

DINAMIKA SUMBER TEKANAN GUNUNG SINABUNG PADA AWAL PERIODE ERUPSI DENGAN SKEMA INVERSI VERY FAST SIMULATED ANNEALING (VFSA)

Ratih Kumalasari*

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

*email: ratih.kumalasari@dsn.ubharajaya.ac.id

ABSTRAK

Gunung Sinabung semenjak tahun 1600 hingga tahun 2010 tidak pernah mengalami erupsi, namun semenjak 27 Agustus 2010 hingga saat ini (2025) gunung sinabung terus mengalami erupsi hampir setiap hari. Hal tersebut menjadikan pertanyaan apa yang terjadi pada awal periode erusi gunung tersebut. Dinamika sumber tekanan Gunung Sinabung pada awal periode erupsi telah dianalisis dengan pendekatan skema inversi yang bertujuan untuk memahami mekanisme internal yang memicu aktivitas vulkanik. Dari data GPS menunjukkan beberapa kelurusan data deformasi dan diperoleh 5 periode pada awal erupsi pada tahun 2011-2012. Dari hasil inversi menggunakan model Mogi dengan skema very fast simulated annealing (VFSA) diperoleh adanya kantong magma dalam pada kedalaman 17km dan kantong magma dangkal pada kedalaman 0,5km. Hasil analisis menunjukkan adanya pergeseran sumber tekanan yang signifikan dari kedalaman menengah menuju permukaan seiring dengan meningkatnya aktivitas erupsi yang terjadi.

Kata Kunci: Gunung Sinabung; Inversi; VFSA; GPS; Sumber Tekanan

ABSTRACT

[Title: Dynamic of the pressure source of Sinabung Volcano in the early eruption using inversion scheme] Sinabung volcano remained dormant from the 1600s until 2010. However, beginning on August 27, 2010, the volcano has been erupting almost continuously up to the present day (2025). This situation prompts an important question what triggered the initial phase of its renewed volcanic activity. The dynamics of the pressure source at Sinabung Volcano during the early eruption period were analyzed using an inversion scheme approach to better understand the internal mechanisms driving volcanic activity. GPS data revealed several alignments in surface deformation, identifying five distinct periods of activity in the early eruption phase between 2011 and 2012. Inversion results using the Mogi model with the Very Fast Simulated Annealing (VFSA) scheme indicated the presence of a deep magma chamber at a depth of 17 km and a shallow chamber at a depth of 0.5 km. The analysis results suggest a significant shift in the pressure source from intermediate depths toward the surface, in line with the increasing eruptive activity observed.

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

PENDAHULUAN

Gunung Sinabung, yang terletak di Provinsi Sumatera Utara, merupakan salah satu gunung api aktif di Indonesia. Sebelum tahun 2010, berdasarkan klasifikasi dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Gunung Sinabung termasuk dalam kategori gunung api tipe B, yakni gunung api yang tidak tercatat mengalami erupsi sejak tahun 1600. Namun, setelah terjadi erupsi pertama kalinya pada tahun 2010, statusnya diubah menjadi gunung api tipe A karena menunjukkan

aktivitas vulkanik yang terus-menerus hingga kini (PVMBG, 2010; Gunawan, 2017). Perubahan klasifikasi ini mencerminkan peningkatan signifikan dalam aktivitas vulkanik gunung tersebut, yang juga didukung oleh analisis geofisika dan geokimia yang menunjukkan adanya suplai magma baru dari kedalaman (Syahbana et al., 2014; Nakada et al., 2016).

Menjelang hingga sesaat setelah terjadinya erupsi, gunung api umumnya menunjukkan berbagai perubahan aktivitas, seperti

meningkatnya frekuensi gempa vulkanik, naiknya temperatur dan emisi gas, serta terjadinya deformasi pada permukaan gunung. Untuk memantau dinamika tersebut, salah satu metode yang digunakan adalah pengamatan deformasi permukaan melalui teknologi Global Positioning System (GPS). Data deformasi yang diperoleh dari GPS dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan pemodelan numerik guna mengungkap kondisi struktur bawah permukaan gunung. Salah satu metode numerik yang efektif untuk analisis ini adalah Very Fast Simulated Annealing (VFSA), yang sebelumnya telah berhasil diterapkan dalam berbagai studi seperti pemodelan seismik, tomografi, dan prediksi cuaca (Chaoshu et al., 2008; Grabito et al., 2006; Haerani et al., 2012). Penggunaan VFSA dalam konteks vulkanologi, khususnya untuk memodelkan sumber tekanan di Gunung Sinabung, menjadi sangat relevan mengingat kemampuannya dalam menangani data kompleks secara efisien (Kumalasari et al., 2017; Yulianti et al., 2021; Pribadi et al., 2023).

