

Interpretasi Mekanisme Erupsi Gunung Api Lokon berdasarkan Aktivitas Kegempaan Pra-Erupsi 4 – 12 September 2014

Celvin Kristian Karisoh^{1)*}, Rolles Nixon Palilingan²⁾, Jeferson Polii³⁾

¹Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

*E-mail: kelvinkarisoh29@gmail.com

Diterima 28 Maret 2024; Disetujui 15 April 2024

ABSTRAK

Menjelang terjadinya erupsi Gunung api Lokon pada tanggal 13 September 2014 pukul 03.09 WITA, tercatat ada 62 events gempa vulkanik yang terekam oleh seismometer sejak tanggal 04 September 2014. Penelitian ini bertujuan untuk menginterpretasi mekanisme erupsi gunung api Lokon berdasarkan dari aktifitas kegempaan pada periode pra-erupsi tanggal 04 - 12 September 2014. Sebaran titik-titik sumber terjadinya gempa vulkanik, baik secara hiposenter dapat divisualisasikan menggunakan metode seismik yaitu dengan mengolah data seismogram digital menggunakan software Swarm 3.1.0, GAD (*Geiger's method with Adaptive Damping*) dan Origin 8. Data yang digunakan, bersumber dari tiga stasiun yaitu, Empung (EMP), Wailan (WLN), Kinilow (KIN). Gunung api Lokon. Distribusi hiposenter gempa vulkanik terkonsentrasi pada kedalaman 0 – 1.500 m dpl dan didapati daerah aseismik yang diasumsikan sebagai daerah kantong magma dangkal dari Gunung api Lokon berada pada kedalaman 1.500 – 3.000 m dpl. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa mekanisme erupsi Gunung api Lokon bermula dari terjadinya gangguan pada sistem vulkanik yang diduga akibat dari terjadinya gempa-gempa tektonik di zona subduksi. Sehingga menyebabkan magma naik keatas menyuplai kantong magma dangkal hingga mencapai tekanan maksimum dan terjadi erupsi

Kata kunci : Erupsi, Gempa Vulkanik, Hiposenter, Gunung api Lokon

ABSTRACT

Prior to the eruption of Lokon Volcano on September 13 2014 at 03.09 WITA, there were 62 volcanic earthquake events recorded by seismometers since September 4 2014. This research aims to interpret the eruption mechanism of Lokon Volcano based on seismic activity in the pre-eruption period. 04 - 12 September 2014. The distribution of source points for volcanic earthquakes, both hypocenters, can be visualized using the seismic method, namely by processing digital seismogram data using Swarm 3.1.0 software, GAD (*Geiger's method with Adaptive Damping*) and Origin 8. Data used, sourced from three stations, namely, Empung (EMP), Wailan (WLN), Kinilow (KIN). Lokon volcano. The hypocenter distribution of volcanic earthquakes is concentrated at a depth of 0 - 1,500 m above sea level and it was found that the aseismic area which is assumed to be a shallow magma pocket area from the Lokon volcano is at a depth of 1,500 - 3,000 m above sea level. The interpretation results show that the eruption mechanism of Lokon Volcano originates from disturbances in the volcanic system which are thought to be the result of tectonic earthquakes in the subduction zone. This causes the magma to rise upwards to supply shallow magma pockets until it reaches maximum pressure and an eruption occurs.

Keywords : Eruption, Volcanic Earthquake, Hypocenter, Lokon volcano

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara gunung api dengan jumlah gunung api aktif terbanyak di dunia yaitu 129 buah yang tersebar di jalur Cincin Api (*ring of fire*) Pasifik dan sekitar 8% yang terletak di Provinsi Sulawesi Utara. Banyaknya gunung api memberikan potensi besar berupa energi panas bumi dan keanekaragaman geologi (*geodiversity*), namun aktivitas erupsinya berpotensi menimbulkan bencana. Erupsi gunung api dapat menyebabkan korban jiwa, gangguan kesehatan, kerusakan infrastruktur, berdampak pada cuaca dan menimbulkan persoalan-

persoalan sosial. Banyaknya gunung api di negara kita juga belum diimbangi dengan jumlah periset dan kegiatan riset gunung api. namun, aktivitas vulkanik gunung api berdampak luas pada berbagai aspek kehidupan masyarakat. Riset terhadap perilaku erupsi gunung api di Indonesia dan Sulawesi Utara sangat penting dilakukan untuk memonitoring dan prediksi aktivitas vulkanik, mitigasi dan penanggulangan bencana (Anthe, 2015).

Terdapat tiga tipe yang membedakan suatu gunung diantaranya, gunung api, gunung lipatan, dan gunung patahan. Dari ketiga tipe ini terbentuk adanya pergerakan lempeng tektonik

di bagian kerak, yang menyebabkan terjadi arus konveksi pada mantel bumi. Seperti letusan dahsyat gunung api Tambora di pulau Sumbawa pada bulan April tahun 1815 yang menyebabkan kematian hingga tidak kurang dari 71.000 orang. Kedahsyatan tersebut letusan ini juga sampai terdengar hingga pulau Sumatra (lebih dari 2.000 km dari pusat gunung), abu vulkaniknya jatuh di Kalimantan, Sulawesi, Jawa, dan Maluku bahkan sampai terjadi pereubahan iklim dunia. Akibatnya letusan ini, keberadaan gunung api disuatu daerah selalu dihindari oleh sebagian masyarakat (Sumardani, 2018).

Gunung api Lokon merupakan salah satu dari 129 buah gunung api aktif di Indonesia yang sering erupsi. Pada tahun 2013 ini, aktivitas erupsinya masih berlangsung. Karakteristik erupsinya adalah erupsi eksplosif bertipe Vulkanian dan manifestasi eksplosifnya berupa aliran awan panas, lontaran bom vulkanik (material pijar), jatuhnya pumis, lapili, dan abu serta hembusan gas beracun. Berdasarkan sejarah erupsinya gunung api Lokon mengalami perubahan zona lemah titik erupsi yang semula berada pada puncak gunung Empung dan kemudian pada tahun 1829 erupsi terjadi pada kawah Tompaluan (Suparman, 2011).

