan posisi pada titik $x, y, 0$ dan

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$ adalah jarak radial dari satu titik ke permukaan. Kecepatan *supply* magma ke dalam pusat tekanan dapat diestimasi dengan menggunakan hubungan antara volume permukaan yang terdeformasi dengan kecepatan *lava discharge*. Hubungan antara volume permukaan yang terdeformasi (V_{uplift}) dengan perubahan volume pada pusat tekanan ($V_{injection}$) (dinyatakan sebagai persamaan $V_{uplift} = 2(1 - \nu) V_{injection}$ Dengan adalah poissons's ratio (Fialko, 2001).

Dalam geofisika data yang diketahui dan diperoleh dari pengamatan pada umumnya adalah data lapangan, sedangkan pada umumnya sering dibutuhkan juga informasi parameter bawah permukaan sehingga diperlukan suatu metode untuk memperoleh parameter bawah permukaan dari respon yang di dapat pada lapangan, metode yang biasa digunakan adalah inversi. Menke (1984) mendefinisikan inversi sebagai suatu kesatuan metode matematika atau statistika untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai suatu sistem fisika berdasarkan data observasi dari sistim tersebut. Pada kasus gunung api data yang dimiliki adalah data deformasi permukaan sedangkan yang kita inginkan adalah model bawah permukaan berupa jari- jari magma chamber dan kedalaman magma chamber yang digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram iversi pada gunungapi Metode inversi non-linier ada dua pendekatan yaitu inversi non-linier pendekatan lokal dan inversi

non-linier pendekatan global. Salah satu metode inversi *non-linier* pendekatan global adalah *very fast simulated annealing* (VFSA). Metode VFSA pertamakali ditemukan oleh Ingber (1988) yang idenya memodifikasi metode *simulated annealing* (SA), modifikasi tersebut dilakukan karena pada SA pada ruang model, setiap parameter model mempunyai rentang batas yang berbeda dan setiap parameter model mungkin memiliki efek terhadap misfit atau fungsi obyektif ketika dikenai kondisi yang berbeda, serta algoritma SA belum cukup cepat untuk menghitung penentuan random Cauchy sebanyak parameter model (Sen dan Stoffa, 2013, Ingber, 1992).

VFSA adalah metode inversi non-linier pendekatan global yang mengadopsi peristiwa pembentukan kristal (annealing) dalam termodinamika, yang prosesnya yaitu pada awal pada saat temperature tinggi suatu material berbentuk cair, kemudian melalui proses pendinginan secara perlahan-lahan menyebabkan terbentuknya kristal yang berasosiasi dengan energi sistem yang minimum, sehingga VFSA membutuhkan prosedur penurunan temperatur tertentu yaitu dengan distribusi probabilitas Boltzman. Probabilitas Boltzman menyatakan hubungan antara probabilitas suatu sistem pada satu konfigurasi m dan temperatur T dengan energi E sebagai fungsi dari konfigurasi tersebut.

$$P(m) \propto \exp \frac{E(m)}{kT} \quad (2)$$

Dengan k adalah konstanta Boltzman yang memiliki nilai $k = 1$ dan m menyatakan model sebanyak M . Pada kasus inversi geofisika, konfigurasi suatu sistem diibaratkan sebagai parameter model m dan energi sebagai fungsi misfit (fungsi obyektif, E), sedangkan T adalah factor pengontrol. Berdasarkan persamaan (2) pertubasi konfigurasi sistem yang menghasilkan energi rendah maka model tersebut memiliki probabilitas terpilihnya lebih besar, namun pertubasi konfigurasi sistem yang menghasilkan energi tinggi masih dimungkinkan untuk terpilih (Probabilitas tidak nol). Ketika temperatur menurun, pertubasi konfigurasi sistem yang menghasilkan energi lebih rendah memiliki probabilitas makin besar, sedangkan pertubasi konfigurasi sistem yang menghasilkan energi lebih tinggi akan mempunyai probabilitas terpilih sebagai model terbaik semakin kecil. Pada saat T mendekati 0 maka akan terbentuk kristal yaitu ketika konfigurasi berenergi minimum. Jika proses pendinginan terlalu cepat maka kondisi

kesetimbangan dengan energi minimum tidak dapat dicapai sehingga membentuk kristal yang bersifat amorf atau cacat (Grandis, 2009).