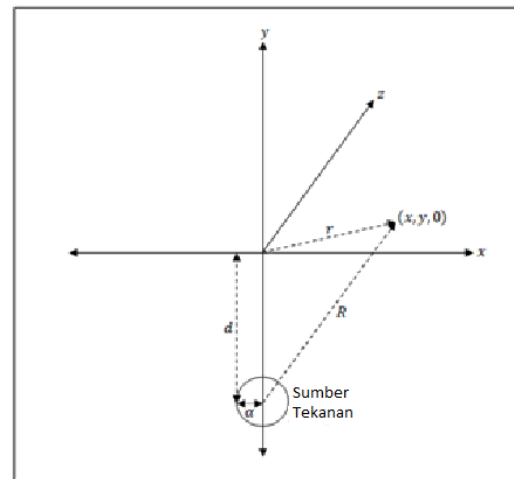
METODE

Beragam model telah dikembangkan untuk menganalisis aspek fisis dari aktivitas gunung api, salah satunya adalah model Mogi. Model ini, yang pertama kali diperkenalkan oleh Mogi pada tahun 1958, berlandaskan asumsi bahwa kerak bumi bertindak sebagai media elastis setengah ruang, dan deformasi yang diamati di permukaan gunung api berasal dari tekanan yang ditimbulkan oleh sebuah sumber berbentuk bola (magma chamber) yang terletak pada kedalaman tertentu. Ketika terjadi perubahan tekanan hidrostatik di dalam rongga magma ini, maka akan timbul deformasi permukaan secara simetris terhadap lokasi sumber. Konsep ini banyak digunakan dalam studi deformasi vulkanik karena kesederhanaannya dan kemampuannya merepresentasikan respons permukaan terhadap tekanan internal (Dzurisin, 2007; Segall, 2010). Dalam konteks ini, perubahan posisi titik-titik di permukaan bumi akibat tekanan dari rongga magma yang memiliki jari-jari lebih kecil daripada kedalamannya dapat dihitung menggunakan persamaan analitik dari model Mogi (Fialko et al.,

2001; Costa et al., 2006). Secara matematis dapat digambarkan dalam persamaan berikut:

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

Dimana d adalah kedalaman sumber tekanan dengan satuan m, r adalah jarak radial sumber tekanan terhadap titik pantau dengan satuan meter, ΔV adalah perubahan volume sumber tekanan dengan satuan m^3 , ν adalah poisons ratio, G adalah shear modulus, dan ΔP adalah perubahan tekanan. Yang secara grafik digambarkan dalam Gambar 1 berikut:



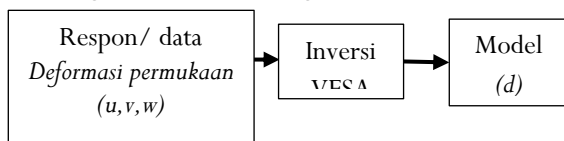
Gambar 1. Model Mogi

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 (ΔV_{uplift}) dengan perubahan volume pada pusat tekanan ($\Delta V_{injection}$) (dinyatakan sebagai persamaan $\Delta V_{uplift} = 2(1-\nu)\Delta V_{injection}$ Dengan ν adalah poisons's ratio (Fialko, 2001).

Dalam bidang geofisika, informasi yang tersedia umumnya berasal dari hasil pengukuran langsung di lapangan, seperti data deformasi atau gelombang seismik. Namun, untuk memahami kondisi bawah permukaan yang tidak dapat diamati

secara langsung, diperlukan pendekatan khusus guna memperkirakan parameter-parameter fisis di bawah permukaan berdasarkan data pengamatan tersebut. Salah satu pendekatan yang sering digunakan adalah metode inversi. Menurut Menke (1984), inversi merupakan kumpulan teknik matematis atau statistik yang bertujuan memperoleh informasi fisis dari suatu sistem berdasarkan data hasil observasi. Dalam konteks penelitian vulkanologi, data yang tersedia biasanya berupa deformasi permukaan gunung api, sedangkan informasi yang dicari mencakup parameter struktur bawah permukaan seperti radius dan kedalaman ruang magma (magma chamber). Metode inversi telah terbukti efektif dalam berbagai studi gunung api untuk memetakan struktur internal berdasarkan perubahan deformasi di permukaan (Zhang et al., 2016; McTigue et al., 2014).