Erupsi gunung api adalah suatu bencana alam yang tidak bisa dicegah karena berkaitan dengan suatu proses geodinamika antara lain mengakibatkan naiknya magma pada permukaan bumi. Hingga saat ini belum ada metode ataupun alat yang dapat memastikan kapan/jam gunung api akan meletus. Meskipun demikian, berbagai aktivitas gunung api yang terjadi mulai dari pergerakan magma, gempa hingga erupsi, diamati dan dipelajari secara terus menerus agar perkiraan terjadinya bencana letusan gunung api dapat prediksi (Sumintadireja, 2005).

Mekanisme erupsi suatu gunung api dapat ditentukan berdasarkan aktivitas kegempaan dan bagaimana model kantong magma gunung api tersebut. Karakteristik dan posisi kantong magma dapat diestimasi dengan menggunakan metode seismik yaitu dengan menganalisa rekaman sinyal seismik dari suatu gempa vulkanik maupun tektonik (Ayu, 2014).

Dengan penelitian ini, hasilnya dapat digunakan untuk mendukung sistem peringatan dini bencana letusan gunung api. Karena semakin sering dilakukannya penelitian seperti ini, maka akan semakin besar pula kesempatan

untuk dapat mengatasi masalah bencana letusan gunung api di Indonesia terlebih khusus gunung api Lokon.

2. KAJIAN LITERATUR

Bagian Gunung Api

Gunung api merupakan lubang kepundan atau rekahan didalam kerak bumi tempat keluarnya cairan magma atau gas atau cairan lainnya ke permukaan bumi. Gunung api terbentuk sejak jutaan tahun lalu hingga saat ini akibat proses vulkanisme, yaitu naiknya material magma dari dalam bumi menuju permukaan baik dikeluarkan secara eksplosif maupun efusif. Naiknya cairan magma ke permukaan bumi tidak terjadi secara tiba-tiba begitu saja, namun terdapat faktor yang menyebabkan proses tersebut. Peristiwa subduksi antar dua lempeng tektonik berimbas pada melelehnya material batuan pada kerak bumi sehingga bergerak ke permukaan karena berat jenis batuan yang relatif lebih rendah atau disebut proses undasi (Andreas, 2001).

Mekanisme Penjalaran Gelombang Seismik

Untuk memahami penjalaran gelombang seismik pada bawah permukaan diperlukan beberapa asumsi sebagai berikut :

- a. Panjang gelombang seismik yang digunakan jauh lebih kecil dibandingkan dengan ketebalan lapisan batuan. Dengan kondisi seperti ini memungkinkan setiap lapisan batuan akan terdeteksi.
- b. Gelombang seismik dipandang sebagai sinar yang memenuhi Hukum Snellius, Prinsip Huygens dan Prinsip Fermat.
- c. Medium bumi dianggap berlapis-lapis dan setiap lapisan menjalaran gelombang seismik dengan kecepatan yang berbeda-beda.
- d. Pada bidang batas antar lapisan, gelombang seismik menjalar dengan kecepatan gelombang pada lapisan di bawahnya.
- e. Semakin bertambahnya kedalaman lapisan batuan, maka semakin kompak lapisan batuanya, sehingga kecepatan gelombang pun semakin bertambah seiring dengan bertambahnya kedalaman.

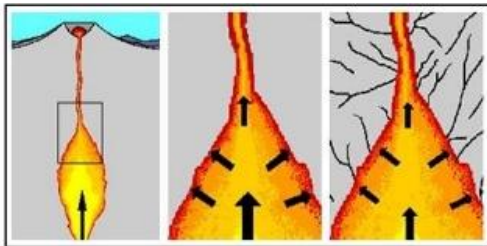
Gempa Vulkanik

Gempa vulkanik adalah gempa yang disebabkan karena aktivitas gunung api. Magma yang tersimpan dalam kantong magma

pada gunung api tersebut mendapat tekanan dan melepaskan energinya secara tiba-tiba sehingga menimbulkan getaran atau gempa. Gempa vulkanik terjadi karena adanya proses pergerakan magma dan cairan yang bersifat *hidrothermal* (peka terhadap panas), sehingga dapat dipakai sebagai tanda-tanda awal peningkatan keaktifan gunung api. (Suantika, 2008).

Seismisitas Gunung Api

Pergerakan magma dan fluida gunung api memicu gempabumi. Aktivitas gempa di bawah gunung api akan selalu meningkat menjelang terjadinya erupsi karena magma dan gas gunung api yang harus terlebih dahulu terdorong ke permukaan melalui rekahan. Ketika magma dan gas vulkanik berpindah akan menyebabkan retakan hingga pecahnya batuan. Retakan ataupun pecahnya batuan ini merupakan sumber getaran. Ketika batu pecah pada frekuensi tinggi, gempa akan timbul. Jika retakan bergetar dengan frekuensi rendah secara terus-menerus disebut dengan *Volcanic Tremor*. Gambar 1 menunjukkan pergerakan magma sebagai penyebab terjadinya gempa vulkanik.



Gambar 1. Pergerakan Magma Sebagai Penyebab Terjadinya Gempa Vulkanik (Sumber: Julian, 2013)

Aktivitas seismik dapat dipantau dengan menggunakan seismometer. Seismometer dapat mendeteksi gerakan tanah yang disebabkan oleh beberapa fenomena, termasuk angin, *volcanic explosion*, longsoran, lahar, dan gempabumi. Setiap getaran tanah biasanya akan menghasilkan rekaman seismik yang unik. Sehingga dapat dikenali dan diidentifikasi sebagai peristiwa tertentu. Untuk mengidentifikasi suatu peristiwa dibutuhkan beberapa rekaman seismik, sehingga dapat ditafsirkan lebih akurat. Hasil tafsiran dapat ditingkatkan dengan cara membandingkan rekaman seismik dengan pengamatan langsung aktivitas gunung api tersebut.

