

# Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Pemodelan Kecepatan 1D Hasil Relokasi Hiposentrum Gempa di Pulau Lombok, Gunung Sinabung, dan Jailolo

Abraham Arimuko<sup>1,\*</sup>, Bayu M.T.F. Nanda<sup>2</sup> dan Rasmid<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Tangerang Selatan 15221, Indonesia

<sup>2</sup>Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Ternate, Indonesia

<sup>3</sup>Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Kota Bandung 40161, Indonesia

\*Email: abraham.arimuko@stmkkg.ac.id

Submit: 2020-11-23; Revised: 2020-12-30; Accepted: 2021-01-03

**Abstrak:** Makalah ini membahas struktur bawah permukaan berdasarkan profil kecepatan gelombang seismik 1D di Pulau Lombok yang berasosiasi dengan aktivitas gempa, Gunung Sinabung yang berasosiasi dengan aktivitas erupsi, dan Jailolo yang berasosiasi dengan aktivitas swarm atau gempa tremor. Profil kecepatan gelombang 1D diperoleh dengan cara melakukan relokasi hiposenter gempa menggunakan teknik Coupled Hypocenter-Velocity. Sebagai parameter kecepatan awal, kami menggunakan model kecepatan global IASP91 dan AK135, serta model kecepatan lokal di wilayah Indonesia dari Koulakov dkk. (2007) dan Shohaya dkk. (2014). Hasil relokasi hiposentrum gempa-gempa tektonik di Pulau Lombok dan vulkanik di Gunung Sinabung diperoleh magnitudo masing-masing sebesar ML 2,5 hingga Mw 7,0 dan  $2,8 \leq ML < 4,2$ . Sementara itu, relokasi data gempa swarm periode September 2017 di Jailolo diperoleh magnitudo ML 1-4,5. Dari hasil relokasi hiposentrum gempa dan pemodelan kecepatan gelombang seismik 1D dapat disimpulkan, adanya zona kecepatan tinggi di bawah Pulau Lombok pada kedalaman 50 km. Selain itu, zona kecepatan rendah terdapat di bawah Gunung Sinabung dan Jailolo yang diduga berasosiasi dengan bahan fluida panas (hot-fluid material) yang boleh jadi merupakan magma cair.

**Kata kunci:** tektonik, vulkanik, swarm, relokasi, hiposentrum

*Abstract: This paper discusses subsurface structures based on 1D seismic wave velocity profiles on Lombok Island that are associated with earthquake activities, Mount Sinabung that are associated with eruptive activities, and Jailolo that are associated with swarm earthquake or tremor activities. The 1D wave velocity profiles are obtained by relocating the earthquake hypocenter using the Coupled Hypocenter-Velocity technique. As initial velocity parameters, we use the IASP91 and AK135 global velocity models, as well as the local velocity models in the Indonesian region from Koulakov et al. (2007) and Shohaya et al. (2014). The relocation of the tectonic earthquake's hypocenter result in Lombok Island and the volcanic earthquakes in Mount Sinabung were obtained with respective magnitudes of ML 2.5 to Mw 7.0 and  $2.8 \leq ML < 4.2$ . Meanwhile, the relocation of earthquake swarm data for September 2017 in Jailolo*

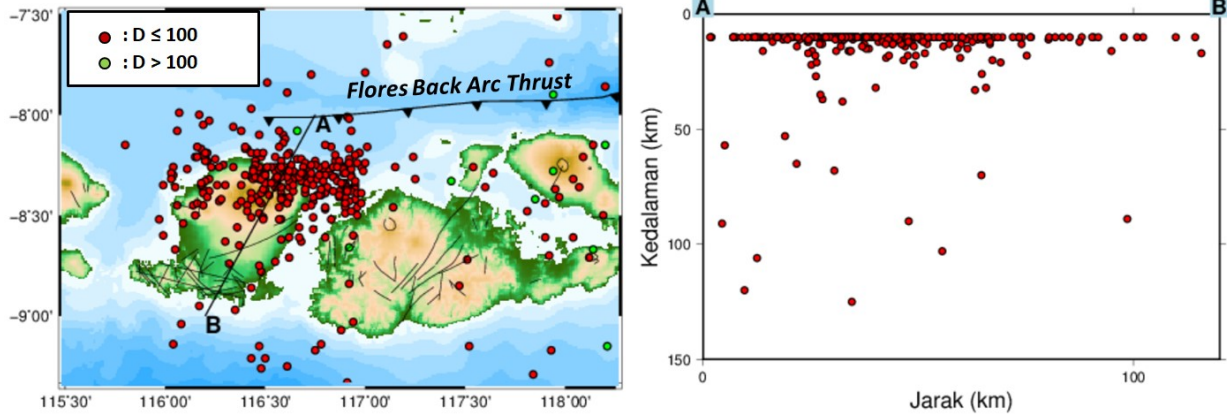
*had obtained magnitudes of ML 1-4.5. The earthquake hypocenter relocation results and 1D seismic wave velocity models can be concluded, there is a high-velocity zone under Lombok Island at 50 km of depth. Besides, low-velocity zones are occurred beneath Mount Sinabung and Jailolo that are thought to be associated with hot-fluid material, possibly a liquid magma.*

**Keywords:** tectonic, volcanic, swarm, relocation, hypocenter

## 1 PENDAHULUAN

Belum ada penelitian yang membandingkan model kecepatan awal yang sesuai untuk digunakan di Pulau Lombok, Gunung Sinabung, dan Jailolo. Namun, penelitian yang membahas aktivitas seismik di Pulau Lombok akibat Flores Back Arc Thrust telah dilakukan oleh Sasmi dkk. (2020) dan Suspendi dkk. (2020). Pembahasan aktivitas seismik VT (Volcano Tectonic) Gunung Sinabung telah dilakukan sebelumnya dari Arimuko dkk. (2018) dan McCausland dkk. (2019). Aktivitas gempa swarm di Jailolo juga telah dibahas oleh Passarelli dkk. (2018) dan Wibowo dkk. (2018). Berdasarkan penelitian sebelumnya, belum ada yang membahas model kecepatan lokal di Jailolo Passarelli dkk. (2018). Berdasarkan hal tersebut, kajian struktur bawah permukaan dengan memanfaatkan hasil relokasi gempa bumi perlu untuk dilakukan. Proses relokasi menggunakan perangkat lunak Velest 3.3 dalam proses komputasi menggunakan metode Coupled Hypocenter-Velocity (Kissling dkk., 1995). Model kecepatan global (IASP91 dan AK135) dan model kecepatan lokal di wilayah Indonesia dari Koulakov dkk. (2007) serta Shohaya dkk. (2014) yang digunakan sebagai parameter awal untuk mendapatkan kecepatan gelombang P dan S 1-D di wilayah penelitian.