Pada algoritma VFsa yang harus ditentukan terlebih dahulu adalah model awal (m^k) , dengan cara membangkitkan model secara random antara model minimum dan maksimum. Model minimum dan maksimum di dasarkan pada informasi 'prior' kondisi geologis di lapangan.

$$m_i^k = m_i^{\min} + r_1 (m_i^{\max} - m_i^{\min}) \quad (3)$$

Dimana $r_1 \in [0,1]$, kemudian model awal tersebut dicek dan harus berada diantara model maksimum dan minimum dengan i adalah model ke- i dan k adalah iterasi ke- k .

$$m_i^{\min} \quad m_i^k \quad m_i^{\max}$$

Kemudian dilakukan pencarian model selanjutnya yaitu m_i^{k+1}

$$m_i^{k+1} = m_i^k + y_i (m_i^{\max} - m_i^{\min}) \quad (4)$$

Dengan $y \in [0,1]$, nilai y didapat dari distribusi berikut:

$$g_T(y) = \frac{1}{\sum_{i=1}^M 2(|y_i| + T) \ln 1 + \frac{1}{T_i}} = \sum_{i=1}^M g_T^i(y_i) \quad (5)$$

Kemudian diperoleh probabilitas kumulatif sebagai berikut:

$$G_T(y) = \int_0^y \dots \int_0^{y^D} dy^1 \dots dy^M g_T(y) = \sum_{i=1}^M G_T^i(y_i) \quad (6)$$

$$G_T^i(y_i) = \frac{1}{2} + \frac{\text{sgn}(y_i)}{2} \frac{\ln 1 + \frac{|y_i|}{T_i}}{\ln 1 + \frac{1}{T_i}} \quad (7)$$

Sehingga diperoleh nilai y_i melalui pembangkitan bilangan random $u_i \in [0,1]$ dari distribusi yang seragam, sehingga persamaannya menjadi:

$$y_i = \text{sgn}(u_i - 0.5) T_i \left(1 + \frac{1}{T_i} \right)^{|2u_i - 1|} - 1 \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan diatas, Inger(1989) memperoleh aturan penggunaan temperatur sehingga distribusi dapat mencapai minimum global sebagai berikut:

$$T_{k+1}(k) = T_k \exp c_k k^{\frac{1}{M}} \quad (9)$$

Dimana T_k adalah temperatur sebelum dan T_{k+1} adalah temperatur setelahnya. Untuk iterasi pertama $T_k = T_{0k}$ dengan T_{0k} adalah temperatur awal untuk parameter model pada iterasi ke- k dan c_k adalah parameter untuk mengontrol penurunan temperatur dan membantu mempercepat pemilihan model yang konvergen pada kasus-kasus tertentu, nilai c_k biasanya bergantung pada kasus yang ditinjau, dalam penelitian ini ditetapkan nilai $c_k = 1$ pada seluruh iterasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data deformasi permukaan Gunung Sinabung dari bulan Agustus 2015 hingga September 2016, data tersebut kemudian dibagi menjadi 3 periode sebagai berikut:

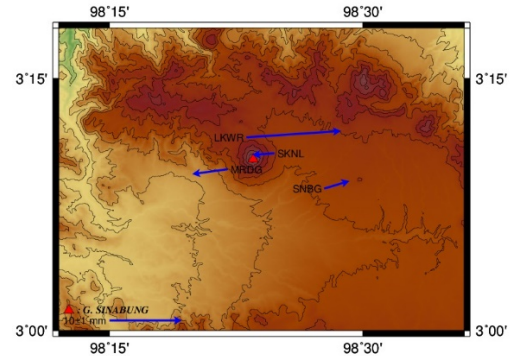
1. Periode 1 (15 Agustus 2015 – 20 Oktober 2015).
2. Periode 2 (21 Oktober 2015 – 20 Desember 2015).
3. Periode 3 (21 Desember 2015 – 10 September 2016).