Hiposenter

Hiposenter merupakan titik pusat terjadinya gempa bumi pada kedalaman tertentu. Ada beberapa jenis gempa bumi berdasarkan kedalaman hiposenternya, yang pertama gempa bumi dangkal dengan kedalaman kurang dari 70 Kilometer, gempa bumi sedang dengan kedalaman 70 – 300 Kilometer. Penentuan Lokasi hiposenter dapat diketahui menggunakan perhitungan numerik berbasis komputer. Keunggulan dari penggunaan perhitungan numerik yaitu untuk mendapatkan hasil dengan cepat (Rasimeng, 2021).

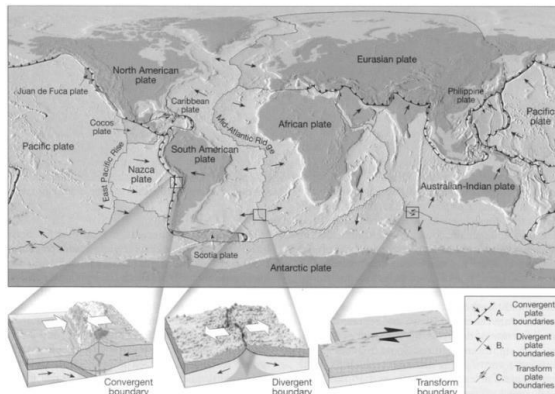
Lokasi gempa didefinisikan dengan hiposenter gempa (x, y, z) dan waktu asal t_0 . Hiposenter adalah lokasi fisik dari sumber gempa, biasanya diberikan dalam longitude, latitude, dan kedalaman di bawah permukaan, saat hiposenter dan waktu asal ditentukan oleh waktu kedatangan fase seismik dimulai gempa pertama, lokasi akan dihitung sesuai dengan titik dimana gempa dimulai. Hal tersebut dilakukan secara iterasi hingga diperoleh model hiposenter yang menghasilkan nilai residual di setiap stasiun mencapai nilai minimum yang ditentukan (Sahara, 2009).

Gempa bumi berkaitan erat dengan adanya pelepasan energi akibat terjadinya patahan baru ataupun bergesernya patahan lama, peristiwa benda jatuh, runtuhnya aktivitas vulkanik dan lain-lain. Hiposenter adalah titik awal terjadinya gempabumi dimana fokus pada bagian dalam bumi. Kedalaman sumber gempa bumi adalah jarak hiposenter dihitung tegak lurus dari permukaan bumi. Kedalaman dinyatakan oleh besaran jarak dalam satuan km. Secara seismologis, hiposenter gempabumi adalah posisi dimana energi regangan yang tersimpan dalam batuan itu pertama dilepaskan, dan merupakan titik dimana patahan/retakan mulai pecah. Ini terjadi pada kedalaman hiposenter di bawah pusat gempa. Pada penentuan hiposenter dibutuhkan hasil rekaman gempa, yaitu waktu tiba gelombang P dan waktu tiba gelombang S pada tiap stasiun. Selisih waktu tiba kedua gelombang (S-P) akan terus bertambah sebanding dengan bertambahnya jarak tempuh (D) kedua gelombang tersebut (Fiandreakha, 2010).

Tektonik Gunung Api

Pergerakan lempeng yang berlangsung secara terus-menerus, menimbulkan gejala geologis seperti gempabumi, aktivitas gunung

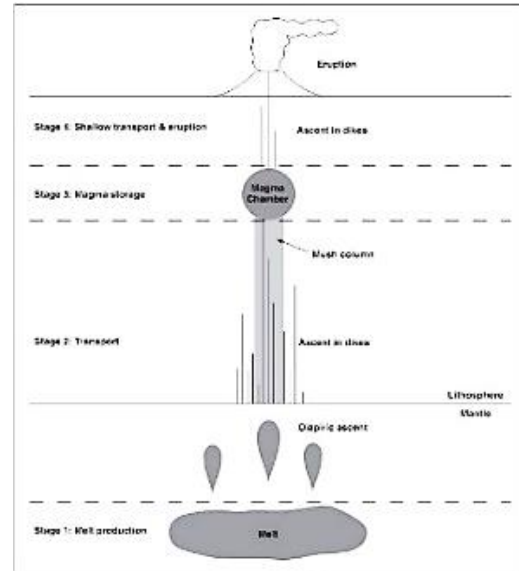
api dan pembentukan pegunungan (*mountain building*). Hal itu mengakibatkan terbentuknya jalur cincin api dunia (*ring of fire*), dimana Indonesia merupakan bagian dari cincin api tersebut, dengan ditandai oleh jalur/gugusan gunung api aktif di sepanjang Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara hingga Sulawesi. Penyebaran gunung api di dunia 95% terletak di batas lempeng dan pegunungan tengah samudera. Batas lempeng merupakan daerah yang terletak diantara dua lempeng yang bergerak secara *divergent* (saling menjauh), *convergent* (saling mendekat) dan *transform* (saling berpasasan) seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Pergerakan Lempeng Bumi yang Menunjukkan Batas Lempeng Aktif (Sumber: Departemen Teknik Geologi FIKTM, 2005)

Migrasi dan Penyimpanan Magma

Migrasi magma atau pergerakan magma dikontrol oleh densitas dan temperatur. Magma yang meleleh akan menjadi cair, densitas menjadi kecil dan dapat bergerak menuju ke atas dan akan menerobos batuan lain yang memiliki densitas lebih besar lewat rekahan atau disebut diapir. Diapire berasal dari tubuh batuan yang meleleh menjadi magma dengan volume 2 – 25% dari volume total batuan yang meleleh (*host rock*), kemudian mengalir menuju permukaan karena adanya gaya apung yang lebih besar dibandingkan gaya apung batuan di sekitarnya. Pergerakan diapire ini akan menyebabkan deformasi pada batuan yang dilewatinya (Parfitt, 2008).



