

RELOKASI GEMPA BUMI SWARM DI PESAWARAN-LAMPUNG, JANUARI 2021

Izaina Nurfitriana^{1*}, Adhi Wibowo², Rudianto²

¹ Program Studi Teknik Geofisika, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, 35365, Indonesia

² Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Lampung Utara, 34519, Indonesia

*Corresponding author. Email: izaina.nurfitriana@tg.itera.ac.id

Manuscript received: 20 March 2021; Received in revised form: 29 April 2021; Accepted: 30 April 2021

Abstrak

Pesawaran, Lampung telah diguncang rentetan gempa bumi magnitudo rendah pada bulan Januari 2021. Gempa bumi tersebut tidak disertai dengan gempa utama dengan magnitudo besar sehingga dapat disebut dengan gempa bumi *swarm*. Relokasi hiposenter telah dilakukan dengan menggunakan data dari jaringan stasiun BMKG untuk mengetahui sumber dari gempa bumi *swarm* tersebut. Metode *double-difference* digunakan dan didapatkan hasil relokasi 19 dari 22 gempa bumi *swarm* yang terjadi. Distribusi kedalaman hiposenter berkisar pada kedalaman 1,5 – 4,5 km sehingga dapat disebut dengan gempa bumi kerak dangkal. Berdasarkan sayatan melintang terhadap kedalaman teramati bahwa sebaran gempa bumi memiliki kemiringan ke arah Timur Laut. Lokasi gempa bumi yang presisi juga menunjukkan adanya deliniasi dan tepat berada di atas terduga Sesar Menanga. Berdasarkan analisis hasil relokasi hiposenter dapat disimpulkan bahwa gempa bumi *swarm* Pesawaran disebabkan oleh aktivitas Sesar Menanga.

Kata Kunci: Pesawaran; relokasi hiposenter; Sesar Menanga; *swarm*;

Abstract

Pesawaran, Lampung, had been shocked by the multiple small magnitude earthquakes in January 2021. These earthquakes occurred without any following big earthquake, leads to a term of swarms. We investigated these swarms by precise relocation using data recorded by the BMKG station network. The double-difference method was used to relocate and generate 19 out of 22 events. The distribution of event depths varies in 1.5 – 4.5 km, leads to the shallow crustal earthquake, and tends to have a dip towards NE direction. The precise location showed well delineation of the inferred Menanga fault line. Based on the relocating hypocenter we concluded that the source of the swarms is the activity of Menanga fault.

Keywords: hypocenter relocation; Menanga Fault; Pesawaran; *swarm*;

Pendahuluan

1.1 Observasi seismik

Kejadian rentetan gempa bumi dengan magnitudo kecil dan tanpa adanya gempa bumi utama dengan magnitudo besar

dikenal dengan gempa bumi *swarm* (Zobin & Ivanova, 1994). Gempa bumi *swarm* beberapa kali teramati di Indonesia, seperti gempa bumi *swarm* Bogor di kaki Gunung Salak pada 23 Agustus 2019, gempa bumi *swarm* di Mamasa, Sulawesi Barat pada November 2018, gempa bumi *swarm* di

Jailolo, Halmahera Barat pada Desember 2015, dan gempa bumi *swarm* di Klangon, Madiun pada Juni 2015 (BMKG, 2018). Beberapa kasus gempa bumi *swarm* menimbulkan kerusakan pada rumah – rumah warga.

Mekanisme sumber gempa bumi *swarm* masih belum dipahami dengan baik oleh para peneliti kegempaan. Gempa bumi ini memiliki mekanisme sumber yang berbeda dengan gempa bumi besar yang terjadi akibat sesar atau subduksi *megathrust*. Gempa bumi *swarm* umumnya dapat dipicu dari aktivitas fluida, vulkanik ataupun sesar aktif. Menurut Sianipar dkk. (2020), gempa bumi *swarm* yang terjadi di kaki Gunung Salak dipicu oleh aktivitas fluida, meskipun belum diketahui jenis aktivitas fluida apa yang mengontrol gempa bumi *swarm* tersebut. Gempa bumi *swarm* yang terjadi di Jailolo Halmahera diketahui disebabkan oleh aktivitas magma dari Gunung Jailolo yang dianggap *dormant* selama 200 tahun (Passarelli dkk., 2018). Pada pembahasan yang lain, menurut Vavryčuk & Hrubcová (2017), gempa bumi *swarm* bisa disebabkan oleh sesar aktif yang mengalami rayapan (*creeping*). Pergerakan rayapan pada sesar dapat menimbulkan gempa berskala kecil namun dangkal dan berjumlah banyak yang dapat dikategorikan sebagai gempa bumi *swarm*.

Berdasarkan beberapa kemungkinan sumber gempa bumi *swarm* tersebut, maka perlu diadakan penelitian lebih lanjut tentang mekanisme terbentuknya gempa bumi *swarm* yang terjadi di Pesawaran. Hal ini dapat menjadi langkah awal baik dalam mitigasi bencana maupun dalam memahami kondisi geologi daerah Pesawaran.