Secara lengkap perubahan posisi pada setiap periode ditunjukkan pada Tabel 1.

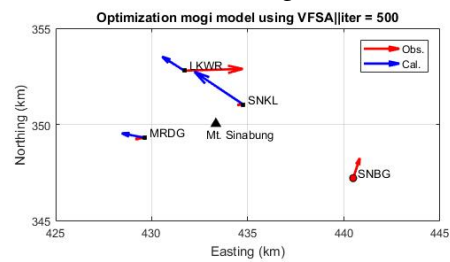
Dalam analisis data kita menggunakan Very Fast Simulated Annealing untuk masing-masing periode dengan menggunakan Model Mogi dan diperoleh pemodelan sebagai berikut:

1. Periode 1

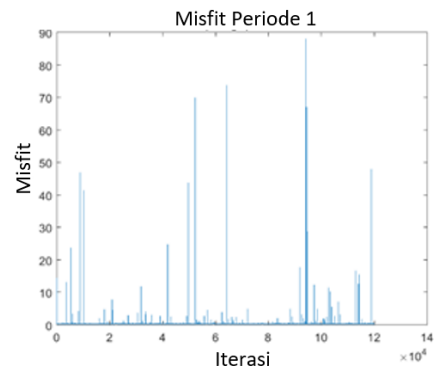
Hasil inversi pada periode 1 yaitu tanggal 15 Agustus 2015 hingga 20 Oktober 2015 ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Vektor Pergeseran Periode 1



Gambar 4. Hasil Inversi Periode 1



Gambar 5. Misfit Pada Periode 1

Tabel 1. Perubahan Posisi Setiap Periode

Periode	Stasiun	Koordinat			Displacement (m)			Standar Deviasi		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	LKWR	431687,15	352794,03	1496,45	0.02019	-0.00295	0.03814	0.01023	0.01515	0.03290
	SKNL	429637,51	349302,07	1186,16	0.00008	-0.00245	0.00121	0.00564	-0.01090	0.03153
	MRDG	434757,39	351034,54	1442,59	0.00289	-0.00371	0.00455	0.00856	0.01216	0.01790
	SNBGB	439697,06	347073,05	1220,60	-0.00152	0.00175	0.01632	0.00884	-0.01373	0.02796
2	LKWR	431687,15	352794,03	1496,45	-0.00877	0.00187	0.02100	0.02841	0.02492	0.06108
	SKNL	429637,51	3.9302,07	1186,16	0.00610	-0.00031	0.00557	0.00983	-0.01076	0.03483
	MRDG	434757,39	351034,54	1442,59	0.00180	-0.00211	0.01264	0.00445	0.01023	0.03647
	SNBGB	439697,06	347073,05	1220,60	0.00089	0.00670	-0.00085	0.01162	0.01151	0.03140
3	LKWR	431687,15	352794,03	1496,45	0.00203	0.00178	0.03424	0.01211	0.00940	0.03197
	MRDG	429637,51	349302,07	1186,16	-0.00075	0.00582	0.05210	0.00978	0.00876	0.03131
	SNBGB	439697,06	347003,05	1220,60	0.00016	0.00841	0.03749	0.01277	0.01121	0.03474

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada tabel 2 sebagai berikut:

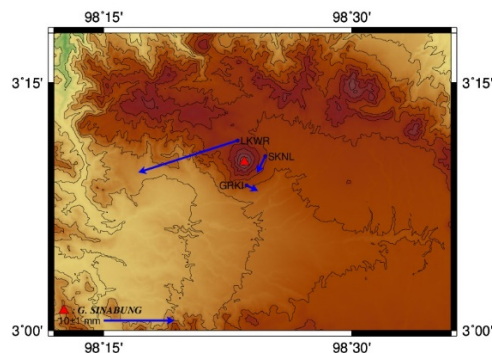
Tabel 2. Hasil Inversi Pada Periode 1

Model	Misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 1	0,323	236,62	0.09182	1495,41	424869,84	358233,04