Letak hiposentrum gempa bumi yang diperoleh dari parameter yang dikeluarkan dalam waktu 5 menit setelah kejadian gempa bumi bukan hasil yang menekankan ketepatan hiposentrum, melainkan untuk keperluan mitigasi. Selain itu, kompleksitas pola kegempaan dan tatanan tektonik mengakibatkan identifikasi hiposentrum tidak dapat diten-



Gambar 1. Distribusi hiposentrum gempa tektonik di wilayah Pulau Lombok dan sekitarnya sebelum dilakukan relokasi.

tukan secara tepat (Ratchkovsky dkk., 1998). Oleh karena itu, diperlukan studi relokasi gempa bumi untuk menentukan posisi hiposentrum yang lebih presisi untuk dapat mengetahui model kecepatan awal yang dipengaruhi struktur geologi (Kissling dkk., 1995). Data waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S telah melewati quality control oleh operator sebelum dimasukan ke data repository. Hasil pic-picking yang baik akan meningkatkan presisi penentuan hiposentrum (Musumeci dkk., 2002). Hasil ini akan dikorelasikan dengan metode dan hasil penelitian. Pada penelitian ini, diharapkan dapat menentukan hiposentrum dengan lebih tepat, kemudian dapat menentukan kondisi bawah permukaan berdasarkan nilai kecepatan gelombang P dan gelombang S. Perubahan kecepatan menunjukkan pelapisan struktural bawah permukaan sehingga model kecepatan tersebut dapat mendukung penentuan hiposentrum yang lebih presisi.

## 2 DATA DAN METODE

### 2.1 Data

Penelitian ini dilakukan pada tiga wilayah dengan memanfaatkan jaringan seismograf Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang tersebar di seluruh Indonesia. Pada wilayah Lombok dan sekitarnya, digunakan data waktu kedatangan gelombang seismik dari rangkaian kejadian gempa tektonik sejak 1 Agustus hingga 31 Oktober 2018 dengan koordinat 7,5-10°LS dan 115,5-119,3°BT (Gambar 1). Di kawasan Gunung Sinabung, digunakan data waktu kedatangan gempa vulkanik sejak 1 Januari hingga 28 Februari 2017 pada koordinat 3,0931-3.3543°LU dan 98.2928-98.6202°BT (Gambar 2). Data waktu kedatangan dari jaringan seismograf BMKG disimpan dan dapat diakses di Repositori BMKG (<http://172.19.3.54/query.php>) yang terhubung server jaringan InaTEWS. Sedangkan untuk data waktu kedatangan di wilayah Jailolo, data diperoleh dari jaringan sementara 7G milik Geo Forschungs Zentrum-Potsdam (GFZ) yang dipasang khusus untuk memantau aktivitas gempa swarm di Jailolo sejak 12 Agustus 2016 sampai 15 Juli 2017 pada koordinat 0,5-1,5°LU dan 127-128°BT (Gambar 3). Ketiga wilayah ini dipilih karena distribusi stasiun yang baik dan kejadian gempa bumi tersebut diperki-

rakan berasal dari sumber yang sama pada masing-masing wilayah studi.

### 2.2 Metode

Waktu kedatangan pengamatan gelombang seismik berupa fungsi nonlinier koordinat stasiun ( $s$ ), parameter hiposentrum ( $h$ , termasuk waktu kejadian dan koordinat lintang-bujur), dan kecepatan lintasan ( $v$ ) (Kissling dkk., 1994).

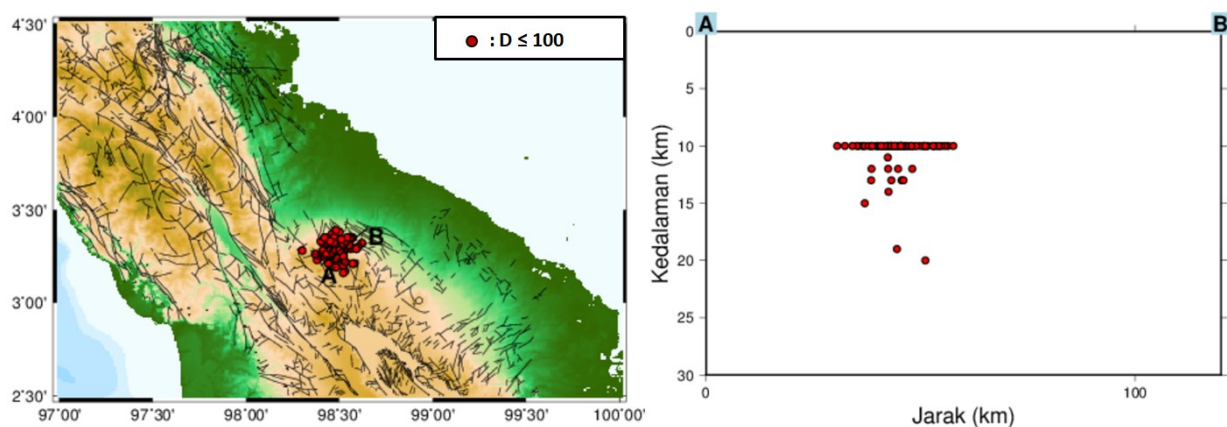
$$t_{obs} = f(s, h, v) \tag{1}$$

Metode Coupled Hypocenter-Velocity dapat dikatakan sebagai metode mutlak karena penghitungan ulang posisi hiposentrum menghasilkan model kecepatan yang baru. Prinsip perhitungan dengan metode Coupled Hypocenter-Velocity adalah mencari selisih terkecil antara waktu tempuh pengamatan ( $t_{obs}$ ) dengan waktu tempuh perhitungan ( $t_{cal}$ ). Hubungan linear antara selisih waktu tempuh ( $\Delta t_{ij}$ ) dengan parameter hiposentrum ( $\Delta h_k$ ) dan kecepatan ( $\Delta v_i$ ) diperoleh dengan pendekatan ekspansi deret Taylor dari Kissling dkk. (1994) yang ditambahkan variabel koreksi stasiun:

