

RELOKASI DAN DISTRIBUSI b-VALUE GEMPABUMI SWARM JAILOLO, HALMAHERA BARAT

EARTHQUAKE RELOCATION AND DISTRIBUTION OF b-VALUE OF THE JAILOLO SWARM EARTHQUAKE, WEST HALMAHERA

Yanuarsih Tunggal Putri¹, Nova Heryandoko¹, Wandono¹, Rivai Marulak², Suwardi³, Zulfikar³, Barkah
Yuniarto³, Lutfi Pary³, Basri Kamaruddin³

¹Pusat Gempabumi dan Tsunami, BMKG, Jl. Angkasa 1, No. 2, Kemayoran, Jakarta, 10720

²Balai Besar Wilayah IV Makasar, BMKG, Jl. Racing Center, No. 4, Panaikang KP, Makasar, 1351

³Stasiun Geofisika Ternate, BMKG, Jl. Bali Bunga Ternate Selatan, Maluku Utara, 97717

*E-mail: yanuarsih.tunggalputri@bmkg.go.id

Naskah masuk: 22 Juli 2016; Naskah diperbaiki: 28 Oktober 2016; Naskah diterima: 22 Desember 2016

ABSTRAK

Aktivitas kegempaan di daerah Jailolo meningkat tajam pada bulan November sampai Desember 2015, dimana terjadi fenomena gempabumi swarm pada rentang waktu tersebut. BMKG pusat Jakarta mencatat 96 gempabumi dengan magnitudo antara 2,5 sampai 4,8. Sedangkan stasiun geofisika BMKG wilayah Ternate mencatat 1185 gempabumi dengan magnitudo 1,1 sampai 5,1 menggunakan *single station*. Sejumlah 33 gempabumi dirasakan dengan intensitas antara dua sampai dengan empat MMI dengan beberapa kerusakan pada rumah warga dan sarana umum. Relokasi gempabumi dilakukan menggunakan data BMKG pusat dengan metode MJHD. Relokasi gempabumi bertujuan untuk meningkatkan akurasi gempabumi yang terjadi dengan lebih baik. Penghitungan b-value di daerah Jailolo menggunakan data gempabumi *single station* dari stasiun geofisika Ternate dilakukan untuk mengetahui distribusi dan karakteristik b-value di daerah tersebut. Hasil relokasi gempabumi menunjukkan gempabumi swarm yang terjadi terkonsentrasi pada 127,4° - 127,6° BT dengan perbaikan pada distribusi kedalaman dimana sebagian besar gempabumi terjadi pada kedalaman kurang dari 20 km. Sedangkan hasil penghitungan nilai b-value menunjukkan daerah dengan konsentrasi gempa memiliki nilai b-value cukup tinggi (± 1). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa gempabumi swarm yang terjadi kemungkinan dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik. Namun penelitian lebih lanjut diharapkan dapat dilakukan untuk lebih memahami penyebab dan karakteristik gempabumi swarm tersebut.

Kata kunci: Swarm, Relokasi, MJHD, b-value, ZMAP, Jailolo.

ABSTRACT

Seismic activity in the area of Jailolo increased sharply in November to December 2015, where the phenomenon of swarm earthquake occurred at that time. BMKG headquarter in Jakarta recorded 96 earthquakes with magnitude of M 2,5 to M 4,8. While the geophysical stations of BMKG in Ternate region, using a single station, recorded 1185 earthquakes with magnitude of M 1,1 to M 5,1. It reported that 33 earthquakes were felt with an intensity between two to four MMI with some damage to homes and public facilities. Earthquake relocation was done using data from BMKG Jakarta with MJHD method. Earthquake relocation was intended to improve the distribution of the earthquakes. The calculation of the b-value in the area of earthquakes was done using single station data from BMKG station in Ternate, which was conducted to improving acuration and characteristics of the b-value in the area. The results of the earthquake relocation showed that the swarm earthquakes concentrated on 127,4 °E – 127,6 °E, with improvements in the distribution of the depth where most earthquakes occurred at depths of less than 20 km. While the results of the calculation of the b-value showed an area with a concentration of earthquakes has quite high b-value (± 1). The results of this study indicate that the swarm earthquakes that occurred in Jailolo probably were caused by volcanic activity. However, further research is expected to be carried out to get better understanding about the causes and characteristics of the swarm earthquake.

Keywords: Swarm, Relocation, MJHD, b-value, ZMAP, Jailolo.