Gambar 2. Diagram inversi pada gunungapi

Dalam metode inversi non-linier, terdapat dua pendekatan utama yang sering digunakan, yaitu pendekatan lokal dan pendekatan global. Salah satu metode populer dalam kategori pendekatan global adalah Very Fast Simulated Annealing (VFSA). VFSA pertama kali diperkenalkan oleh Ingber pada tahun 1988 sebagai pengembangan dari metode Simulated Annealing (SA). Pengembangan ini dilakukan karena metode SA memiliki beberapa keterbatasan, terutama terkait perbedaan rentang nilai setiap parameter model dalam ruang model, serta pengaruh masing-masing parameter terhadap fungsi objektif yang bisa berbeda tergantung pada kondisi yang diterapkan. Selain itu, algoritma SA tradisional dianggap kurang efisien dalam melakukan sampling acak dengan distribusi Cauchy untuk sejumlah besar parameter model. Oleh karena itu, VFSA dirancang untuk mempercepat proses optimasi tanpa mengorbankan kemampuan eksplorasi ruang model yang luas (Ingber, 1988; Ingber, 1992; Sen & Stoffa, 2013).

Very Fast Simulated Annealing (VFSA) merupakan salah satu metode inversi non-linier pendekatan global yang terinspirasi dari proses annealing dalam termodinamika, yaitu mekanisme pembentukan kristal pada material. Dalam proses ini, suatu material berada dalam fase cair pada suhu tinggi, kemudian mengalami pendinginan secara bertahap dan perlahan hingga terbentuk struktur kristal yang stabil, yang diasosiasikan dengan kondisi energi

minimum sistem. Proses ini dianalogikan dalam VFSA untuk menemukan solusi optimal dari suatu permasalahan inversi, dengan menurunkan temperatur secara sistematis. Penurunan temperatur tersebut mengikuti distribusi probabilitas Boltzmann, yang mendeskripsikan hubungan antara probabilitas sistem berada dalam konfigurasi tertentu dan suhu, di mana energi menjadi fungsi dari konfigurasi tersebut (Ingber, 1989; Kirkpatrick et al., 1983; Sen & Stoffa, 2013). Formulasi untuk VFSA ditunjukkan pada persamaan 2 berikut:

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

Dengan k adalah konstanta Boltzman yang memiliki nilai $k = 1$ dan m menyatakan model sebanyak M . Dalam penerapan inversi geofisika, konfigurasi suatu sistem dapat diartikan sebagai parameter model mmm, sementara energi sistem direpresentasikan oleh fungsi misfit atau fungsi objektif, dan temperatur (T) bertindak sebagai faktor pengontrol dalam proses optimasi. Berdasarkan prinsip distribusi probabilitas Boltzmann, perubahan (perturbasi) pada konfigurasi yang menghasilkan energi lebih rendah akan memiliki peluang lebih tinggi untuk terpilih sebagai solusi model. Namun, konfigurasi yang menghasilkan energi tinggi tetap memiliki peluang untuk dipilih, meskipun lebih kecil (probabilitas tidak nol), guna mencegah terjebak pada solusi lokal. Seiring menurunnya nilai temperatur, probabilitas memilih model berenergi rendah meningkat, sedangkan peluang bagi model berenergi tinggi menurun. Saat suhu mendekati nol, sistem cenderung mencapai konfigurasi dengan energi minimum, menyerupai proses pembentukan kristal sempurna. Sebaliknya, jika proses pendinginan dilakukan terlalu cepat, sistem tidak mencapai kondisi kesetimbangan termal dan kemungkinan terbentuk kristal amorf atau cacat pun meningkat (Grandis, 2009; Ingber, 1989; Sen & Stoffa, 2013).

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 awal kondisi geologis di lapangan. dengan persamaan awal pemodelan:

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

Dimana $r_i \in [0,1]$, 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 dengan persamaan:

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

Kemudian dilakukan pencarian model selanjutnya yaitu m_1^{k+1}

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

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

$$g_T(y) = \prod_{i=1}^M \frac{1}{2(|y_i| + T_i) \ln\left(1 + \frac{1}{T_i}\right)} = \prod_{i=1}^M g_T(y_i) \tag{5}$$

Kemudian diperoleh probabilitas kumulatif sebagai berikut:

$$G_T(y) = \int_{-1}^{y^1} \dots \int_{-1}^{y^M} dy^1 \dots dy^M g_T(y^i) = \prod_{i=1}^M G_T^i(y_i) \tag{6}$$

$$G_T^i(y_i) = \frac{1}{2} + \frac{\text{sgn}(y_i)}{2} \frac{\ln\left[1 + \frac{|y_i|}{T_i}\right]}{\ln\left[1 + \frac{1}{T_i}\right]} \tag{7}$$