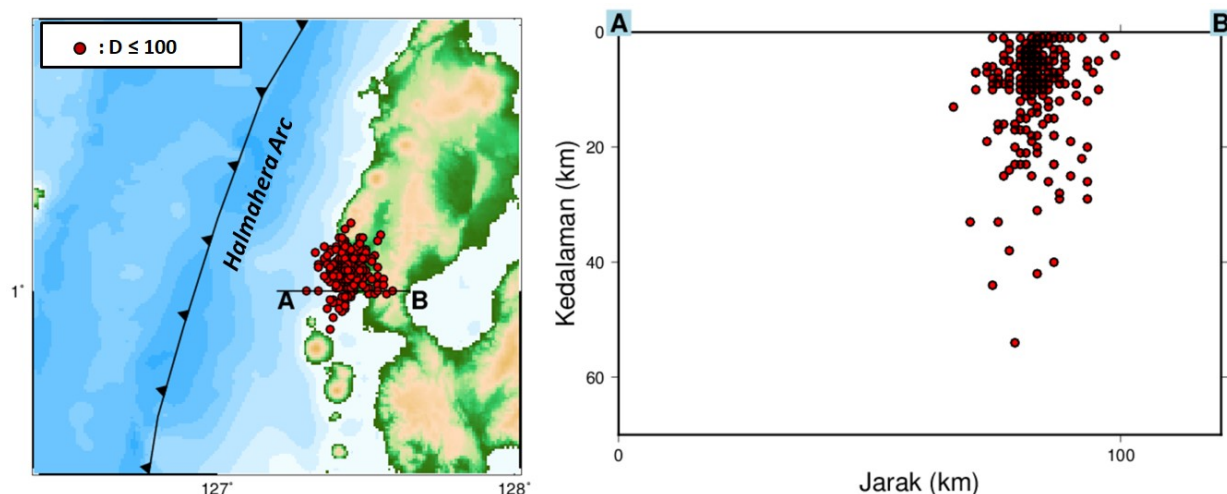
$$\Delta t_{ij} = t_{obs} - t_{cal} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial s_j} \Delta s_j + \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial v_i} \Delta v_i + e \tag{2}$$

dengan ( $\Delta s_j$ ) merupakan koreksi stasiun ke- $j$ ,  $i$  adalah indeks gempa bumi,  $j$  adalah indeks stasiun,  $k$  adalah bilangan kecepatan gelombang seismik pada setiap lapisan,  $m$  adalah jumlah stasiun, serta  $n$  adalah jumlah kejadian gempa bumi. Perhitungan model kecepatan 1D dan koreksi stasiun hasil inversi menunjukkan informasi geologi (Kissling dkk., 1995). Hal ini berbeda dengan metode Joint Hypocenter Determination (JHD) yang mengasumsikan tidak ada koreksi stasiun, sehingga nilai  $\sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial s_j} \Delta s_j = 0$  (Kissling dkk., 1994).

Data waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S menjadi informasi awal untuk melakukan relokasi. Model kecepatan awal global (Tabel 1) dan lokal (Tabel 2) sebagai



**Gambar 2.** Distribusi hiposentrum gempa vulkanik di kawasan Gunung Sinabung sebelum dilakukan relokasi.



**Gambar 3.** Distribusi hiposentrum gempa swarm di wilayah Jailolo sebelum dilakukan relokasi.

informasi untuk perhitungan posisi hiposentrum baru. Proses perhitungan menggunakan perhitungan inversi matriks linear (Kissling dkk., 1995). Perhitungan inversi ini akan dihentikan pada iterasi tertentu yang akan mendapat nilai RMS terkecil. Hasil dari proses ini adalah parameter koreksi stasiun, hiposentrum akhir, dan kecepatan lokal gelombang P serta gelombang S. Namun analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah kecepatan lokal gelombang seismik (P dan S) dan parameter hiposentrum akhir beserta RMS hasil perhitungan relokasi.

### 2.3 Tektonik Wilayah Studi

Terjadinya gempa bumi sangat erat kaitannya dengan struktur tektonik dan struktur geologi suatu daerah. Menurut Hamilton (1979), sebagian besar kepulauan Nusa Tenggara dibentuk oleh zona subduksi lempeng Indo-Australia yang berada tepat di bawah busur Sunda-Banda. Hal ini mengakibatkan kawasan tersebut menjadi salah satu kawasan dengan tingkat gempa bumi yang tinggi di Indonesia. Hamilton (1988) menjelaskan ciri-ciri sistem subduksi terdapat outer bow back, sea trough, zona Benioff, outer arc basin, dan mountain path. Wilayah Nusa Tenggara memiliki sesar na-

ik belakang busur kepulauan yang dikenal sebagai back arc thrust. Struktur ini terjadi sebagai reaksi terhadap tekanan yang timbul pada busur kepulauan Nusa Tenggara Barat karena adanya tumbukan antara busur tersebut dengan dorongan lempeng Indo-Australia (Silver dkk., 1986).

Di utara terdapat struktur tektonik sesar naik busur belakang pulau. Setelah mengalami fase dorman selama lebih dari 400 tahun, Gunung Sinabung telah melakukan aktivitas vulkaniknya. Terdapat gempa bumi dengan magnitudo kecil ( $2,8 \leq ML < 4,2$ ) di kawasan Gunung Sinabung yang merupakan aktivitas seismik VT (Volcano Tectonic) (McCausland dkk., 2019). Kejadian gempa bumi tersebut tercatat di stasiun seismograf Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Gempa bumi di wilayah Jailolo juga dapat terjadi karena aktivitas vulkanik. Gempa bumi dapat terjadi di daerah yang mengalami medan stress yang berhubungan dengan tekanan aktivitas magmatik (Gunawan dkk., 2017). Aktivitas magmatik yang terus mendorong lapisan bawah permukaan Jailolo membuat lokasi aktivitas gempa bumi terus berlanjut ke arah permukaan.

Jajaran pegunungan vulkanik di Barat Laut Halmahera ini terbentuk 1-3 juta tahun lalu yang saat ini membentuk busur vulkanik (Hall dkk., 1988; Baker dan Malaihollo,

**Tabel 1.** Model kecepatan global IASP91 dan AK135 (Bormann, 2002).

IASP91			AK135		
Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0	5,8000	3,3600	0,00	1,4500	0,0000
20,00	5,8000	3,3600	3,00	1,4500	0,0000
20,00	6,5000	3,7500	3,00	1,6500	1,0000
35,00	6,5000	3,7500	3,30	1,6500	1,0000
35,00	8,0400	4,4700	3,30	5,8000	3,2000
71,00	8,0442	4,4827	10,00	5,8000	3,2000
120,00	8,0500	4,5000	10,00	6,8000	3,9000
171,00	8,1917	4,5102	18,00	6,8000	3,9000
			18,00	8,0355	4,4839
			80,00	8,0400	4,4800
			80,00	8,0450	4,4900
			120,00	8,0505	4,5000
			165,00	8,1750	4,5090