Gambar 3. Proses Migrasi Magma (Sumber: Parfitt, 2008)

Penyimpanan Magma (*Magma Storage*)

Magma dari mantel yang terdorong ke atas akan menemui dua kemungkinan, yang pertama akan menemui permukaan bumi atau terhenti di kerak untuk beberapa saat sebelum akhirnya tererupsi, dengan kata lain magma tersimpan terlebih dahulu di kerak. Penyimpanan magma di kerak bumi ini dikenal juga dengan istilah *magma storage*. Magma *storage* dapat terjadi secara permanen, dimana magma berhenti di kerak bumi lalu mendingin membentuk tubuh intrusi tanpa sempat mencapai permukaan. Magma *storage* dapat juga terjadi secara temporer. Penyimpanan magma ini memiliki dampak yang dapat mempengaruhi komposisi magma, sifat fisis magma seperti viskositasnya, dan ukuran serta frekuensi letusan gunung api.

Kantong Magma (*Magma Chamber*)

Kantong magma adalah zona penyimpanan yang menerima banyak suplai magma yang tersimpan dalam kerak dan dalam jangka waktu tertentu secara terus menerus sehingga mempengaruhi karakter sistem vulkanik secara signifikan. Kantong magma sangat berpengaruh pada aktivitas sistem gunung api terlebih efeknya terhadap skala dan frekuensi erupsi sebuah gunung api. (Parfitt, 2008).

Erupsi

Erupsi merupakan peristiwa dimana magma keluar ke permukaan bumi, baik berupa lelehan/aliran lava ataupun material-material

gunung api seperti gas, awan panas, abu, batuan dan lain-lain. Berdasarkan kajian dari *Vulcanological Survey of Indonesia (VSI)*.

Erupsi dapat di klasifikasikan berdasarkan dari mana dia keluar:

- Erupsi pusat, erupsi yang keluar melalui kawah utama;
- Erupsi samping, erupsi yang keluar dari lereng tubuh gunung api;
- Erupsi celah, erupsi yang keluar dari retakan yang panjang dapat mencapai hingga beberapa kilometer.
- Erupsi eksentrik, erupsi yang keluar dari samping kantong magma melalui kepundan tersendiri.

Erupsi berdasarkan sumber kejadiannya, telah dikelompokkan menjadi (Sumintadireja, 2005):

- Erupsi magmatik, terjadi akibat magma berhasil naik dan keluar ke permukaan bumi sebagai lava. Material vulkaniknya dihasilkan oleh suatu proses erupsi yang eksplosif atau efusif atau campuran keduanya.
- Erupsi freatik, terjadi akibat adanya kontak air secara langsung maupun tidak langsung dengan magma. Air terpanaskan menjadi uap, letusan terjadi akibat tekanan uap air lebih besar dari tekan beban litostatitis yang ada. Batuan hasil erupsi freatik umumnya adalah batuan yang terletak insitu di sekitar magma yang kontak dengan air, tidak berasal dari magma.
- Erupsi freatomagmatik, merupakan erupsi magmatik yang diawali oleh erupsi freatik kemudian diakhiri dengan erupsi yang bahannya berasal dari magma.

3. METODE PENELITIAN

Objek penelitian ini adalah gunung api Lokon. Gunung api Lokon merupakan salah satu gunung api aktif di Indonesia yang terletak di Kota Tomohon, Provinsi Sulawesi Utara. Tipe gunung api Lokon adalah strato dan berada pada posisi kordinat 1.358°LU; 124.792°BT dan memiliki ketinggian 1580 meter diatas permukaan laut. Gambar 4 menunjukkan objek penelitian gunung api lokon dan koordinat 3 stasiun pengamat gunung api lokon ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 4. Objek Penelitian Gunung api Lokon

(Sumber: Google Earth, 2023)

Pemantuan aktivitas gunung api Lokon, terdapat tiga sensor seismometer di tubuh gunung api Lokon yang terdiri dari stasiun Empung (EMP), Wailan (WLN), dan Kinilow (KIN).

Tabel 2. Koordinat 3 Stasiun Pengamat Gunung Api Lokon

No.	Stasiun	Latitude (X)	Longtitude (Y)	Altitude (Z)
1	Empung (EMP)	1°22'15.0"	124°47'56"	1270 m
2	Wailan (WLN)	1°20'58.30"	124°48'8.00"	980 m
3	Kinilow (KIN)	1°22'0.60"	124°48'59.40"	920 m

Alat dan Bahan

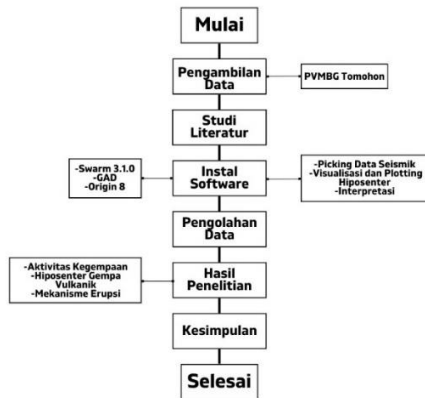
Dalam penelitian telah menggunakan 4 alat (termasuk *software*) dan 2 bahan yaitu:

- Komputer/laptop untuk mengoperasikan *software* pengolah data.
- Software* Swarm 3.1.0 untuk *picking* data seismogram digital.
- Software* GAD (*Geiger's method with Adaptive Damping*) untuk mendapatkan koordinat x, y dan z.
- Software* Origin 8 untuk *plotting* hiposenter dan episenter gempa vulkanik.
- Data seismogram digital gunung api Lokon tanggal 4 – 12 September 2014.
- Data kontur, penampang, dan koordinat 3 stasiun seismik gunung api Lokon.

Desain Penelitian

Penelitian ini berawal saat aktivitas gunung api Lokon sedang dalam status Siaga. Hal ini menjadi permasalahan bagi peneliti untuk melakukan penelitian lebih lanjut terkait erupsi tersebut. Peneliti mempelajari masalah dari buku, jurnal dan penelitian-penelitian serupa yang pernah dilakukan sebelumnya. Kemudian dilakukan pengamatan lebih lanjut di PVMBG Tomohon dan menggunakan data

seismogram digital yang telah didapat dari sana. Selanjutnya data tersebut diolah menggunakan *software* pendukung, untuk mengetahui aktivitas kegempaan gunung api Lokon dan dari sini, peneliti dapat menginterpretasikan seperti apa mekanisme erupsinya. Desain penelitian ini tertuang pada (Gambar 5).