1. Pendahuluan

Fenomena terjadinya rangkaian gempabumi kecil meningkat di daerah Jailolo, Halmahera Barat mulai November 2015. Karakteristik gempabumi tersebut sama dengan karakteristik gempabumi swarm yang didefinisikan sebagai kenaikan jumlah gempabumi pada rentang waktu tertentu tanpa ada sebuah gempabumi yang besar dimana pada umumnya terjadi di daerah vulkanik atau di daerah patahan atau di daerah dimana terjadi konsentrasi stress (Mogi, 1963). Aktivitas terjadinya gempabumi swarm dapat mengalami peningkatan dan penurunan secara temporal dan belum ada model teoritis yang dapat menjelaskannya (Pasarelli dkk, 2015). Studi tentang gempabumi swarm sangat menarik karena karakteristik dan sumber penyebabnya yang seringkali tidak diketahui. Adanya tekanan yang bersifat sesaat diperkirakan menyebabkan terjadinya pelepasan energi secara spasial dan temporal selama terjadinya swarm (Pasarelli dkk, 2015).

Beberapa hal diajukan sebagai penyebab terjadinya gempabumi swarm, salah satunya adalah pelepasan energi regangan tektonik menengah yang terjadi diantara pelepasan energi regangan tektonik secara seketika pada saat gempabumi besar, *slow earthquake* dan *silent earthquake* (Peng & Gomberg, 2010). Sedangkan pada daerah subduksi *megathrust*, swarm cenderung terjadi secara berulang dan terjadi diantara area patahan gempabumi-gempabumi besar dan terjadi di area dengan akumulasi regangan interseismik yang rendah (Holtkamp & Brudzinski, 2014). Sementara, Waite dan Smith (2002) yang meneliti terjadinya gempabumi swarm di daerah Yellowstone pada tahun 1985 menyatakan bahwa gempabumi swarm di Yellowstone terjadi karena migrasi dari magma atau cairan *hydrothermal*.

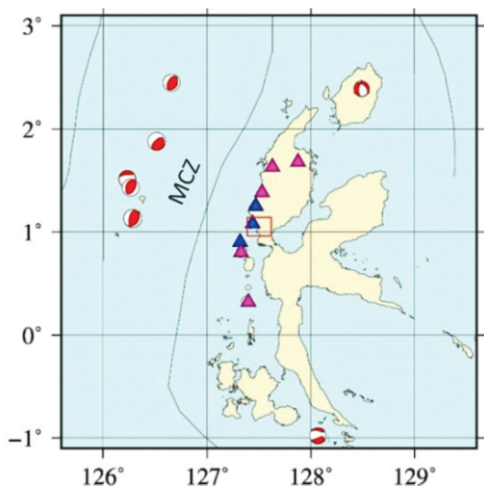
Hingga Desember 2015, sistem analisa gempabumi BMKG Pusat, Jakarta, telah mencatat terjadinya 96 gempabumi dengan magnitude terbesar 4,8 M. Dilaporkan ada 33 gempabumi yang dirasakan. Sementara BNPB pada tanggal 5 Desember 2015 memberikan pernyataan bahwa gempabumi swarm tersebut telah menyebabkan 1593 rumah rusak, dimana 145 rumah rusak berat, 273 rumah rusak sedang dan 1175 rumah rusak ringan. Kerusakan juga terjadi pada sarana umum seperti sekolah, tempat ibadah dan gedung pemerintahan. Intensitas terjadinya gempabumi swarm ini tercatat menurun pada bulan Desember 2015.

Berbeda dengan BMKG Pusat, Stasiun Geofisika BMKG di Ternate yang terletak di dekat pusat gempabumi, mencatat lebih banyak gempabumi

dengan menggunakan *single station*. Dilaporkan tercatat 1185 gempabumi dalam rentang waktu yang sama.

Pada penelitian ini penulis meneliti tentang distribusi terjadinya gempabumi swarm Jailolo dengan melakukan relokasi *hypocenter* gempabumi menggunakan data dari BMKG Pusat dengan metode *Modified Joint Hypocenter Determination* (MJHD). Penulis juga melakukan penghitungan variasi spasial *b-value* menggunakan data *single station* dari stasiun geofisika BMKG Ternate. Relokasi *hypocenter* dilakukan untuk meningkatkan akurasi *hypocenter* gempabumi, sedangkan penghitungan *b-value* dilakukan untuk mengetahui variasi spasial *b-value* di daerah penelitian. Penentuan *hypocenter* yang akurat dan penghitungan *b-value* akan bermanfaat untuk menganalisa fenomena gempabumi swarm dengan lebih baik.

Jailolo merupakan kecamatan yang terdapat di Kabupaten Halmahera Barat, propinsi Maluku Utara, kepulauan Halmahera (Gambar 1). Ditinjau dari kondisi tektonik, Kepulauan Halmahera terletak di Indonesia bagian timur dimana terdapat triple junction atau pertemuan antara tiga lempeng tektonik besar yaitu lempeng Eurasia, lempeng Philippine Sea dan lempeng Pasifik. Di sebelah barat kepulauan Halmahera juga terdapat tumbukan antar busur yang disebut dengan *Molucca Collision Zone* (MCZ). Kondisi tektonik yang kompleks ini menyebabkan wilayah ini sering mengalami gempabumi. Data dari ISC-GEM (Storchak dkk., 2013) mencatat tujuh gempabumi dengan magnitude > 6 pernah terjadi sejak tahun 1963 sampai tahun 2007 (Gambar 1). Sebagai akibat dari letaknya yang terdapat pada jalur tumbukan lempeng, wilayah ini memiliki rangkaian gunung api yang membujur dari utara ke selatan (Gambar 1). Banyaknya gunung api mempengaruhi kondisi geologi, dimana sebagian besar tersusun oleh endapan Aluvium, endapan sedimen Kuartar dan endapan gunung api Kuartar. Batuan-batuan tersebut sebagian terdiri dari lava dan sebagian telah mengalami pelapukan, bersifat urai, lepas, belum kompak (*unconsolidated*) dan bersifat memperkuat efek guncangan sehingga rawan terhadap guncangan gempabumi.