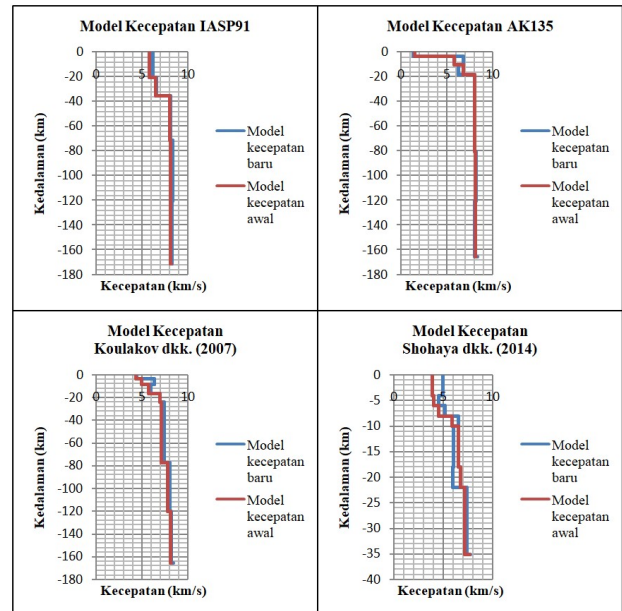
**Tabel 2.** Model kecepatan lokal.

Koulakov dkk. (2007)		Shohaya dkk. (2014)	
Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Kedalaman (km)	Vp (km/s)
0,00	4,30	0,00	3,89
3,00	4,90	4,00	3,97
8,00	5,70	6,00	4,47
16,00	6,90	8,00	5,87
24,00	7,10	10,00	6,50
77,00	7,80	18,00	6,70
120,00	8,05	22,00	7,15
165,00	8,17	35,00	7,67
210,00	8,30	50,00	8,01

1996). Gunung Jailolo memiliki jenis gunung api strato, yaitu gunung api berbentuk kerucut yang tersusun dari berbagai lapisan lava, tephra, pumice dan debu vulkanik (Wibowo, 2017). Gunung ini terletak kurang lebih 100 km di atas slab dan memiliki karakteristik komposisi kimia magma busur intraoceanic tanpa adanya kontaminasi oleh kerak benua Passarelli dkk. (2018). Mogi (1967) mengklasifikasikan tiga jenis gempa bumi berdasarkan rangkaian kejadian gempa bumi yang berlangsung. Namun, perbandingan struktur bawah permukaan untuk mengidentifikasi sumber gempa bumi di Indonesia belum dilakukan.

### 3 HASIL DAN DISKUSI

Proses relokasi hiposentrum pada penelitian ini didapatkan empat hasil relokasi dengan nilai RMS untuk masing-masing wilayah. Hal ini dikarenakan dalam penelitian ini menggunakan 4 model kecepatan awal untuk setiap wilayah. Studi ini akan membandingkan model kecepatan awal yang sesuai untuk setiap wilayah yang diteliti. Parameter yang diambil adalah dari RMS dan kesesuaian hasil interpretasi model kecepatan baru dengan penelitian sebelumnya. Ditambah dengan data pendukung irisan plot hiposentrum pada area yang diteliti.

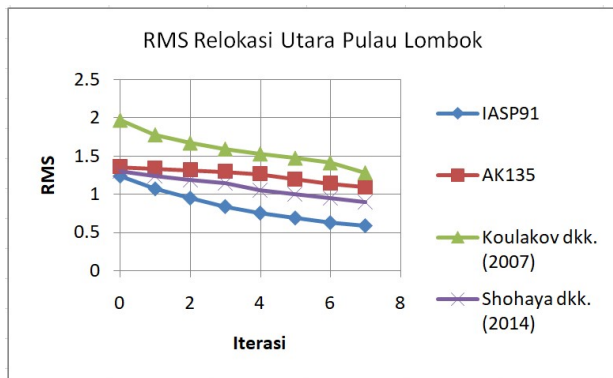


**Gambar 4.** Model kecepatan baru yang diperoleh dari relokasi gempa bumi tektonik Lombok.

#### 3.1 Wilayah Utara Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat

Dari hasil relokasi 508 kejadian gempa bumi, didapatkan empat model kecepatan baru (Gambar 4) beserta RMS-nya (Gambar 5). Terdapat lapisan zona kecepatan tinggi pada kedalaman 6-10 km ketika menggunakan model kecepatan awal dari Shohaya dkk. (2014). Pada kedalaman tersebut diinterpretasikan sebagai tunjaman dari Flores Back Arc Thrust (FBAT), sedangkan hiposentrum pada kedalaman lebih dari 100 km diakibatkan adanya tunjaman Java Trench (JV) (Gambar 6). Model IASP91 menunjukkan hasil RMS terkecil. Dalam pengoperasian pengamatan gempa tektonik, BMKG menggunakan model kecepatan global IASP91 pada sistem jaringan Seiscomp3, sehingga RMS pada model kecepatan awal ini paling kecil. Namun, untuk mengetahui lapisan yang lebih dangkal didapatkan dari penggunaan model awal kecepatan lokal dari Shohaya dkk. (2014).

Pada Gambar 6 dihasilkan dari hasil relokasi menggu-



**Gambar 5.** RMS relokasi gempa bumi tektonik Lombok untuk setiap model kecepatan awal yang digunakan.

nakan Model IASP91. Terlihat busur belakang mendorong ke selatan di sebelah utara Pulau Lombok dengan sudut tunjangan yang landai. [Sasmi dkk. \(2020\)](#) menyebutkan sudut tunjangan FBAT kecil ( $30^\circ$ ). Hal ini, mengakibatkan gempa bumi terjadi di kedalaman 10 km. Ketika membuat garis bantu dari plot hiposentrum, terlihat pola tunjangan dari FBAT. Kedalaman subduksi yang mencapai 50 km memicu terjadinya gempa bumi dangkal karena di Pulau Lombok juga terdapat beberapa sesar lokal. Pergerakan FBAT mengakibatkan sesar lokal menjadi tidak stabil.