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

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

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

$$T_{k+1}(k) = T_k \exp\left(-c_k k^{\frac{1}{M}}\right) \tag{9}$$

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

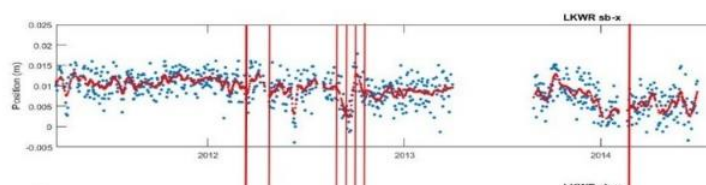
Penentuan periode erupsi pada Gunung Sinabung didasarkan pada data kelurusan grafik hasil deformasi permukaan yang diperoleh dari data GPS dari masing-masing stasiun GPS. Dengan koordinat dari masing-masing stasiun GPS ditunjukkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Koordinat stasiun GPS

Nama Stasiun	Lintang	Bujur	Elevasi (meter)
	3.146363	98.39404	1230.296
GRKI	8562	15603	48
	3.191620	98.38515	1496.434
LKWR	4445	51382	97
	3.160019	98.36672	1186.129
MRDG	1196	80919	12
	3.621607	98.71471	
SAMP	6487	72580	1.68352
	3.175719	98.41279	1442.573
SKNL	3989	66025	97
SNBG-A (sebelum pindah)	3.141072	98.46429	1248.579
	1553	09206	06
SNBG-B (setelah pindah)	3.139905	98.45727	1220.604
	7205	15202	56

Data dari masing-masing stasiun GPS tersebut kemudian direfrensikan terhadap ITRF 2008 dan diperoleh grafik kelurusan perpindahan yang ditunjukkan pada Gambar 3 Berdasarkan analisis kelurusan *trend* pada grafik *displacement time series* tersebut diperoleh periode awal erupsi gunung Sinabung sebagai berikut:

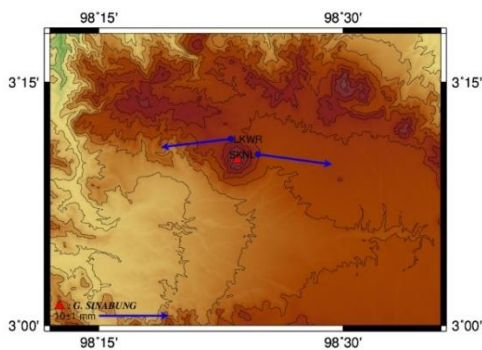
1. Periode 1 (1 April 2011 – 11 Maret 2012).
2. Periode 2 (12 Maret 2012 – 13 April 2012).
3. Periode 3 (14 April 2012 – 26 Agustus 2012).
4. Periode 4 (27 Agustus 2012 – 29 Septmeber 2012).
5. Periode 5 (30 September 2012 – 14 Oktober 2012).



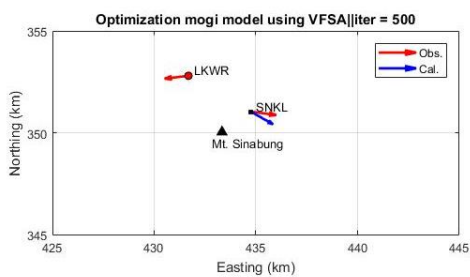
Gambar 3. Plot pembagian periode berdasarkan kelurusan time series

1. Periode 1

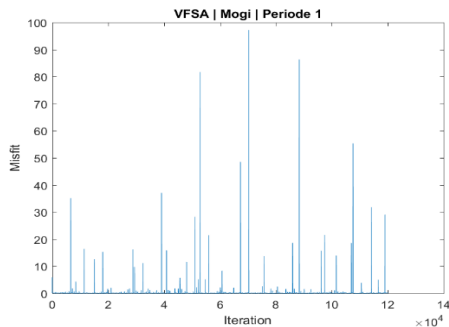
Hasil inversi pada periode 1 yaitu tanggal (1 April 2011 – 11 Maret 2012, ditunjukkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6.



Gambar 4. Vektor Pergeseran Periode 1



Gambar 5. Hasil Inversi Periode 1



Gambar 6. Misfit Pada Periode 1

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada tabel 2 sebagai berikut:

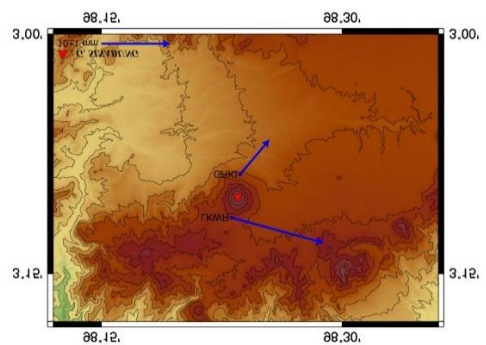
Tabel 2. Hasil Inversi Pada Periode 1

Model	Misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 1	0.0300	559.53	0.094	25798.22	449990.29	345581.77