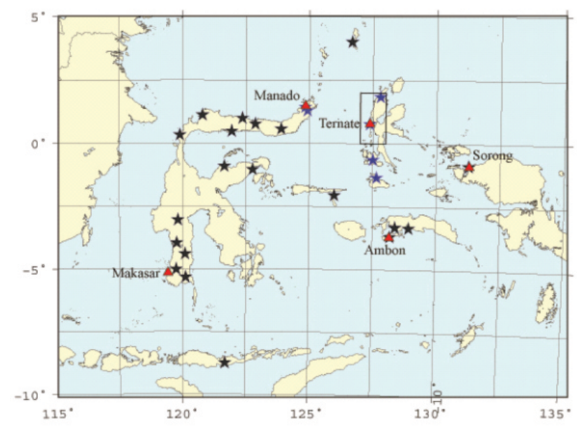
Gambar 1. Peta kepulauan Halmahera. Kotak merah menunjukkan wilayah Jailolo, kabupaten Halmahera Barat. Segitiga biru menunjukkan gunung api tipe B. Segitiga merah menunjukkan gunung api tipe A. Mekanisme fokal menunjukkan gempa bumi dengan $M > 6$ dari tahun 1963 sampai 2007. MCZ adalah *Molucca Collision Zone*. Koordinat gunung api diambil dari *Global Volcanism Program Smithsonian Institution* (lihat Daftar Pustaka).

Gunung api yang terdapat di kepulauan Halmahera ini memiliki dua tipe, yaitu tipe A dimana gunung api tersebut masih aktif dan tipe B dimana tidak ada catatan bahwa gunung api tersebut pernah mengalami erupsi sejak tahun 1600. Terdapat lima gunung api dengan tipe A, yaitu gunung Dukono, Ibu, Gamkonora, Gamalama dan Kie Besi (Gambar 1, dengan urutan utara ke selatan). Sedangkan gunung api dengan tipe B yang terletak paling dekat dengan wilayah Jailolo berjumlah tiga buah, yaitu gunung Todoko-Ranu, Jailolo dan Hiri (Gambar 1, dengan urutan utara ke selatan). Gunung Jailolo adalah gunung api yang terletak paling dekat dengan pusat gempa bumi swarm yang terjadi.

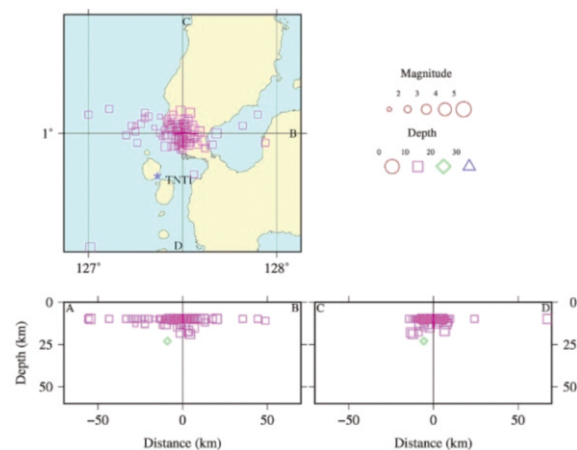
2. Metodologi Penelitian

2.1. Relokasi Gempabumi

Data. Pada penelitian ini penulis menggunakan data waktu tiba gelombang P dan S gempa bumi swarm Jailolo yang diambil dari BMKG Pusat (Gambar 3). Penulis menggunakan data gempa bumi mulai tanggal satu November 2015 sampai dengan tanggal 31 Desember 2015 dengan jumlah 96 gempa bumi (Gambar 3). Penulis hanya menggunakan gempa bumi dangkal, yaitu dengan kedalaman ≤ 60 km, serta terjadi pada batasan area $0^\circ - 2^\circ$ LU dan $127^\circ - 128^\circ$ BT.



Gambar 2. Distribusi stasiun seismik yang digunakan dalam relokasi *hypocenter* gempa bumi. Simbol bintang menandakan stasiun seismik yang digunakan dalam relokasi. Simbol bintang berwarna hitam menunjukkan stasiun hanya dengan catatan gelombang P. Simbol bintang berwarna biru menunjukkan stasiun dengan catatan gelombang P dan S. Persegi empat menunjukkan daerah penelitian. Simbol segitiga merah menunjukkan kota besar.