### 3.2 Kawasan Gunung Sinabung, Sumatera Utara

Dari hasil relokasi 117 kejadian gempa bumi, diperoleh empat model kecepatan baru (Gambar 7) beserta RMS-nya (Gambar 8). Model kecepatan global tidak cocok untuk mengidentifikasi bawah permukaan di daerah vulkanik. Rentang yang lebar antar lapisan membuat fitur geologi tidak teramati. Ketika menggunakan model kecepatan dari [Koulakov dkk. \(2007\)](#) serta [Shohaya dkk. \(2014\)](#), terdapat perbedaan nilai kecepatan pada kedalaman dangkal antara keduanya (Gambar 7). Namun, jika dilihat dari grafik model kecepatan baru dan model kecepatan awal pada Model [Koulakov dkk. \(2007\)](#) tidak menunjukkan karakteristik kondisi bawah permukaan. Model [Shohaya dkk. \(2014\)](#) diperoleh dari merelokasi gempa tektonik di Bengkulu. Namun, ketika digunakan untuk merelokasi gempa vulkanik menghasilkan RMS akhir yang selisih 0,02 lebih kecil ketika menggunakan model [Koulakov dkk. \(2007\)](#). Di sisi lain, model [Shohaya dkk. \(2014\)](#) dapat mengidentifikasi zona kecepatan rendah. (Gambar 7).

Model [Shohaya dkk. \(2014\)](#) memperjelas kondisi zona kecepatan rendah yang terdapat pada kedalaman 18-22 km. Magma melakukan intrusi pada lapisan kerak bumi secara vertikal (dike) dan horizontal (sill) di sekitar Gunung Sinabung yang mengakibatkan gempa bumi pada kedalaman  $< 25$  km ([Arimuko dkk., 2018](#)). Pertumbuhan kubah dan akhirnya runtuh pada 10 Januari 2014 diawali terjadinya gempa Volcano Tectonic pada kedalaman berkisar 12 km ([McCausland dkk., 2019](#)). Pada kedalaman yang lebih dangkal, 0 sampai 10 km, Model [Shohaya dkk. \(2014\)](#) memiliki kecepatan lebih kecil dari 6 km/s. Pada kedalaman ini, banyak terjadi gempa bumi berdasarkan distribusi hiposentrum (Gambar 9).

Terdapat zona kecepatan rendah dan hiposentrum gempa tremor, kami menginterpretasikan sebagai dapur magma yang terletak pada kedalaman 8 km. Selain itu, model [Shohaya dkk. \(2014\)](#) juga menunjukkan adanya zona kecepatan rendah pada rentang kedalaman 18-22 km (Gambar 7). Pada kedalaman 20 km juga terdapat dua hiposentrum yang belum diketahui sumbernya (Gambar 9). Kami menginterpretasikan pada kedalaman tersebut terdapat intrusi magma dari mantel atas yang bergerak ke atas menuju dapur magma di atasnya.

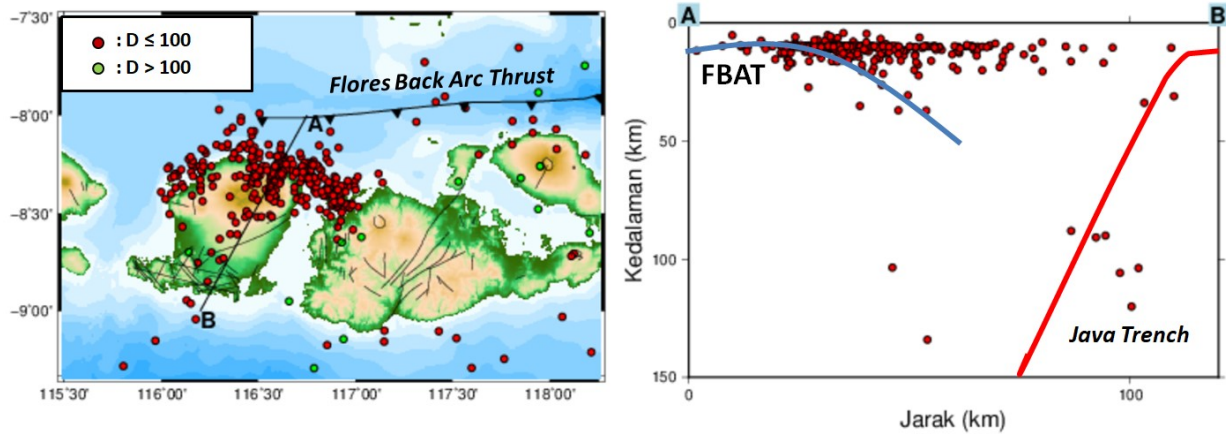
### 3.3 Wilayah Jailolo, Maluku Utara

Dari hasil relokasi 507 kejadian gempa bumi, diperoleh empat model kecepatan baru (Gambar 10) beserta RMS-nya (Gambar 11). Dari Gambar 10, terlihat bahwa model kecepatan baru yang memiliki zona kecepatan rendah yang kemudian diikuti peningkatan secara drastis adalah Model [Koulakov dkk. \(2007\)](#). Zona kecepatan rendah sangat penting untuk ditemukan pada kasus gempa swarm karena menunjukkan kedalaman fluida (magma). Gempa swarm dapat dipicu karena adanya difusi tekanan pori tinggi (Talwani dan Acree, 1984), tekanan reservoir dari fluida ([Simpson dkk., 1988](#)), hidrofraktur akibat buatan manusia atau alami (termasuk magmatic dike) ([Dahm dkk., 2010](#); [Passarelli dkk., 2015](#)), dan terjadinya slow slip event ([Lohman dan McGuire, 2007](#); [Peng dan Gomberg, 2010](#); [Fukuda, 2018](#)).

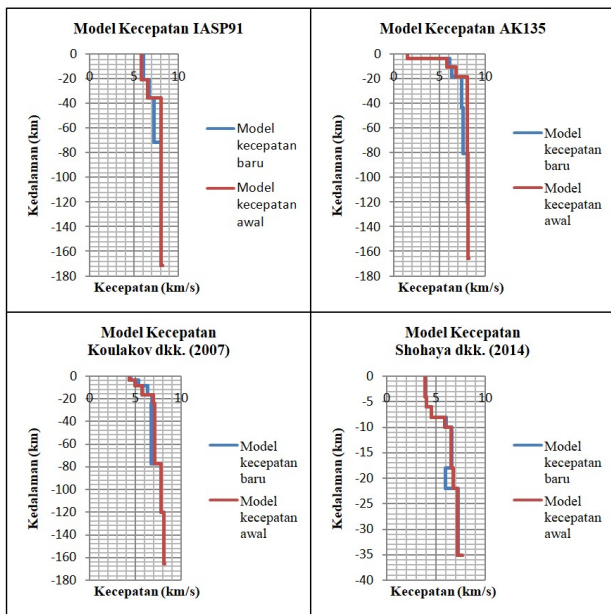
Berdasarkan [Passarelli dkk. \(2018\)](#), gempa swarm Jailolo diakibatkan karena adanya migrasi magma, meski demikian belum terdapat tanda-tanda akan terjadi letusan. Gempa swarm dan gempa vulkanik telah dikaji secara luas yang berhubungan dengan siklus letusan gunung berapi ([Benoit dan McNutt, 1996](#)). Terjadinya kewanan gempa vulkanik tidak selalu menandakan akan terjadi letusan ([Moran dkk., 2011](#); [Newhall dkk., 2017](#)), namun sebagian besar letusan didahului oleh gempa swarm ([Benoit dan McNutt, 1996](#); [Passarelli dan Brodsky, 2012](#)). Dalam banyak kasus, membedakan penyebab gempa swarm di daerah vulkanik lebih sulit, karena mekanisme magmatik dan tektonik (gempa Volcano Tectonic) juga dapat terjadi pada rangkaian gempa swarm ([Passarelli dkk., 2018](#)).