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Variabel Penelitian

Variabel penelitian ini adalah aktivitas kegempaan gunung api Lokon. Aktivitas kegempaan dapat memberikan gambaran bagaimana proses pergerakan magma sebagai penyebab terjadinya gempa vulkanik dibawah permukaan. Divisualisasikan dengan persebaran hiposenter gempa vulkanik, sehingga peneliti bisa menduga bagaimana model mekanisme erupsinya.

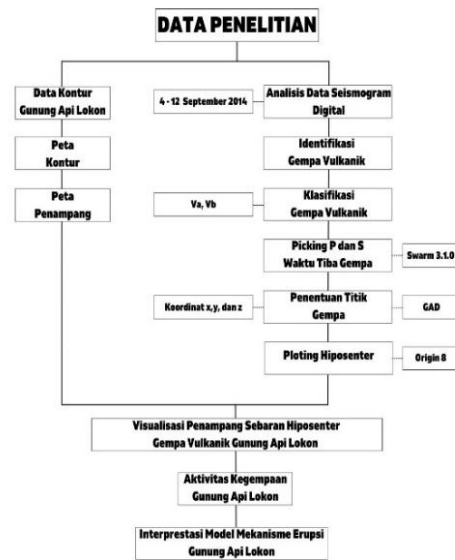
Data Penelitian

Data yang di gunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder, yaitu data seismogram digital hasil rekaman seismometer tanggal 4 – 12 September 2014, yang didapat dari PVMBG Tomohon. Adapun data yang digunakan bersumber dari tiga stasiun, yaitu stasiun Empung (EMP), Wilan (WLN), dan Kinilow (KIN).

Teknik Pengolahan dan Analisis Data

Penelitian ini diawali dengan menganalisis dan mengidentifikasi data seismogram digital hasil rekaman seismometer pada tanggal 4 – 12 September 2014 dengan menggunakan *software* Swarm 3.1.0, untuk mendapatkan karakteristik gempa seperti waktu tiba gelombang P dan S. Setelah itu dapat divisualisasikan sebaran hiposenter gempa vulkanik dengan menggunakan *software* GAD

(*Geiger's method with Adaptive Damping*) kemudian *plotting* hiposenter menggunakan *software* Origin 8. Data persebaran hiposenter gempa vulkanik yang telah didapat, dikaji lebih lanjut untuk mengetahui gambaran aktivitas kegempaan gunung api Lokon. Kemudian diinterpretasikan mekanisme erupsi gunung api Lokon berdasarkan dari data aktivitas kegempaan sebagai acuannya.



Gambar 6. Diagram Alir Data

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktifitas Kegempaan

Identifikasi Gempa

Berdasarkan data hasil rekamaan seismometer gunung api Lokon yang seismogramnya diganti setiap 12 jam pada pukul 06:00 - 18.00 (WITA) dan juga hasil rekaman dari seismogram digital (Swarm 3.1.0) dari stasiun Empung (EMP), Wilan (WLN), Kinilow (KIN) gunung api Lokon. Data yang diambil dimulai pada 4 September 2014 dimulai pada pukul 06.00 (WITA) sampai 12 September 2014 pukul 18.00 (WITA), aktifitas kegempaan gunung api Lokon yang di dapat mengalami 62 kejadian yaitu gempa va dan gempa vb, kemudian mengalami peningkatan gempa yang signifikan dengan 195 kejadian gempa va dan gempa vb pada 12 September 2014 pukul 18.00 (WITA) sampai 12 September pukul 24.00 (WITA). Sebelum menjelang erupsi pertama pada 13 September 2014 sekitar pukul 03.00 (WITA). Dengan terekamnya gempa va dan gempa vb pada 13 September 2014 mengalami 108 kejadian dan mengalami 3 kali letusan erupsi, letusan erupsi pertama pada 13 September 2014 pukul 03.00

(WITA), letusan erupsi kedua pada 13 September 2014 pukul 11.46 (WITA), dan letusan erupsi ketiga pada 13 September 2014 pukul 12.29. Secara keseluruhan, total kejadian gempa pra-erupsi dan pasca-erupsi adalah 365 kejadian gempa va dan gempa vb dengan waktu kejadian berturut-turut relatif berdekatan (jedah singkat).

Data gempa yang telah diperoleh di klasifikasikan menjadi 2 jenis gempa yaitu gempa va dan gempa vb (Tabel 3). Masing-masing jenis gempa tersebut memiliki jumlah kejadian yang berbeda, yakni terjadi 36 kejadian gempa va dan terjadi 26 kejadian gempa vb, dengan total 62 kejadian gempa va dan gempa vb.

Tabel 3. Klasifikasi Gempa

No.	Jenis Gempa	Jumlah Kejadian
1.	Va	36
2.	Vb	26
	Jumlah	62

Karakteristik Gempa

Gelombang gempa yang menjalar dari titik sumber terjadinya gempa sampai kepermukaan hingga terekam oleh seismometer digital (Swarm 3.1.0), memiliki durasi yang bervariasi tergantung dari kedalaman sumber terjadinya gempa. Dari total 62 gempa yang terekam di tiga stasiun gunung api Lokon.

Waktu tiba gelombang P dan S, cenderung sangat singkat. Hasil penentuan waktu tiba gelombang P dan S, akan memperoleh data perpotongan antar stasiun dalam koordinat yakni X, Y dan Z (Tabel 4).