Gambar 3. Lokasi gempa bumi swarm hasil analisa BMKG Pusat dan penampang melintang A-B dan C-D.

Gambar 3 menunjukkan 78 gempa bumi dari 96 gempa bumi susulan yang dicatat BMKG memiliki kedalaman 10 km, dimana kedalaman ini merupakan *fixed depth* yang didapat karena sistem yang digunakan untuk menganalisa gempa bumi tidak dapat menghitung kedalaman gempa bumi tersebut dikarenakan beberapa faktor seperti jaringan stasiun pencatat yang kurang baik.

Metode. Penulis melakukan relokasi *hypocenter* gempa bumi dengan menggunakan metode *Modified Joint Hypocenter Determination* (MJHD). Metode MJHD dikembangkan oleh Hurukawa dan Imoto (1990, 1992) untuk gempa bumi lokal dan Hurukawa (1995) untuk gempa bumi global. Metode MJHD

merupakan pengembangan dari metode *Joint Hypocenter Determination* (JHD) yang ditemukan oleh Douglas (1967) dan Freedman (1967).

Metode JHD merupakan metode yang digunakan untuk merelokasi satu grup gempabumi secara simultan dan menghasilkan koreksi stasiun. Koreksi stasiun digunakan untuk memperbaiki lokasi *hypocenter* dengan menghilangkan efek heterogenitas lateral dan menunjukkan perbedaan antara asumsi model kecepatan 1D yang digunakan dengan struktur bawah permukaan yang sesungguhnya (Hurukawa dkk, 2014). Akan tetapi pada beberapa kasus, misalnya ketika lingkup stasiun pencatat tidak baik, ditemukan bahwa metode JHD tidak mendapatkan hasil yang dapat diandalkan sehingga dikembangkan MJHD untuk mengatasi permasalahan ini dan mendapatkan hasil yang lebih baik.

Persamaan yang digunakan dalam metode MJHD adalah:

$$\begin{aligned}(O - C)_{ij} &= (t_{ij} - T_{0j}) - T_{ij} \\ &= \frac{\partial t_{ij}}{\partial \lambda_j} d\lambda_j + \frac{\partial t_{ij}}{\partial \varphi_j} d\varphi_j \\ &\quad + \frac{\partial t_{ij}}{\partial Z_j} dZ_j + dT_{0j} + dS_i\end{aligned}$$

dimana, O adalah waktu tempuh yang diamati (*observed travel time*), C adalah waktu tempuh yang diperhitungkan (*calculated travel time*), adalah residu waktu tempuh dari kejadian gempabumi ke- j di stasiun i , adalah waktu tiba dari kejadian gempabumi ke- j di stasiun i , adalah waktu tempuh yang dihitung dari kejadian gempabumi ke- j di stasiun i , adalah waktu terjadinya gempabumi ke- j , adalah koreksi stasiun di stasiun i , , , dan adalah koreksi untuk percobaan *hypocenter* dari kejadian gempabumi ke- j .

Pada MJHD ditambahkan empat konstrain untuk mengatasi masalah *trade-off* antara lokasi *hypocenter* dengan koreksi stasiun yang menyebabkan hasil relokasi JHD tidak *reliable*.

Konstrain terhadap kedalaman membuat koreksi stasiun tidak bergantung pada jarak antara pusat studi dengan stasiun yang digunakan.

$$\sum_{i=1}^n S_i D_i = 0$$

Konstrain terhadap *epicenter* membuat koreksi stasiun tidak bergantung pada azimuth antara pusat studi dengan stasiun yang digunakan.

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n S_i \cos \theta_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n S_i \sin \theta_i &= 0\end{aligned}$$

dan penjumlahan semua koreksi stasiun harus sama dengan nol.

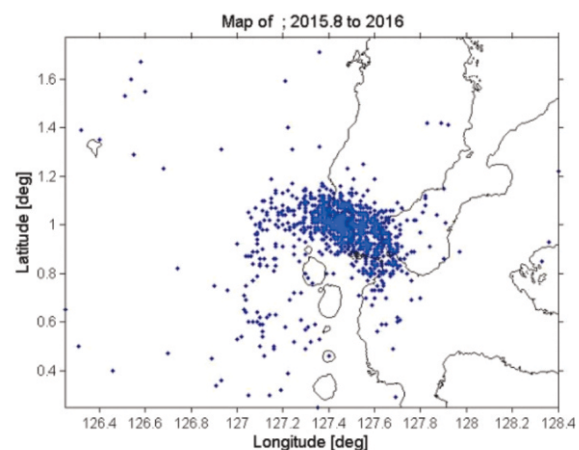
$$\sum_{i=1}^n S_i = 0$$

dimana adalah koreksi stasiun di stasiun i , adalah jarak antara stasiun i dan pusat daerah studi, adalah azimuth stasiun i dari pusat daerah studi dan n adalah jumlah stasiun.