Model kecepatan awal yang memiliki RMS terkecil adalah Model [Koulakov dkk. \(2007\)](#). [Koulakov dkk. \(2007\)](#) mendapatkan model kecepatan ini dari identifikasi tomografi di Yogyakarta menggunakan data MERAMEX. Hal ini mengindikasikan, jika gempa bumi yang dikaji [Koulakov dkk. \(2007\)](#) pada kawasan Gunung Merapi merupakan gempa swarm. Kesesuaian model awal dalam menentukan model kecepatan baru dengan proses relokasi akan menghasilkan RMS yang kecil. Hasil ini juga dikorelasikan dengan grafik model kecepatan dan irisan vertikal plot hiposentrum yang telah direlokasi untuk mendapatkan hasil yang presisi (Gambar 12).

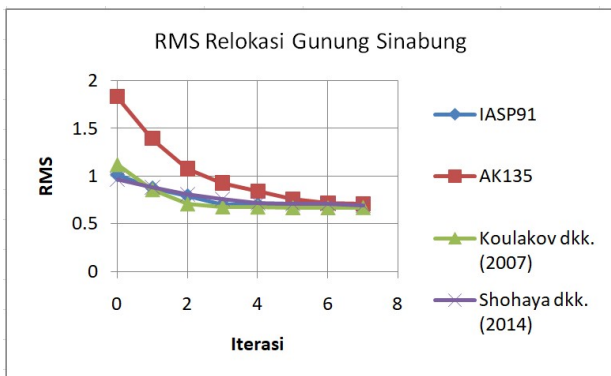
Pada Model [Koulakov dkk. \(2007\)](#), terdapat zona kecepatan rendah pada kedalaman 8-16 km dan diikuti zona kecepatan tinggi pada kedalaman 16-24 km. Zona kecepatan rendah ini diperkirakan disebabkan karena adanya cairan magma pada kedalaman tersebut. Sedangkan zona kecepatan tinggi disebabkan karena pengaruh tunjangan dari Sangihe Arc. Distribusi hiposentrum pada kedalaman 10-20 km terlihat lebih sedikit dibandingkan pada kedalaman 0-10 km. Kami menginterpretasikan hiposentrum tersebut merupakan gempa VT.



Gambar 6. Irisan penampang vertikal hiposentrum dari hasil relokasi menggunakan model kecepatan IASP91 di wilayah utara Pulau Lombok.



Gambar 7. Model kecepatan baru yang diperoleh dari relokasi gempa bumi vulkanik di Gunung Sinabung.

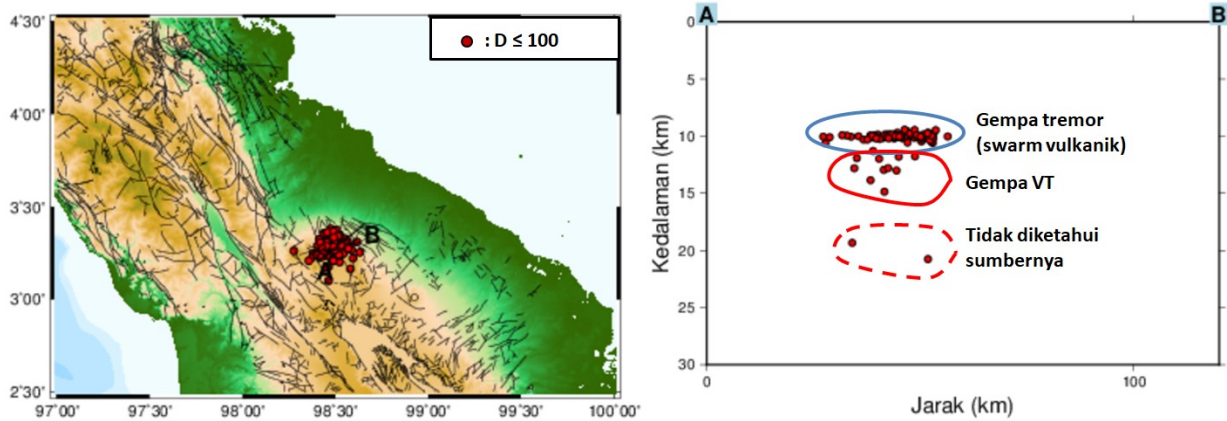


Gambar 8. RMS relokasi gempa bumi vulkanik Gunung Sinabung untuk setiap model kecepatan awal yang digunakan.

Relokasi kejadian gempa bumi magnitudo kecil sampai sedang ( $2,5 \leq ML \leq 4,5$ ;  $4,5 < Mw \leq 7,0$ ) yang terekam dari stasiun dengan jarak kurang dari 200 km menggunakan metode Coupled Hypocenter-Velocity mendapatkan profil kecepatan lokal (Tabel 3). Informasi apriori kecepatan lokal dapat digunakan untuk relokasi gempa bumi seperti yang dilakukan Shohaya dkk. (2014) dan Arimuko dkk. (2018) serta identifikasi bawah permukaan dengan metode tomografi yang dikerjakan Passarelli dkk. (2018) dan Wibowo dkk. (2018). Untuk identifikasi lapisan permukaan dangkal dari peristiwa gempa tektonik dipilih sebagai model awal dari Shohaya dkk. (2014). Hasil model kecepatan relokasi ini juga dapat digunakan untuk penelitian lapisan dangkal pada gempa tektonik khususnya di wilayah Lombok, Nusa Tenggara Barat. Pada kawasan vulkanik, model yang paling baik digunakan adalah Model Koulakov dkk. (2007). Hal ini dikarenakan, Koulakov dkk. (2007) memperoleh model kecepatan dari relokasi gempa vulkanik. Oleh sebab itu, model ini lebih baik digunakan untuk merelokasi gempa bumi akibat adanya aktivitas magmatik. Dalam penelitian ini gempa vulkanik Gunung Sinabung dan gempa swarm Jailolo disebabkan oleh aktivitas magmatik. Hasil model kecepatan relokasi ini dapat digunakan sebagai input model kecepatan untuk relokasi gempa bumi di wilayah Gunung Sinabung dan Jailolo.