Tabel 4. Hasil Picking Gempa

No.	Koordinat			Durasi	Klasifikasi	Waktu Kejadian
	X	Y	Z	(s)		
1	0.097	-1.308	-0.318	10,32	Vb	04-09-2014 08:06:50
2	-0.702	-0.664	-1.997	5,92	Va	04-09-2014 13:17:01
3	-0.547	-0.974	-1.645	13,41	Va	04-09-2014 16:54:21
4	-0.159	-0.863	0.066	7,62	Vb	04-09-2014 16:57:43
5	0.300	-1.474	0.194	10,07	Va	04-09-2014 20:36:56
6	-0.933	0.069	1.165	14,22	Va	05-09-2014 01:14:55
7	-1.663	-1.512	-1.983	15,40	Va	05-09-2014 03:22:30
8	-0.513	-0.458	0.676	9,37	Vb	05-09-2014 08:34:47
9	0.256	-1.010	1.098	9,06	Va	05-09-2014 13:48:51
10	-1.408	-2.083	-0.964	6,18	Va	05-09-2014 14:55:23

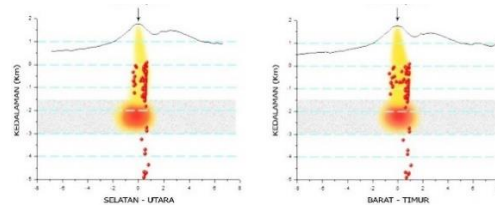
No.	Koordinat			Durasi (s)	Klasifikasi	Waktu Kejadian
	X	Y	Z			
11	0.519	-1.597	-0.212	5,42	Va	06-09-2014 05:45:54
12	-3.723	-0.517	6.358	11,17	Vb	06-09-2014 08:36:59
13	0.684	-0.813	-1.195	18,85	Vb	06-09-2014 08:38:15
14	-0.700	-0.593	-2.002	17,60	Va	06-09-2014 09:25:00
15	-0.445	-0.406	-0.309	10,32	Va	06-09-2014 12:33:49
16	-0.517	-0.460	0.893	8,80	Va	06-09-2014 13:01:56
17	-0.492	-0.439	0.665	12,69	Vb	06-09-2014 14:38:14
18	-0.702	-0.649	-1.988	14,22	Va	06-09-2014 17:39:20
19	-0.181	-1.119	-1.009	13,20	Va	06-09-2014 21:16:00
20	-0.216	-0.865	0.419	11,34	Vb	06-09-2014 21:55:54
21	-0.921	0.131	1.295	16,59	Va	07-09-2014 03:20:53
22	-0.605	-0.559	-1.981	18,79	Va	07-09-2014 07:42:12
23	6.050	5.558	-2.450	10,58	Vb	07-09-2014 20:10:08
24	-0.599	-0.717	-1.878	8,80	Va	07-09-2014 20:11:22
25	-0.695	-0.659	-1.997	9,18	Va	07-09-2014 20:18:30
26	-0.696	-0.644	-1.960	8,12	Va	07-09-2014 20:38:43
27	-0.286	-0.738	0.336	14,89	Vb	08-09-2014 00:27:46
28	0.508	-1.595	0.391	15,32	Va	08-09-2014 03:28:47
29	-0.547	-0.491	0.760	20,31	Vb	08-09-2014 12:50:35
30	-0.553	-0.501	-0.100	12,86	Va	08-09-2014 14:42:03
31	-0.819	-0.493	-1.474	20,31	Va	08-09-2014 17:52:07
32	-0.616	-0.554	0.744	7,11	Vb	08-09-2014 21:18:50
33	-0.485	-0.555	0.744	17,09	Vb	09-09-2014 01:48:38
34	-0.485	-0.399	0.841	13,71	Vb	09-09-2014 06:42:18
35	-0.204	-0.834	0.434	9,31	Va	09-09-2014 06:47:03
36	0.286	0.286	1.733	9,14	Va	09-09-2014 07:20:52
37	-1.148	-1.365	0.463	15:32	Vb	09-09-2014 08:26:44
38	-4.481	-4.144	-2.606	14,22	Vb	09-09-2014 08:55:06
39	-0.799	-0.485	-0.990	9,06	Va	09-09-2014 10:12:29
40	-0.699	-0.646	-1.945	10,24	Va	09-09-2014 11:05:17
41	-0.487	-0.399	0.681	10,92	Vb	09-09-2014 11:30:18
42	-0.204	-0.834	0.434	16,08	Vb	09-09-2014 12:34:31
43	-0.204	-0.834	0.434	14,39	Vb	09-09-2014 12:36:10
44	0.823	-2.409	-0.902	13,29	Va	09-09-2014 23:06:25
45	-0.216	-0.865	0.419	16,84	Vb	09-09-2014 23:51:43
46	0.097	-1.308	-0.318	92,75	Vb	10-09-2014 03:45:56
47	0.757	-1.558	1.059	13,03	Va	10-09-2014 19:53:49
48	0.625	-0.973	1.961	20,99	Va	11-09-2014 02:38:52
49	-0.689	-0.637	-2.000	7.02	Va	11-09-2014 04:11:15
50	-0.329	-0.947	-1.725	8,55	Va	11-09-2014 05:19:02
51	-0.765	-0.533	-1.912	6,77	Va	11-09-2014 05:29:07

No.	Koordinat			Durasi (s)	Klasifikasi	Waktu Kejadian
	X	Y	Z			
52	-0.165	-0.963	0.049	68,38	Vb	11-09-2014 06:40:51
53	-3.620	0.504	8.772	8,80	Vb	11-09-2014 09:24:01
54	-0.107	-1.031	0.151	8,97	Vb	11-09-2014 15:21:52
55	-0.161	-0.934	0.046	18,62	Vb	11-09-2014 17:55:38
56	-0.513	-0.458	0.676	27,08	Vb	11-09-2014 19:45:39
57	0.306	0.306	1.942	9,56	Va	12-09-2014 01:17:51
58	0.111	0.455	-0.903	5,92	Va	12-09-2014 01:49:51
59	-0.204	-0.834	0.434	20,99	Vb	12-09-2014 02:26:55
60	-0.822	-0.543	-1.716	10,24	Va	12-09-2014 04:27:57
61	-0.465	-0.425	-0.688	9,99	Va	12-09-2014 06:28:35
62	-1.006	-0.054	-1.716	6,01	Va	12-09-2014 06:51:59

Visualisasi Sebaran Hiposenter Gempa Vulkanik

Setiap data koordinat yang telah diperoleh dari hasil *picking* data gempa vulkanik (Tabel 4.), akan memberikan gambaran titik-titik sumber terjadinya gempa secara hiposenter dengan melakukan *plotting* data menggunakan Origin 8. Hasil yang diperoleh adalah penampang seismik 2 dimensi yang menampilkan sebaran hiposenter gempa vulkanik.