2.2. Penghitungan Nilai b (b -value)

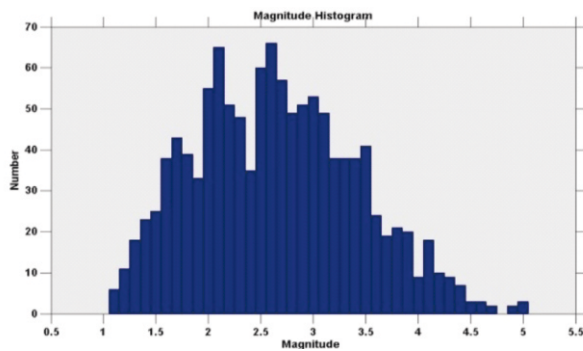
Data. Data yang digunakan pada penghitungan nilai b -value berbeda dengan data yang digunakan pada relokasi gempabumi. Data yang digunakan adalah data mikroseismik dari stasiun geofisika Ternate dengan penentuan gempabumi menggunakan *single stasiun* sehingga data ini tidak dapat digunakan untuk relokasi gempabumi.

Stasiun geofisika Ternate mencatat 1185 gempabumi mikro mulai tanggal 1 November 2015 sampai 31 Desember 2015 (Gambar 4). Batasan area pada studi ini adalah $126^\circ \text{ BT} - 128,5^\circ \text{ BT}$ dan $0^\circ \text{ LU} - 2^\circ \text{ LU}$. Gempabumi tersebut memiliki magnitude terkecil $M 1,1$ dan magnitude terbesar $M 5,1$ (Gambar 5).



ZMAP 10-Mar-2016

Gambar 4. Gempabumi swarm yang tercatat di Stasiun Geofisika BMKG wilayah Ternate.



Gambar 5. Histogram magnitudo gempabumi dengan jumlah kejadian gempabumi.

Distribusi kedalaman yang terjadi pun tercatat sangat dangkal dimana sebagian besar gempabumi terjadi pada kedalaman 10 km.

Metode. Nilai b (b -value) merupakan hubungan antara frekuensi dan magnitudo gempabumi. Ditunjukkan dengan persamaan, dimana N adalah frekuensi gempabumi, adalah konstanta yang menunjukkan produktivitas gempabumi dan adalah konstanta yang menunjukkan distribusi kekuatan gempabumi. Pada kurva frekuensi dan distribusi magnitudo, b -value ditunjukkan oleh kemiringan kurva.

Banyak penelitian sudah dilakukan untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi nilai b -value. Daerah vulkanik memiliki nilai b -value yang tinggi (1,0 sampai 3,0), dimana nilai b tinggi pada kedalaman 7-10 km dimana gempabumi dihasilkan karena aktivitas magma (Farrel, dkk.,2009). Pada daerah tektonik, nilai b berkisar 1,0 (Frolich dan Davis, 1993). Farrel, dkk (2009) mengatakan bahwa nilai b kemudian dapat dijadikan “stressmeter”, dimana nilai b yang kecil menunjukkan tekanan stress yang tinggi dan gempabumi yang terjadi pada daerah tersebut pun akan memiliki kekuatan yang besar, seperti pada gempabumi Parkfield, California tahun 2004 dengan magnitudo 6,0 (Wiemer dan Wyss, 1997; Schorlemmer dan Wiemer, 2005). Nilai b yang tinggi menunjukkan stress yang terjadi di suatu daerah tidak terlalu besar, dicirikan dengan seringnya terjadi gempabumi namun dengan kekuatan kecil-kecil seperti pada daerah vulkanik atau lapangan geothermal.

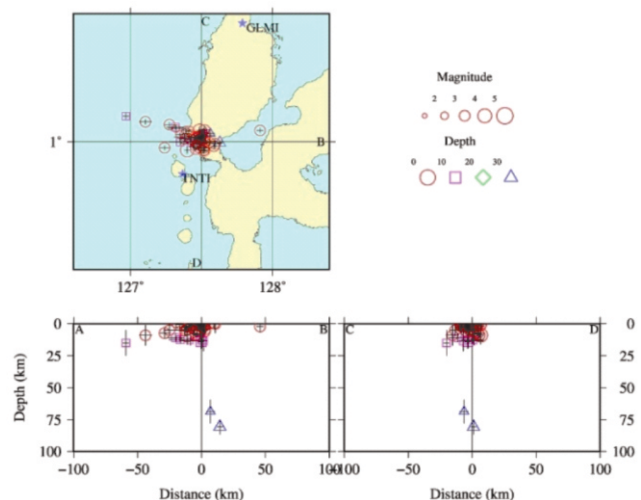
Program ZMAP (Wiemer, 2001) digunakan untuk menghitung variasi spasial nilai b dengan metode *maximum-likelihood* dan menghitung *magnitude of completeness* (M_c). Parameter yang digunakan dalam menjalankan program ZMAP adalah jumlah data gempabumi 1185, *sampling* $0,02^\circ \times 0,02^\circ$ grid, kejadian gempabumi minimum (N_{min}) dengan $M \geq M_c$ adalah 10 gempabumi.