#### 4 KESIMPULAN

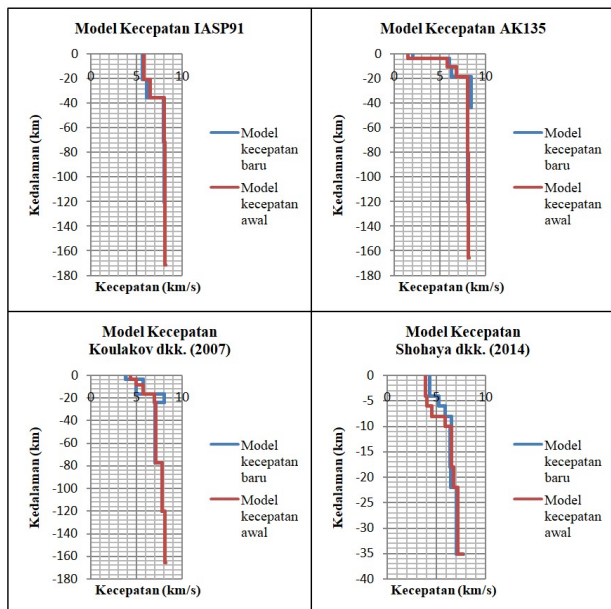
Dari semua hasil yang diperoleh, diketahui bahwa kedalaman lereng Busur Belakang Sunda adalah 6 sampai 10 km berdasarkan analisis model kecepatan yang dihasilkan dari relokasi plot hiposentrum. Akibatnya, wilayah Lombok didominasi gempa bumi dangkal dengan kekuatan sedang. Sumber magma Gunung Sinabung terletak di kedalaman 8 km berdasarkan adanya zona kecepatan rendah. Pada kedalaman tersebut, gempa bumi disebabkan oleh intrusi magma dan letusan freatik. Selain itu, pada kedalaman 18-22 km juga terdapat zona kecepatan rendah yang diinterpretasikan sebagai dapur magma yang terhubung dengan mantel atas. Irisan vertikal menunjukkan pola distribusi hiposentrum gempa swarm Jailolo yang berbeda dengan gempa vulkanik Gunung Sinabung. Gempa swarm Jailolo terjadi pada kedalaman 0 sampai 50 km dengan distribusi hiposentrum yang



**Gambar 9.** Irisan penampang vertikal hiposentrum hasil relokasi menggunakan model kecepatan awal Koulakov dkk. (2007) pada kawasan Gunung Sinabung.

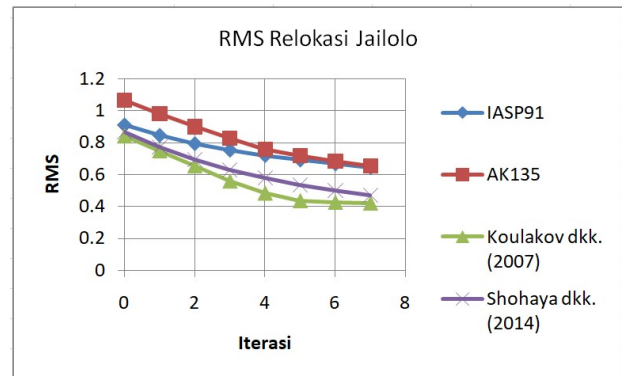
**Tabel 3.** Model kecepatan gelombang P dan S baru tanpa zona kecepatan rendah, yang dapat digunakan sebagai model awal untuk merelokasi gempa bumi.

Gempa tektonik			Gempa vulkanik			Gempa swarm		
Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0	4.94	2.85	0	4.46	2.57	0	3.78	2.18
4	5.04	2.91	3	5.28	3.05	3	4.34	2.51
6	5.15	2.97	8	6.3	3.64	8	4.9	2.83
8	5.6	3.23	16	6.77	3.91	16	6.84	3.95
10	6.22	3.59	24	7.28	4.20	24	7.52	4.34
18	6.7	3.87	77	7.8	4.50	77	7.8	4.50
22	7.36	4.25	120	8.05	4.65	120	8.05	4.65
35	7.7	4.45	165	8.17	4.72	165	8.17	4.72



**Gambar 10.** Model kecepatan baru yang diperoleh dari relokasi gempa swarm Jailolo.

lebih merata. Selain gempa swarm akibat migrasi magma, juga terdapat gempa tektonik yang dipicu adanya penunjaman Sangihe Arc yang mengakibatkan gempa bumi Mw

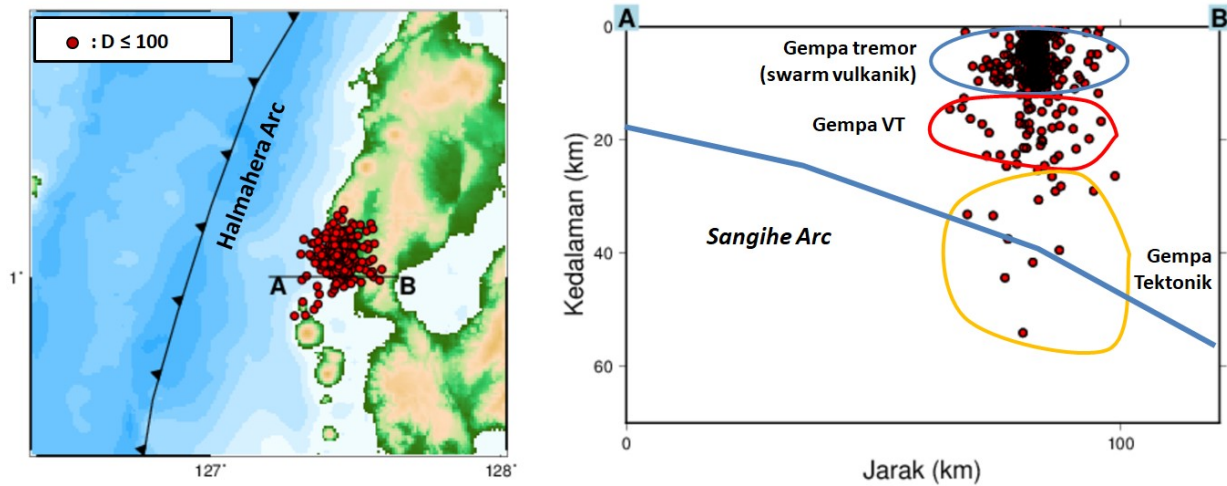


**Gambar 11.** RMS hasil relokasi gempa swarm Jailolo untuk setiap model kecepatan awal yang digunakan.

4,8. Gempa swarm memiliki magnitudo yang kecil, ML 1-4,5, sehingga dari kejadian gempa swarm jarang menimbulkan korban jiwa atau material.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Terima kasih kepada BMKG dan GFZ yang telah memfasilitasi penyediaan data untuk penelitian ini. Terima kasih kepada Wessel dkk. (2013) sebagai pengembang GMT (Generic Mapping Tool), yang berguna untuk membuat peta pada penelitian ini.