Sebaran hiposenter gempa vulkanik gunung api Lokon (Gambar 7), menyajikan dua penampang yang memvisualisasikan sebaran hiposenter gempa vulkanik. Kedua penampang tersebut tertampak dari perspektif yang berbeda yakni penampang Barat – Timur (longitude) dan penampang Selatan – Utara (latitude), yang bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih akurat. Titik- titik merah menunjukkan posisi sumber terjadinya gempa vulkanik yang disebabkan karena adanya gangguan dari aktivitas migrasi magma pada kedalamanitu. Dapat dilihat bahwa persebaran hiposenter gunung api Lokon tanggal 4 – 12 September 2014 , lebih terkonsentrasi pada kedalaman 0 – 1.500 meter dibawah permukaan laut. Hal ini menandakan bahwa pada kedalaman tersebut terjadi aktifitas desakan magma dari kantong magma dangkal (*magma chamber*) menuju permukaan melalui peristiwa erupsi.



Gambar 7. Visualisasi Sebaran Hiposenter Gunung Api Lokon

Pada umumnya, sumber dari suatu gempa vulkanik adalah pada dinding- dinding lapisan batuan yang retak akibat kontak dengan magma. Sedangkan lapisan batuan yang mampu menyimpan fluida, sukar untuk menciptakan gempa. Kantong magma dari suatu gunung api, dapat diestimasi dengan memperhatikan daerah aseismik atau daerah nihil gempa yang dapat di interpretasikan sebagai daerah kantong magma. Metode tersebut pernah dilakukan oleh Ayu, 2014 dalam penelitiannya tentang mekanisme erupsi dan model kantong magma gunung api.

Berdasarkan dari hal tersebut, maka dapat diasumsikan bahwa daerah kantong magma dangkal gunung api Lokon berada pada kedalaman 1.500 – 3.000 (meter) dibawah permukaan laut, karena terlihat pada kedalaman tersebut merupakan daerah aseismik.

Mekanisme Erupsi Gunung Api Lokon

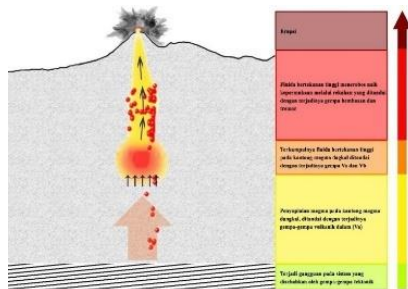
Aktifitas kegempaan gunung api Lokon pada pra erupsi cenderung stabil, 4 September 2014 dimulai pada pukul 06.00 (WITA) sampai 12 September 2014 pukul 18.00 (WITA). Kemudian mengalami peningkatan yang signifikan pada pada 12 September 2014 pukul 18.00 (WITA) sampai 12 September pukul 24.00 (WITA). Sehingga mengalami 3 kali letusan erupsi, letusan erupsi pertama pada 13 September 2014 pukul 03.00 (WITA), letusan erupsi kedua pada 13 September 2014 pukul 11.46 (WITA), dan letusan erupsi ketiga pada 13 September 2014 pukul 12.29.



Gambar 8. Erupsi Gunung Api Lokon 13 September 2014

Berdasarkan dari aktifitas kegempaan dan visualisasi sebaran hiposenter gempa vulkanik, maka dapat di interpretasikan dengan menyajikan gambaran model mekanisme erupsi gunungapi Lokon yang terjadi pada 4 – 12 September 2014 disertai urutan waktu kejadiannya (Gambar 15.). Pada mulanya, terjadi gangguan pada sistem vulkanik yang diduga karena gempa-gempa tektonik yang terjadi di zona subduksi, sehingga menyebabkan magma mengapung naik menuju permukaan sebagai diapir (*diapiric ascent*) (Parfit, 2008). Hal tersebut mengakibatkan kantong magma dangkal (*magma chamber*) dari gunung api Lokon, tersuplai oleh magma ditandai dengan terjadinya gempa-gempa vulkanik dalam (va) yang terekam pada seismometer dan seismometer digital (Swarm 3.1.0). Volume suplai magma pada kantong magma dangkal, pada tanggal 4– 12 September 2014 dibuktikan dengan terekamnya 26 kejadian gempa va.

Ketika magma telah terkumpul pada kantong magma dangkal, maka suhu dan tekanan pada kantong magma akan semakin tinggi sehingga mampu meretakan lapisan batuan disekitarnya, material-material yang bercampur dengan magma, membentuk fluida panas yang memiliki suhu dan tekanan tinggi (Mulyaningsih, 2013). Karena material yang dikeluarkan oleh gunung api Lokon saat erupsi di dominasi oleh abu, maka dapat dikatakan bahwa material-material yang berada pada kantong magma dangkal dan pipa kawah gunung api Lokon didominasi oleh abu. Fluida panas yang tertampung pada kantong magma dangkal akan mencapai tekanan maksimum sehingga fluida tersebut akan menerobos naik melalui rekahan dan menyebabkan terjadinya gempa-gempa hembusan, tremor sampai terjadinya erupsi. Sebaran titik-titik merah menunjukkan pusat sumber terjadinya gempa vulkanik menurut kedalaman disertai urutan waktu kejadiannya (Gambar 9).