3. Hasil Dan Pembahasan

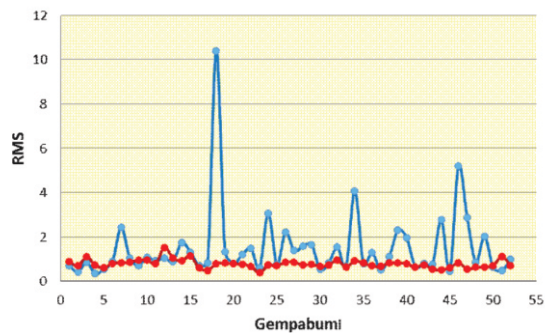
Relokasi Gempabumi. Penulis melakukan relokasi *hypocenter* gempabumi menggunakan gelombang P dan gelombang S dengan metode MJHD. Parameter yang digunakan sebagai input dalam proses relokasi adalah *Minimum Number of Earthquake* (MEQ), yaitu jumlah minimal gempabumi yang tercatat pada satu stasiun dan *Minimum Number of Station* (MNST), yaitu jumlah minimal stasiun yang mencatat satu gempabumi. Dengan menentukan batas terkecil pada residu *travel time*, $(O-C)_{max}$, data yang memiliki $(O-C)$ lebih besar atau sama dengan $(O-C)_{max}$ tidak akan digunakan pada proses relokasi.

Pada proses relokasi, kami menentukan nilai MEQ, MNST dan $(O-C)_{max}$ adalah 7, 7 dan 2 detik. Kami menggunakan 28 stasiun dimana enam stasiun diantaranya mencatat gelombang P dan S (Gambar 2). Sebaran stasiun pencatat yang melingkupi episenter gempabumi yang terjadi berpengaruh besar pada hasil relokasi yang akurat.

Penulis berhasil merelokasi 52 gempabumi (Gambar 6). Sejumlah 44 gempabumi dikeluarkan pada saat proses relokasi, dimana hal ini terjadi karena gempa-gempa tersebut tidak memenuhi batasan MEQ, MNST dan $(O-C)_{max}$ yang ditentukan.



Gambar 6. Lokasi gempabumi hasil relokasi menggunakan metode MJHD. Simbol-simbol yang ada sama dengan gambar 3. Tanda plus menunjukkan standar error untuk hypocenter.



Gambar 7. Perbandingan *Root Mean Square (RMS)* data gempabumi sebelum dan sesudah proses relokasi. Garis biru menunjukkan RMS data gempabumi BMKG. Garis merah menunjukkan RMS data gempabumi hasil relokasi MJHD.

Setelah proses relokasi, terjadi perbaikan yang signifikan pada parameter gempabumi terutama pada distribusi kedalaman. Parameter gempabumi setelah relokasi menunjukkan bahwa sebagian besar memiliki kedalaman yang sangat dangkal, yaitu kurang dari 20 km (Gambar 6). Hal ini menjelaskan tentang banyaknya gempabumi yang dirasakan dan merusak walaupun magnitudenya kecil.

Perbaikan yang dihasilkan setelah proses relokasi juga ditunjukkan pada grafik perbandingan RMS (Gambar 7). Data gempabumi sebelum direlokasi memiliki nilai RMS yang kurang baik, dimana banyak data memiliki nilai RMS lebih dari dua. Sedangkan data gempabumi setelah proses relokasi mengalami perbaikan dengan sebagian besar data memiliki nilai RMS kurang dari satu. Perbaikan yang signifikan terjadi pada data dengan RMS sebelum relokasi sebesar 10,4 dan RMS setelah relokasi menjadi 0,8.

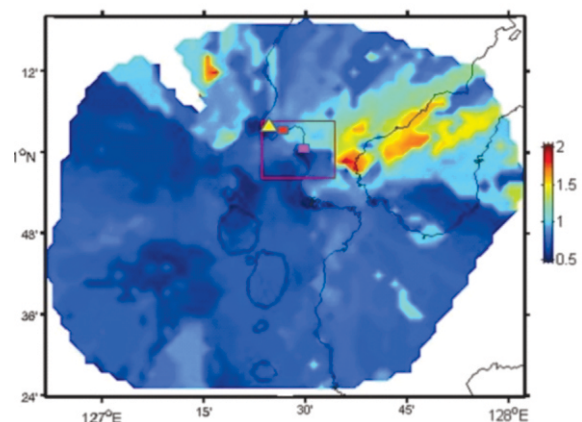
Data hasil relokasi menunjukkan adanya pengelompokan gempabumi yang terjadi pada area antara 127,4° - 127,6° BT (Gambar 6). Dimana area tersebut secara geografis merupakan kecamatan Jailolo. Hasil dari relokasi gempabumi ini dapat dijadikan bahan acuan untuk menyelidiki lebih lanjut penyebab terjadinya gempabumi swarn terutama pada daerah dimana terjadi pengelompokan gempabumi.