**Gambar 12.** Irisan penampang vertikal hiposentrum hasil relokasi menggunakan model kecepatan awal Koulakov dkk. (2007) di wilayah Jailolo.

## Pustaka

- Arimuko, A., Persada, Y.D. dan Subakti, H. (2018): Model kecepatan 1-d gelombang p dan gelombang s dari data hasil relokasi hiposenter di wilayah gunung Sinabung. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, **5**(3), 72–79.
- Baker, S. dan Malaihollo, J. (1996): Dating of Neogene igneous rocks in the Halmahera region: arc initiation and development. *Geological Society, London, Special Publications*, **106**(1), 499–509.
- Benoit, J.P. dan McNutt, S.R. (1996): Global volcanic earthquake swarm database and preliminary analysis of volcanic earthquake swarm duration. *Annals of Geophysics*, **39**(2).
- Bormann, P. (2002): Global 1-d earth models. *Potsdam: Telegrafenberg GeoForschungsZentrum*.
- Dahm, T., Hainzl, S. dan Fischer, T. (2010): Bidirectional and unidirectional fracture growth during hydrofracturing: role of driving stress gradients. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**(B12).
- Fukuda, J. (2018): Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**(1), 732–760.
- Gunawan, E. dkk. (2017): Field investigation of the November to December 2015 earthquake swarm in West Halmahera, Indonesia. *Geotechnical and Geological Engineering*, **35**(1), 425–432.
- Hall, R., Audley-Charles, M.G., Banner, F.T., Hidayat, S. dan Tobing, S.L. (1988): Late Palaeogene–Quaternary geology of Halmahera, Eastern Indonesia: initiation of a volcanic island arc. *Journal of the Geological Society*, **145**(4), 577–590.
- Hamilton, W.B. (1988): Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*, **100**(10), 1503–1527.
- Hamilton, W.B. (1979): Tectonics of the Indonesian region. Tech. rep., doi:10.3133/pp1078.
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D. dan Kradolfer, U. (1994): Initial reference models in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **99**(B10), 19635–19646.
- Kissling, E., Kradolfer, U. dan Maurer, H. (1995): Program velest users guide short introduction. Tech. rep., Institute of Geophysics, ETH Zurich.
- Koulakov, I. dkk. (2007): P and S velocity structure of the crust and the upper mantle beneath central Java from local tomography inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**(B8).
- Lohman, R.B. dan McGuire, J.J. (2007): Earthquake swarms driven by aseismic creep in the Salton Trough, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**(B4).
- McCausland, W.A. dkk. (2019): Using a process-based model of pre-eruptive seismic patterns to forecast evolving eruptive styles at Sinabung volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **382**, 253–266.
- Mogi, K. (1967): Earthquakes and fractures. *Tectonophysics*, **5**(1), 35–55.
- Moran, S.C., Newhall, C. dan Roman, D.C. (2011): Failed magmatic eruptions: late-stage cessation of magma ascent. *Bulletin of Volcanology*, **73**(2), 115–122.
- Musumeci, C., Gresta, S. dan Malone, S.D. (2002): Magma system recharge of Mount St. Helens from precise relative hypocenter location of microearthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **107**(B10), ESE–16.
- Newhall, C.G. dkk. (2017): Wovodat—an online, growing library of worldwide volcanic unrest. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **345**, 184–199.
- Passarelli, L. dan Brodsky, E.E. (2012): The correlation between run-up and repose times of volcanic eruptions. *Geophysical Journal International*, **188**(3), 1025–1045.
- Passarelli, L., Rivalta, E., Cesca, S. dan Aoki, Y. (2015): Stress changes, focal mechanisms, and earthquake scaling laws for the 2000 dike at Miyakejima (Japan). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **120**(6), 4130–4145.
- Passarelli, L. dkk. (2018): Magmatic or Not Magmatic? The 2015–2016 Seismic Swarm at the Long-Dormant Jailolo Volcano, West Halmahera, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, **6**, 79.
- Peng, Z. dan Gombert, J. (2010): An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature geoscience*, **3**(9), 599–607.



- Ratchkovsky, N.A., Pujol, J. dan Biswas, N.N. (1998): Relocation of shallow earthquakes in southern Alaska using Joint Hypocenter Determination method. *Journal of Seismology*, **2**(1), 87–102.
- Sasmi, A.T. dkk. (2020): Hypocenter and magnitude analysis of aftershocks of the 2018 Lombok, Indonesia, earthquakes using local seismographic networks. *Seismological Research Letters*, **91**(4), 2152–2162.
- Shohaya, J.N., Madlazim dan Rahmawati, E. (2014): Model Kecepatan 1-D Gelombang P dan Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Bengkulu Menggunakan Metode Coupled Velocity Hipocenter. *Jurnal Fisika*, **3**(2).
- Silver, E.A., Breen, N.A., Prasetyo, H. dan Hussong, D.M. (1986): Multibeam study of the Flores backarc thrust belt, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **91**(B3), 3489–3500.
- Simpson, D.W., Leith, W.S. dan Scholz, C.H. (1988): Two types of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**(6), 2025–2040.
- Supendi, P. dkk. (2020): Relocated aftershocks and background seismicity in eastern Indonesia shed light on the 2018 Lombok and Palu earthquake sequences. *Geophysical Journal International*, **221**(3), 1845–1855.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J. dan Wobbe, F. (2013): Generic mapping tools: improved version released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **94**(45), 409–410.
- Wibowo, B.A. (2017): Tomografi Struktur Kecepatan Gelombang Seismik Menggunakan Data Gempabumi Swarm di Wilayah Jailolo, Halmahera Barat. Ph.D. thesis, Universitas Indonesia.
- Wibowo, B.A., Rohadi, S. dan Supriyanto (2018): Tomography of Seismic Wave's Velocity Structure using Swarm Earthquake Data in Jailolo Area, West Halmahera. *EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering*, European Association of Geoscientists and Engineers, vol. 2018, 1–5.