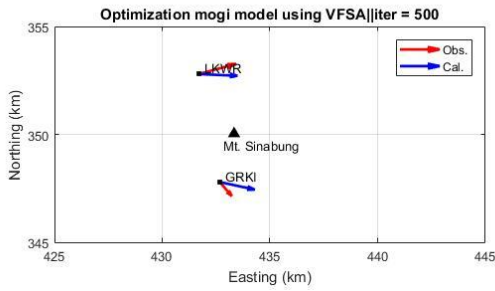
Pada Tabel 2 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 25798,41 *m* dengan jari-jari 559,53 *m* dan perubahan tekanan berniali positif yang menunjukkan adanya peningkatan volume sumber tekanan pada kantong magma.

2. Periode 2

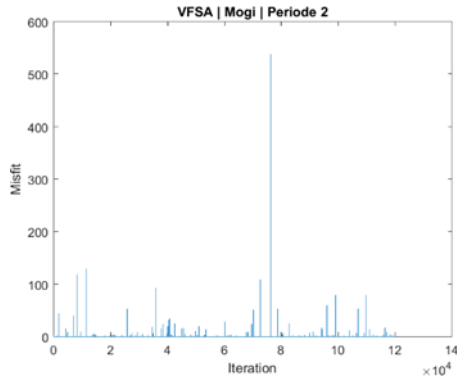
Hasil inversi pada periode 2 yaitu tanggal 12 Maret 2012 – 13 April 2012, ditunjukkan pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9.



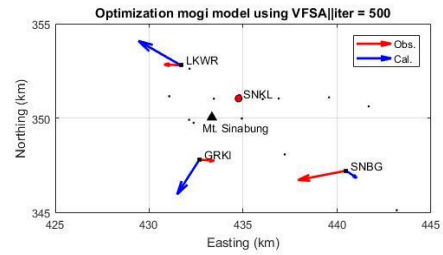
Gambar 7. Vektor Pergeseran Periode 2



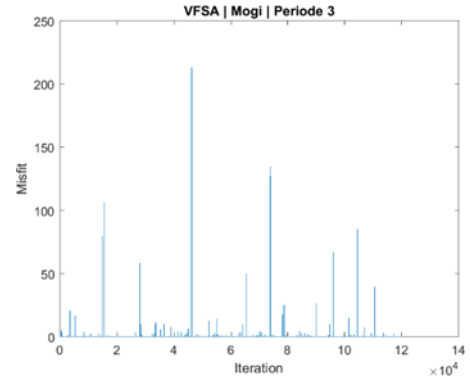
Gambar 8. Hasil Inversi Periode 2



Gambar 9. Misfit Pada Periode 2



Gambar 11. Hasil Inversi Periode 3



Gambar 12. Misfit Pada Periode 3

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada tabel 3 sebagai berikut:

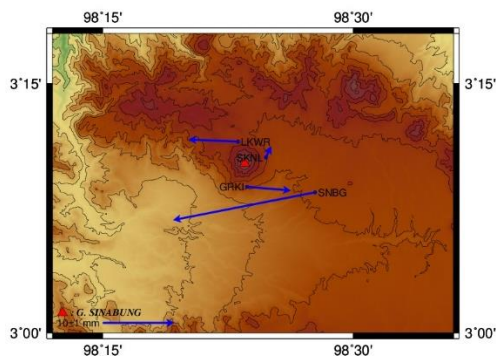
Tabel 3. Hasil Inversi Pada Periode 2

Model	Misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 2	0.43599	200.11	0.01	1288.76	420000.18	347997.37

Pada Tabel 3 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 1288,76 m dengan jari-jari 200,11 m dan perubahan tekanan bernilai positif yang menunjukkan adanya peningkatan volume sumber tekanan pada kantong magma.

3. Periode 3

Hasil inversi pada periode 3 yaitu 14 April 2012 – 26 Agustus 2012, ditunjukkan pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12.