Variasi Spasial *b-value*. Daerah Jailolo, Halmahera Barat terletak di sebelah timur *Molucca Sea Collision Complex*. Pada daerah dengan tingkat stress yang tinggi seperti yang terjadi pada pertemuan lempeng, nilai *b*-nya akan cenderung rendah (<1) karena adanya stress yang tinggi. Namun aktivitas vulkanik ditandai dengan adanya beberapa gunung yang terletak di sekitar wilayah Jailolo dapat mempengaruhi *b-value* di wilayah ini menjadi lebih tinggi (>1).

Hubungan antara gempabumi dan aktivitas vulkanik telah dijelaskan pada beberapa penelitian sebelumnya. Mogi (1963) menjelaskan bahwa konsentrasi gempabumi swarm sering dihubungkan dengan aktivitas vulkanik atau daerah rekahan dimana terdapat konsentrasi stress, seperti adanya intrusi magma. Waite dan Smith (2002) yang meneliti terjadinya gempabumi swarm di daerah Yellowstone pada tahun 1985 juga menyatakan bahwa gempabumi swarm di Yellowstone terjadi karena migrasi dari magma atau cairan *hydrothermal*. Cairan *hydrothermal* bermigrasi melalui rekahan yang sudah ada sebelumnya di daerah tersebut. Garcia, dkk (2016) juga menyebutkan bahwa intrusi magma dapat menghasilkan kumpulan stress yang meningkat dalam waktu yang relative singkat.

Pada gambar 8, kotak merah menunjukkan daerah dimana gempabumi menjadi lebih terkonsentrasi setelah dilakukan relokasi *hypocenter*. Nilai *b-value* pada daerah ini memiliki nilai yang berbeda di bagian utara dan selatan. Di bagian selatan, *b-value* cenderung rendah dengan nilai < 1 ditunjukkan dengan warna biru tua.

Sedangkan di bagian utara dimana hasil relokasi gempabumi sedikit lebih terkonsentrasi daripada di bagian selatan, memiliki *b-value* yang cenderung lebih tinggi yaitu dengan nilai ± 1 yang ditunjukkan dengan warna biru muda. Nilai *b* yang tinggi di sebelah utara, dapat diasosiasikan dengan adanya gunung api Jailolo karena letak gunung api tersebut yang paling dekat dengan pusat gempabumi.



Gambar 8. Variasi spasial *b-value* pada daerah Halmahera Barat. Kotak merah menunjukkan daerah dimana gempabumi menjadi lebih terkonsentrasi setelah relokasi *hypocenter*. Simbol kotak warna merah solid menunjukkan daerah Galala. Simbol kotak warna merah muda solid menunjukkan daerah Guaeria. Simbol segitiga warna kuning solid menunjukkan gunung Jailolo.

Hasil pada penelitian ini juga sesuai dengan pengamatan di lapangan yang dilakukan oleh staf stasiun geofisika BMKG Ternate dimana mereka menemukan adanya beberapa rekahan di daerah Galala dan Guaeria. Daerah Galala dan Guaeria terletak di daerah dengan nilai b tinggi (Gambar 8).

4. Kesimpulan

Hasil relokasi pada grup gempabumi swarm ini menghasilkan perbedaan yang jelas antara distribusi gempabumi sebelum dan setelah relokasi. Perbaikan yang signifikan terjadi pada kedalaman gempabumi dimana sebagian mengalami perbaikan kedalaman menjadi sangat dangkal dengan kedalaman kurang dari 20 km. Distribusi episenter gempabumi juga menunjukkan terjadinya konsentrasi gempabumi pada area $127,4^{\circ}$ - $127,6^{\circ}$ BT.

Hasil penghitungan b -value menunjukkan bahwa di daerah Jailolo, terutama daerah dimana gempabumi swarm lebih terkonsentrasi setelah dilakukan relokasi *hypocenter*, memiliki nilai b -value yang cenderung tinggi (± 1). Berdasarkan penelitian-penelitian tentang b -value, nilai b -value yang tinggi ini menunjukkan adanya aktifitas vulkanik di daerah tersebut. Hasil ini sesuai dengan pengamatan yang dilakukan di lapangan yang menemukan adanya beberapa rekahan di daerah Galala dan Guaeria yang terletak di daerah dengan nilai b tinggi.