Gambar 9. Model Mekanisme Erupsi Gunung Api Lokon 13 September 2014

Secara fisika, proses erupsi gunung api Lokon berawal dari interaksi dan gerakan antar lempeng yang dapat menyebabkan gaya gesek. Pergerakan lempeng ini diakibatkan oleh gaya luar yang bekerja pada gunung contohnya gempa bumi. Interior bumi memiliki suhu yang sangat tinggi, bahkan pada kedalaman tertentu dapat mencairkan bahan-bahan dan batuan di sekitarnya. Proses tersebut menghasilkan magma yang banyak mengandung silika. Magma terbentuk kalau batuan lempeng samudera dipaksa menyurut ke dalam bumi oleh suatu lempeng benua yang menungganginya sehingga bertemu dengan selubung dan meleleh berbentuk magma panas yang lama-lama mengapung melalui selubung dalam bentuk gelembung berekor seperti kecebong. Ketika mencapai kerak bumi, magma mengumpul dalam penampungan yang terletak tepat di bawah permukaan yang dikenal dengan kantong magma. Magma ini lama-lama menutupi kantong magma dikarenakan massa magma terus bertambah dan gas-gas yang ada di bawah magma terus memberikan tekanan dan dorongan pada magma. Ledakan atau letusan gunung api akan terjadi apabila terdapat perbedaan tekanan yaitu tekanan di bawah magma harus lebih besar dibandingkan dengan tekanan di atas magma. Magma yang bersuhu tinggi akan menggelegak dan mendidih seperti sup, magma mengapung akibat uap air dan berbagai gas panas akan keluar mencari celah berupa retakan (Yuneldi, 2017).

5. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Aktifitas kegempaan gunung api Lokon terjadi 36 kejadian gempa va dan terjadi 26 kejadian gempa vb, dengan total 62 kejadian gempa va dan gempa vb. Karakteristik keseluruhan gempa memiliki waktu tiba gelombang P dan S yang cenderung sangat singkat.
- Visualisasi penampang seismik gunung api Lokon menunjukkan sebaran hiposenter gempa vulkanik tanggal 4 – 12 September 2014 lebih terkonsentrasi pada kedalaman 0 – 1.500 meter dibawah permukaan laut, dan daerah kantong magma dangkal diasumsikan sebagai daerah aseismik berada pada kedalaman 1.500 – 3.000 meter dibawah permukaan laut.

- c. Mekanisme erupsi gunung api Lokon diawali dengan terjadinya gangguan pada sistem vulkanik yang diduga disebabkan oleh gempa tektonik, sehingga mengakibatkan naiknya magma ke permukaan. Kemudian terjadi suplai magma pada kantong magma dangkal, dan ketika telah mencapai tekanan maksimum, magma akan menerobos naik ke permukaan dan keluar melalui peristiwa erupsi.

Penelitian seperti ini perlu dikembangkan dan dilakukan secara terpadu, menggunakan data-data yang lebih banyak dan akurat sehingga dapat mendukung peningkatan sistem mitigasi bencana alam gunung api Lokon menjadi semakin baik.

6. REFERENSI

- Andreas, H. (2001). *Analisis deformasi Gunung berapi Papandayan Memanfaatkan Parameter Baseline Hasil Survei GPS*. ITB: Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika.
- Anthe, S., Pasau, G., & Tanauma, A. (2015). Variasi Zona Lemah Struktur Internal Gunung Lokon Berdasarkan Studi Seismo-Vulkanik. *Jurnal Ilmiah Sains*, 15(1), 27–32.
- Ayu, H. D., & Jufriadi, A. (2014). Mekanisme Erupsi dan Model Kantong Magma Gunungapi Ijen. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 6(2), 74–83.
- Dawid, S., Ferdy, F., & Pasau, G. (2015). Penentuan Lokasi Pergerakan Magma Gunung Api Soputan Berdasarkan Studi Sebaran Hiposenter Gempa Vulkanik Periode Mei 2013 –Mei 2014. *Jurnal Ilmiah Sains*, 1(1), 88–93.
- Departemen Teknik Geologi FIKTM. (2005). *Pergerakan Lempeng Bumi yang Menunjukkan Batas Lempeng Aktif*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Fiandralekha. (2010). *Studi Mekanisme Sumber Gempa di Selat Sunda Berdasarkan Gerak Awal Gelombang P dan Bentuk Gelombang*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Google Earth. (2023). Gunung api Lokon pada Google Earth. Retrieved March 29, 2023, from <https://earth.google.com>
- Julian, R. (2013). Studi Gelombang Seismik Gempa Vulkanik Gunung Sinabung untuk Menentukan Karakteristik Mekanisme Vulkanik. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 1(02), 53–64.
- Mulyaningsih, S. (2013). *Vulkanologi*. Yogyakarta: Akprind Press.
- Parfitt, E. A., & Wilson, L. (2008). *Fundamentals of Physical Volcanology*. Australia: Blackwell Publishing.
- Putri, L. P. (2013). Analisis Karakteristik dan Klasifikasi Gempa pada Gunung Lokon Berdasarkan Rekaman Data Seismogram April-Mei 2012. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 1(2), 19–31.
- Rasimeng, S., Dani, I., Wibisono, A. H., Ahadi, R. W., & Al Ghifari, S. (2021). Penentuan Episentrum dan Hiposentrum Gempa Bumi Menggunakan Metode Grid Search di Antelope Valley, California. *Geoelebes*, 5(2), 173–181.
- Romsiyatin, A. B. (2012). Penentuan Sebaran Hiposenter Gunungapi Merapi Berdasarkan Data Gempa Vulkanik Tahun 2006. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 4(2), 188–200.
- Sahara, D. (2009). *Relokasi Hiposenter Menggunakan SED, JHD, dan DD*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Suantika, G., & Widiyantoro, S. (2008). Pencitraan Tomografi Atenuasi Seismik Tiga-Dimensi Gunung Guntur menggunakan Metode Rasio Spektra. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 9(2), 81–100.
- Sumardani. (2018). Gunung Api di Dunia. Retrieved January 26, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/324439119_Gunung_Api_di_Dunia.
- Sumintadireja, P. (2005). *Vulkanologi dan Geothermal*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Suparman, Y., Kristianto, Gunawan, H., Solihin, A., & Basuki, A. (2011). *Seismisitas Gunungapi Lokon, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*. Tomohon: BMKG Tomohon.
- Yuneldi, A., & Hendrajaya, L. (2017). Fisika Gunung Api: Meletusnya Gunung Talang Berdasarkan Perspektif Al Quran dan Sains-fisika. *Simposiu Nasional Inovasi Dan Pembelajaran Sains (SNIPS)*, 148–153.