Gambar 10. Vektor Pergeseran Periode 3

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut:

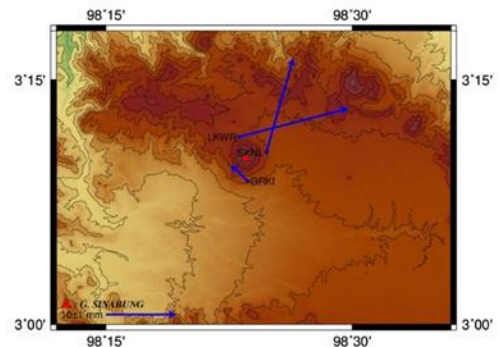
Tabel 4. Hasil Inversi Pada Periode 3

Model	misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 3	0.15368	310.50	0.01	563.67	427288.66	354925.07

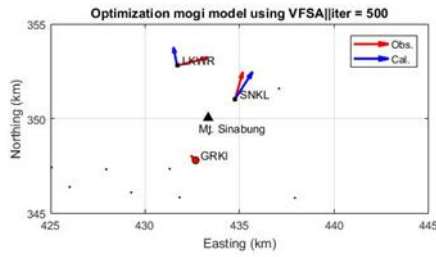
Pada Tabel 4 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 563,67 m dengan jari-jari 310,50 m dan perubahan tekanan bernilai negatif yang menunjukkan adanya penurunan volume sumber tekanan pada kantong magma.

4. Periode 4

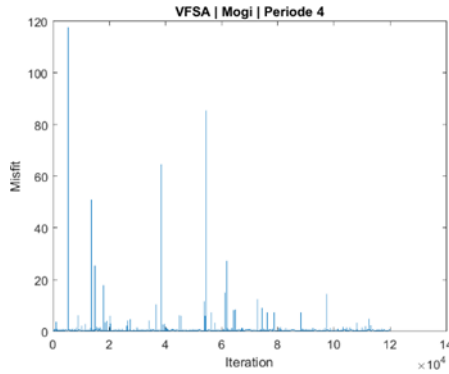
Hasil inversi pada periode 4 yaitu tanggal 27 Agustus 2012 – 29 Septmeber 2012, ditunjukkan pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.



Gambar 13. Vektor Pergeseran Periode 4



Gambar 14. Hasil Inversi Periode 4



Gambar 15. Misfit Pada Periode 4

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada Tabel 5 sebagai berikut:

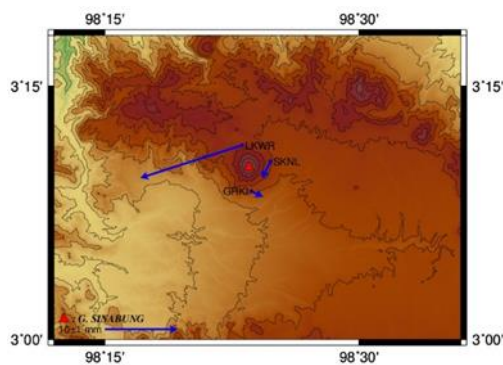
Tabel 5. Hasil Inversi Pada Periode 4

Model	misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 3	0.36	1267.32	0.01	33391.02	430366.19	351607.82

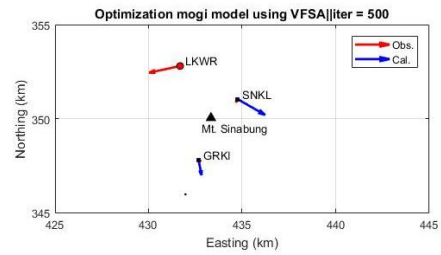
Pada Tabel 5 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 33391,02 m dengan jari-jari 1267,32 m dan perubahan tekanan bernilai negatif yang menunjukkan adanya penurunan volume sumber tekanan pada kantong magma.

5. Periode 5

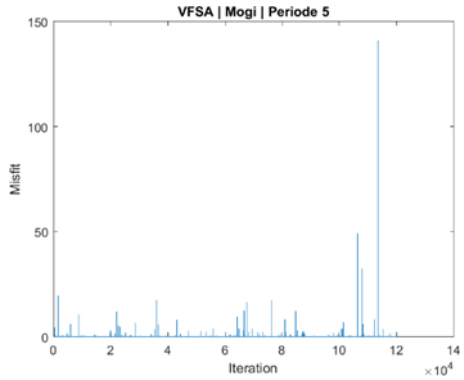
Hasil inversi pada periode 5 yaitu tanggal 20 Desember 2015 hingga 10 September 2016 ditunjukkan pada Gambar 16, Gambar 17, dan Gambar 18.