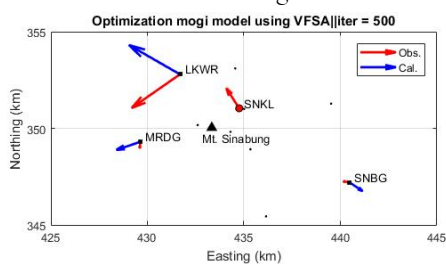
Pada Tabel 2 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 1495,41m dengan jari-jari 236,62m dan perubahan tekanan berniali positif yang menunjukkan adanya peningkatan volume sumber tekanan pada kantong magma.

2. Periode 2

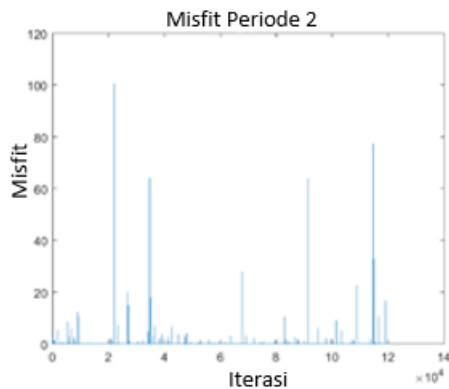
Hasil inversi pada periode 2 yaitu tanggal 21 Oktober 2015 hingga 20 Desember 2015 ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8.



Gambar 6. Vektor Pergeseran Periode 2



Gambar 7. Hasil Inversi Periode 2



Gambar 8. Misfit Pada Periode 2

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada tabel 3 sebagai berikut:

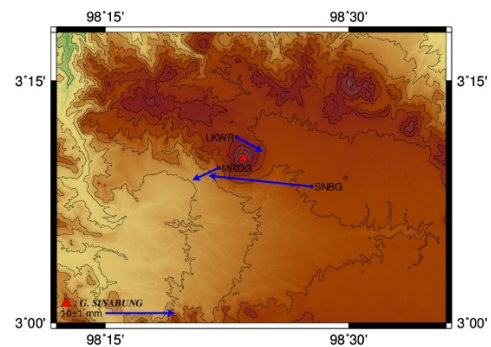
Tabel 3. Hasil Inversi Pada Periode 2

Model	Misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 2	0.0478	346,48	-0.00832	1437,99	441144,12	351904,52

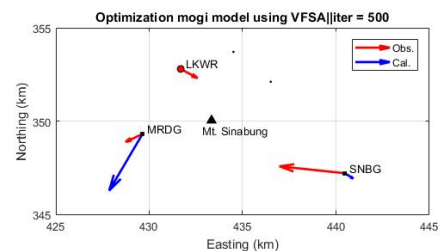
Pada Tabel 3 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 1437,99m dengan jari-jari 346,48m dan perubahan tekanan berniali positif yang menunjukkan adanya peningkatan volume sumber tekanan pada kantong magma.

3. Periode 3

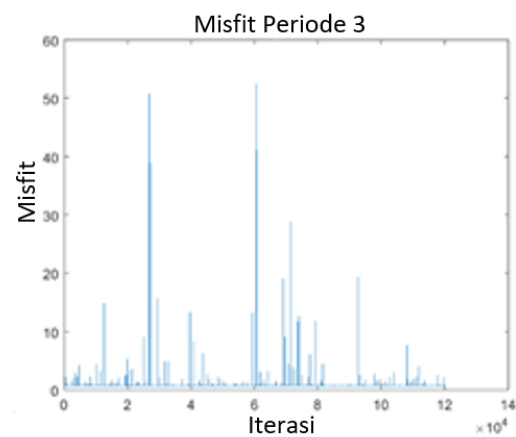
Hasil inversi pada periode 3 yaitu tanggal 20 Desember 2015 hingga 10 September 2016 ditunjukkan pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11.