Dari penelitian ini, penulis menarik kesimpulan bahwa gempabumi swarm yang terjadi di daerah Jailolo, Halmahera Barat, dipengaruhi oleh adanya aktifitas vulkanik. Namun, diharapkan akan adanya penelitian-penelitian lebih lanjut menggunakan data dengan kuantitas dan kualitas yang lebih baik untuk lebih mengetahui penyebab dan karakteristik gempabumi swarm tersebut. Penentuan mekanisme fokal untuk gempabumi swarm ini juga akan sangat membantu dalam memahami mekanisme gempabumi yang terjadi.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Stasiun Geofisika BMKG Ternate atas data gempabumi yang penulis gunakan dalam penelitian ini dan kepada tim survei gempabumi swarm Jailolo dari Balai Besar BMKG Makasar dan Stasiun Geofisika BMKG Ternate.

Daftar Pustaka

- [1] Douglas, A., "Joint Hypocenter Determination," *Nature*, 215, 47-48, 1967.
- [2] Farrell, J., Stephan Husen dan Robert B. Smith, "Earthquake swarm and b -value Characterization of the Yellowstone Volcano-Tectonic System", *Jurnal of Volcanologi and Geothermal Research* 188 (2009) 260-276, 2009.
- [3] Freedman, H. W., "A Statistical Discussion of P Residuals from Explosions Part II", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 57, 545-561, 1967.
- [4] Frolich, C. dan Davis, S., "Teleseismic b -values: or much ado about 1.0". *J. Geophys. Res.* 98, 631-644, 1993.
- [5] Garcia, A., S. D. L. Cruz-Reyna, J. M. Marrero, dan R. Ortiz, "Short-Term Volcano-Tectonic Earthquake Forecasts Based on a Moving Recurrence Time Algorithm: the El Hierro Seimo-Volcanic Crisis Experience", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 1135-1144, 2016. doi:10.5194/nhess-16-1135-2016.
- [6] Holtkamp, S., dan Brudzinski, M.R., "Megathrust Earthquake Swarms Indicate Frictional Changes Which Delimitate Large Earthquake Ruptures", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 390, 234-243, 2014.
- [7] Hurukawa, N., "Quick Aftershock Relocation of the 1994 Shikotan Earthquake and its fault plane", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3159-3162, 1995.
- [8] Hurukawa, N., dan M. Imoto, "Fine Structure of an Underground Boundary between the Philippine Sea and Pacific Plates beneath the Kanto District", *Japan, Zisin*, 43, 413-429, 1990 (In Japanese with English abstract).
- [9] Hurukawa, N., dan M. Imoto, "Subducting Oceanic Crust of the Philippine Sea and Pacific Plates and weak-zone-normal compression in the Kanto District, Japan", *Geophys. J. Int.*, 109, 639-652, 1992.
- [10] Hurukawa, N., B. R. Wulandari, M. Kasahara, "Earthquake History of the Sumatran Fault, Indonesia, since 1982 Derived from Relocation of Large Earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104, 1750-1762, 2014, doi:10.1785/0120130201.
- [11] Mogi, K., "Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms — the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena", 3. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* 41, 615-658, 1963.
- [12] Pasarelli, L., Hainzi, S., Cesca, S., Maccaferri, F., Mucciarelli, M., Roessler, D., Corbi, F., Dahm, T., Rivalta, E., "Aseismic Transient Driving the Swarm-Like Seismic Sequence in

- the Pollino Range, Southern Italy”, *Geophys. J. Int.*, 201, 3, p. 1553-1567, 2015.
- [13] Peng, Z., dan Gomberg, J., “An Integrated Perspective of the Continuum Between Earthquakes and Slow-Slip Phenomena”, *Nat. Geosci.*, 3(9), 599-607, 2010.
- [14] Schorlemmer, D. dan Wiemer, S., “Microseismicity Data Forecast Rupture Area”, *Nature*, 434, 1086, 2005.
- [15] Storchak, D. A., D. Di Giacomo, I. Bondar, E. R. Engdahl, J. Harris, W. H. K. Lee, A. Villasenor, dan P. Bormann, “Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)”, *Seismo. Res. Lett.*, 84, 810-815, 2013, doi:10.1785/0220130034.
- [16] Waite, Gregory P. dan Smith, Robert B., “Seismic evidence for fluid migration accompanying subsidence of the Yellowstone caldera”, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No. B9, 2177, doi:10.1029/2001JB000586, 2002.
- [17] Wiemer, S., “A software package to analyze seismicity: ZMAP”, *Seismol. Res. Lett.* 72, 373–382, 2001.
- [18] Wiemer, S. dan Wyss, M., “Mapping the frequency–magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times?”, *J. Geophys. Res.* 102, 15115–15128, 1997.
- [19] Badan Nasional Penanggulangan Bencana. “1.593 Rumah Rusak Akibat Gempa 833 Kali di Halmahera Barat.”, internet: <http://www.bnpb.go.id/berita/2744/1593-rumah-rusak-akibat-gempa-833-kali-di-halmahera-barat>, diakses 7 April 2016.
- [20] Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism Program, “Database Search”, internet: http://volcano.si.edu/search_volcano.cfm, diakses 28 Mei 2016.