Gambar 16. Vektor Pergeseran Periode 5



Gambar 17. Hasil Inversi Periode 5



Gambar 18. Misfit Pada Periode 5

Dengan hasil inversi ditunjukkan pada Tabel 6 sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Inversi Pada Periode 5

Model	misfit	a(m)	deltaP/G	d(m)	x(m)	y(m)
Periode 3	0.03	538.08	0.04	17203.12	433864.80	354245.37

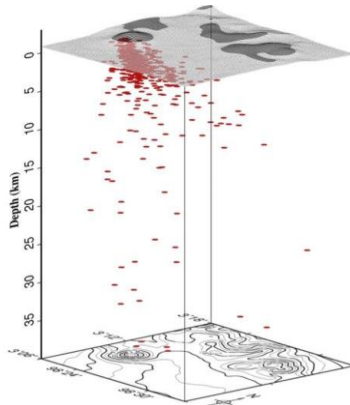
Pada Tabel 4 diketahui kedalaman sumber tekanan berada pada kedalaman 17203,12 m dengan jari-jari 538,08 m dan perubahan tekanan bernilai negatif yang menunjukkan adanya penurunan volume sumber tekanan pada kantong magma.

Berdasarkan kelima data hasil inversi dari periode 1 sampai 5 menunjukkan bahwa adanya tekanan kantong magma yang sangat dangkal yaitu berada pada kedalaman 0,5 km hingga 1 km yang terlihat pada periode 2 dan periode 3, serta adanya suplai dari kantong magma dalam yang terlihat pada periode 5, serta memungkinkan adanya dorongan dari partial melting pada kedalaman diatas 25 km yang terlihat dari periode 1 dan 4 dibawah Gunung dengan data rekap kedalaman dan jari-jari ditunjukkan pada Tabel 7.

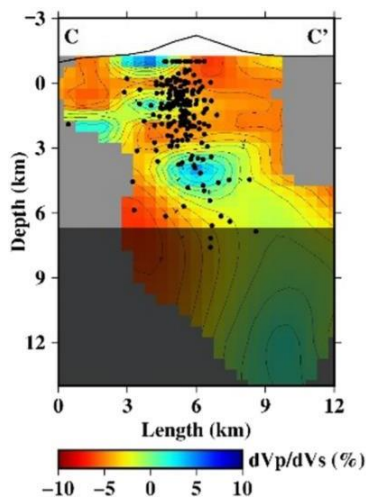
Tabel 7. Kedalaman dan jari-jari setiap periode

Periode	Jari-jari (m)	Kedalaman (m)
1	559.53	25798.22
2	200.11	1288.76
3	310.50	563.67
4	1267.32	33391.02
5	538.08	17203.12

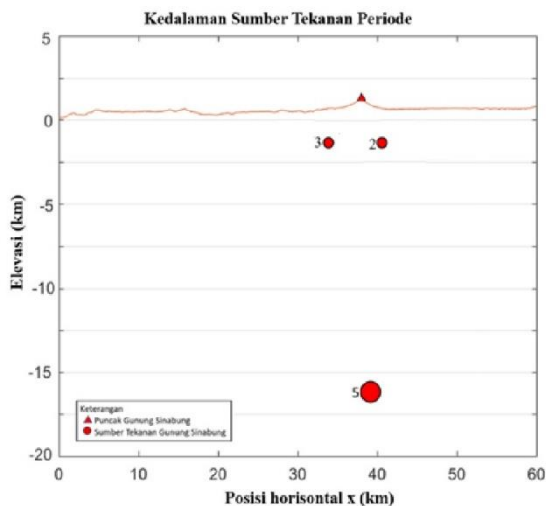
Hasil inversi tersebut sesuai dengan hasil pemodelan relokasi hiposenter kegempaan yang dilakukan oleh Indrastuti (2015) bahwa adanya gejala seismik yang terjadi pada kedalaman dangkal yang ditunjukkan pada Gambar 19 dan Gambar 20.



Gambar 19. Hiposenter kegempaan pada Gunung Sinabung (Indrastuti, 2015)



Gambar 20. Relokasi Kegempaan Gunung Sinabung (Indrastuti, 2015)



Gambar 21. Posisi Sumber Tekanan Gunung Sinabung hasil inversi

Pada Gambar 19 terlihat bahwa hasil pemodelan oleh Indrastuti menunjukkan sebaran hiposenter gempa terkonsentrasi pada kedalaman antara 0 hingga 5 km. Konsentrasi ini mengindikasikan tingginya aktivitas seismik pada zona dangkal tersebut. Keberadaan sumber tekanan pada kedalaman yang relatif dangkal ini juga berpotensi mempercepat proses pengisian kantong magma, yang pada akhirnya dapat memicu terjadinya erupsi serta pembentukan kembali kubah lava. Dari hasil elaborasi data inversi dan data relokasi kegempaan maka digambarkan pada Gambar 21 diperoleh adanya sumber tekanan dalam yang berada pada kedalaman 17 km dari hasil inversi periode ke 5 yang memberikan tekanan pada kantong magma dangkal pada kedalaman 0,5 km- 1 km yang diperoleh dari inversi pada periode 2 dan 3. Sedangkan berdasar periode 1 dan 4 menunjukkan adanya sumber tekanan yang sangat dalam yaitu pada kedalaman >25 km yang memungkinkan adanya dorongan ke kantong magma yang berasal dari *partial melting*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil inversi data permukaan pada Gunung Sinabung pada awal erupsi pada tanggal 1 April 2011 sampai 24 Oktober 2012 serta mengelaborasi dengan data kegempaan dan geologi diperoleh kedalaman sumber tekanan Gunung Sinabung maka diketahui adanya kantong magma dalam yang berada pada kedalaman 17 km yang memungkinkan adanya support magma bagi kantong magma dangkal pada kedalaman 0,5 km- 1 km yang terus menyebabkan adanya inflasi pada Gunung Sinabung, dan menyebabkan terjadinya erupsi terus menerus pada Gunung Sinabung.