Gambar 9. Vektor Pergeseran Periode 3



Gambar 10. Hasil Inversi Periode 3



Gambar 11. Misfit Pada Periode 3

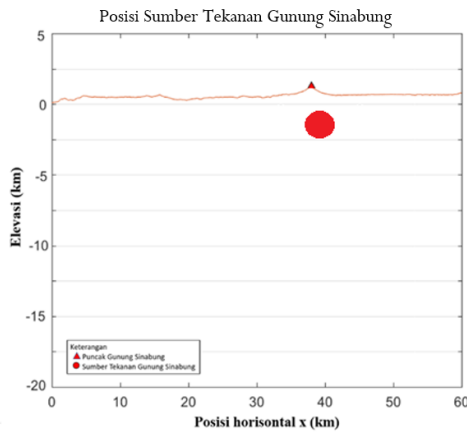
Dengan hasil inversi ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Inversi Pada Periode 3

Model	misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 3	0.6617	351,08	-0.00124	502,841	439342,66	349811,79

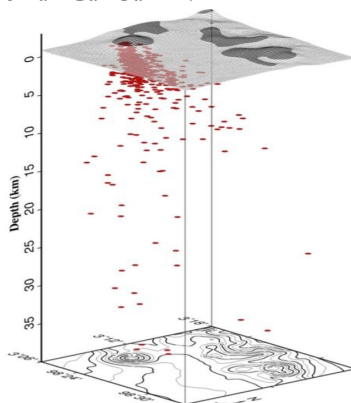
Pada Tabel 4 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 5028,41m dengan jari-jari 351,08m dan perubahan tekanan bernilai negatif yang menunjukkan adanya penurunan volume sumber tekanan pada kantong magma.

Berdasarkan ketiga data hasil inversi dari periode 1 sampai 3 menunjukkan bahwa adanya tekanan kantong magma yang sangat dangkal yaitu berada pada kedalaman 0,5km hingga 1,5km dibawah Gunung Sinabung seperti ditunjukkan pada Gambar 12.

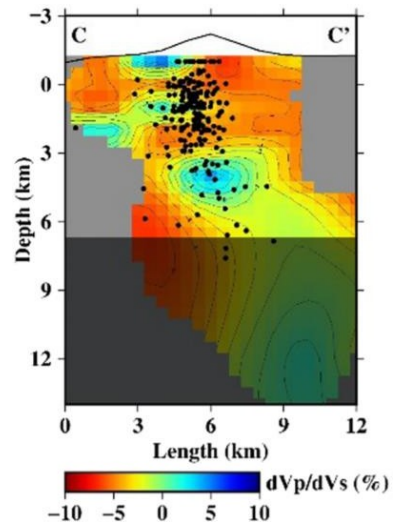


Gambar 12. Posisi Sumber Tekanan Gunung Sinabung

Hasil inversi tersebut sesuai dengan hasil pemodelan relokasi hiposenter kegempaan yang dilakukan oleh Indrastuti (2015) bahwa adanya gejala seismik yang terjadi pada kedalaman dangkal yang ditunjukkan pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13. Hiposenter kegempaan pada Gunung Sinabung (Indrastuti, 2015)



Gambar 14. Relokasi Kegempaan Gunung Sinabung (Indrastuti, 2015)