DAFTAR PUSTAKA

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

Chaoshu, T., et al. 2008. "Application of VFSA in geophysical inversion." Geophysical Journal International, 172(1), 251–263. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03619.x>

Costa, A., Marti, J., & Cary, A. 2006. "Numerical simulation of magma intrusion: Implications for edifice failure." Journal of Volcanology and Geothermal Research, 158(1–2), 112–132. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2>

- 006.05.002
- Dzurisin, D. 2007. *Volcano Deformation: Geodetic Monitoring Techniques*. Springer Praxis Books.
- Fialko, Y., Khazan, Y., & Simons, M. 2001. "Deformation due to a pressurized ellipsoidal cavity in an elastic half-space, with applications to volcano geodesy." *Geophysical Journal International*, 146(1), 181–190. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2001.00452.x>
- 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
- Grabito, M. E., et al. 2006. "Use of Very Fast Simulated Annealing for tomographic inversion." *Geophysics*, 71(6), R61–R69.
- Grandis, H. 2009. *Very Fast Simulated Annealing untuk Inversi Geofisika*. Institut Teknologi Bandung.
- Grandis, Hendra. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geologi Indonesia (HAGI).
- Gunawan, H. 2017. *Evaluasi Aktivitas Gunung Api di Indonesia*. Bandung: PVMBG.
- 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.
- 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.
- Haerani, N., et al. 2012. "Penerapan Metode VFSA untuk Pemodelan Sumber Gempa di Sulawesi." *Jurnal Geosains*, 8(2), 87–94.
- 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." *Mathematical and Computer Modelling*, 12(8), 967–973. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(89\)90202-1](https://doi.org/10.1016/0895-7177(89)90202-1)
- 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., et al. 2017. "Pemodelan deformasi permukaan gunung api menggunakan metode Very Fast Simulated Annealing." *Jurnal Geofisika Indonesia*, 20(1), 55–62.
- Kumalasari, R., Srigutomo, W., Djamal, M., Meilano, I., & Gunawan, H. 2018. Location of Sinabung volcano magma chamber on 2013 using lavenberg-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.
- McTigue, D. F., Segall, P., & Cervelli, P. 2014. "A model for the inflation of a magma chamber and its application to the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan." *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 264, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.07.004>
- Menke, W. 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press.
- Mogi, K. 1958. Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces around them.

- Bulletin of the Earthquake.
- Nakada, S., Syahbana, D. K., & Kaneko, T. 2016. "Volcanic activity and hazard at Sinabung volcano, Indonesia." *Earth, Planets and Space*, 68(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0423-7>
- Pribadi, A., et al. 2023. "Geodetic Monitoring and Numerical Simulation of Active Volcanoes in Indonesia." *Journal of Volcanology and Hazard Mitigation*, 5(2), 44–59.
- PVMBG. 2010. Laporan Aktivitas Gunung Sinabung. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Research Institute, 36, 99–134. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG). 2010. Data Dasar Gunung Api di Indonesia. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG).
- Segall, P. 2010. *Earthquake and Volcano Deformation*. Princeton University Press.
- Sen & Stoffa. 2013. A Very Fast Simulated Annealing (VFSA) Approach for Joint Objective Optimization. *Geophysics* 74(6), WCB47-WCB55.
- Sen, M. K., & Stoffa, P. L. 2013. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Syahbana, D. K., Nakada, S., & Kaneko, T. 2014. "The 2010 eruption of Sinabung volcano, Indonesia: A case of magma intrusion into an old volcanic system." *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 273, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.01.004>
- Yulianti, S., et al. 2021. "Application of Inversion Techniques for Volcanic Deformation Analysis." *Earth Science Research*, 10(3), 67–74.
- Zhang, G., et al. 2016. "Inversion of surface deformation data for magma chamber parameters at active volcanoes." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 1903–1924. <https://doi.org/10.1002/2015JB012600>