Pada Gambar 13. Ditunjukkan bahwa hiposenter kegempaan hasil pemodelan oleh Indrastuti terkonsentrasi pada kedalaman 0-5km yang menunjukkan adanya aktivitas kegempaan yang tinggi pada kedalaman tersebut. Dengan adanya sumber tekanan yang dangkal tersebut memungkinkan juga terjadinya pengisian kantong magma yang lebih cepat dan erupsi kemudian membentuk kubah lava kembali yang ditunjukkan juga dengan adanya perubahan tekanan dari periode 1 dan periode 2 menunjukkan bahwa ada peningkatan tekanan yang artinya terjadi inflasi pada tubuh Gunung Sinabung dan pada periode 3 terjadi penurunan tekanan yang menunjukkan terjadinya deflasi pada tubuh Gunung Sinabung.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pemodelan numerik sumber tekanan pada Gunung Sinabung dengan menggunakan metode Very Fast Simulated Annealing (VFSA) serta mengelaborasi dengan data kegempaan dan geologi diperoleh kedalaman sumber tekanan Gunung Sinabung pada tahun 2015 hingga 2016 berada pada kedalaman dangkal yaitu antara 0,5km hingga 1,5 km yang menyebabkan erupsi pada Gunung Sinabung yang ditunjukkan pula melalui kenaikan perubahan tekanan yang menyebabkan inflasi pada tubuh Gunung Sinabung dan penurunan perubahan tekanan yang menyebabkan deflasi pada tubuh Gunung Sinabung.

DAFTAR PUSTAKA

Chaoshu, Hu., Stoffa, P., McIntosh, K. 2008. *First Arrival Stochastic Tomography: Automatic Background Velocity Estimation Using Beam Splines and VFSA*. Geophysical Research Letters, Volume 35 Issue 23.

- Gunawan, H., Budianto, A., Prambada, O., McCausland, W., Pallister, J., & Iguchi, M. 2017. *Overview of the eruptions of Sinabung eruption, 2010 and 2013–present and details of the 2013 phreatomagmatic phase*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 382, 15 September 2019, Pages 103-119.
- Grandis, Hendra. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geologi Indonesia (HAGI).
- Haerani, N., Basuki, A., Suparman, Y., Primulyana, S., Prambada, O., Loeqman, A., & Ohkura, T. 2012. *Evaluation of volcanic activity at Sinabung volcano, after more than 400 years of quiet*. Journal of Disaster Research, 7(1), 37.
- Indrastuti, N., Nugraha, A, D., Gunawan, H., McCausland, W. 2017. *3-D Seismic Tomographic study of Sinabung Volcano, Northern Sumatra, Indonesia, during the inter-eruptive period October 2010 - July 2013*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 382, 15 September 2019, Pages 197-209.
- Ingber, L. 1989. *Very Fast Simulated Re-Annealing*. Math Comput Modelling. Vol 12 No. 8, pp. 967-973.
- Ingber, L., & Rosen, B. 1992. *Genetic algorithms and very fast simulated reannealing: a comparison*. Journal of Mathematical Computation and Modelling, 16:87–100.
- Kumalasari, R., Srigutomo, W., Djamal, M., Meilano, I., & Gunawan, H. 2018. *Location of Sinabung volcano magma chamber on 2013 using levenberg-marquardt inversion scheme*. Journal of Physics: Conference Series, 1013(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1013/1/012182>
- Kumalasari, R., Srigutomo, W., Djamal, M., Meilano, I., Evita, M., & Gunawan, H. 2019. *Location of Sinabung volcano magma chamber on 2013 using simulated annealing inversion scheme*. Journal of Physics: Conference Series, 1321(3). <https://doi.org/10.1088/17426596/1321/3/032120>
- Kumalasari, R., Srigutomo, W., Meilano, I., & Gunawan, H. 2020. *Numerical Modeling Of Pressure Source Of Sinabung Volcano Based On GPS Data In 2011-2012 Using Particle Swarm Optimization (PSO)*. Computational and Experimental Research in Materials and Renewable Energy (CERiMRE) Volume3, Issue2, page 30-36 eISSN : 2747-173X.
- Mogi, K. 1958. *Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces around them*. Bulletin of the Earthquake.
- Garabito, G., Cruz. J. C., & Hubral, P. 2006. *Application of SA and VFSA Global Optimization Algorithms for Search of the 2D CRS Stacking Parameters*. Annual WIT report 2006
- Research Institute, 36, 99–134. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG). 2010. *Data Dasar Gunung Api di Indonesia*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG).
- Sen & Stoffa. 2013. *A Very Fast Simulates Annealing (VFSA) Approach for Joint Objective Optimization*. Geophysics 74(6), WCB47-WCB55.