Berdasarkan informasi yang dihimpun dari BMKG Kotabumi, Lampung Utara, tercatat 22 kejadian gempa bumi yang berulang dengan magnitudo 1,7 – 4 dengan kedalaman 1 – 4 km. Gempa bumi ini berpusat di daerah Pesawaran, dan

berlangsung selama 11 hari. Gempa bumi mulai terasa pada tanggal 5 Januari 2021, kemudian meningkat pada 6 Januari 2021 sebanyak 9 kali, berlanjut pada tanggal 7 – 10, 13 dan 16 Januari 2021. Lokasi gempa bumi *swarm* tersebar di area Tenggara Gunung Ratai yang bertepatan di area terduga Sesar Menanga (*inferred fault*). Dua diantaranya dirilis oleh BMKG bermagnitudo 3,4 dan 3,5 (BMKG, 2021).

Berdasarkan peta geologi Lembar Tanjung Karang (Mangga dkk., 1993), terduga Sesar Menanga merupakan kelurusan yang melintang dengan arah Tenggara-Barat Laut yang melintasi Gunung Ratai. Informasi berkenaan dengan jenis sesar, pergerakan, besar dip, dan keaktifannya masih sangat minim dikarenakan minimnya penelitian tentang terduga sesar tersebut. Adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami terduga Sesar Menanga.

Selama kejadian gempa bumi *swarm* ini dilaporkan bahwa guncangan terasa hingga Kecamatan Kemiling, yang berjarak kurang lebih 15 km dari pusat gempa bumi. Belum ada laporan mengenai kerusakan bangunan dari masyarakat terdampak namun pihak BMKG tetap memberikan himbauan kepada masyarakat sekitar untuk mewaspadaai adanya gempa bumi *swarm* lagi.

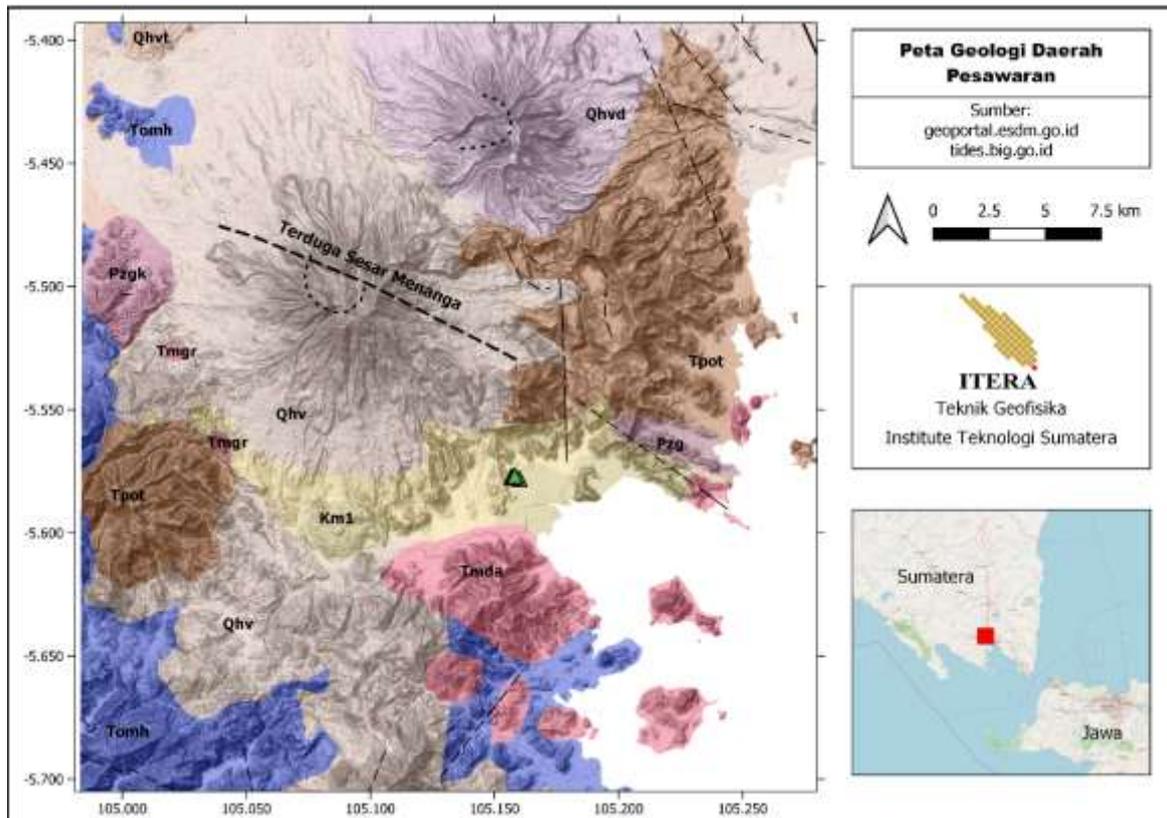
1.2 Geologi lokal Pesawaran

Secara umum, Lampung terletak pada zona konvergen dengan Lempeng India-Australia menunjam Lempeng Sunda (Eurasia) di sisi Barat Sumatera. Subduksi ini salah satunya menghasilkan deretan rangkaian gunung api di bagian tengah Pulau Sumatera dan adanya Sesar Besar Sumatera dengan pergerakan menganan sebagai akibat dari tipe subduksi yang bersifat *oblique* (McCaffrey, 1991).

Pesawaran merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Lampung. Pada area penelitian

ini terdapat fitur – fitur geologi yang sangat menarik yaitu adanya dua gunungapi yang *dormant* (Gunung Ratai dan Gunung Betung); kelurusan yang diperkirakan sebagai Sesar Menanga; dan manifestasi geotermal berupa sumur panas dan silika sinter (Gambar 1) (Putri dkk., 2014). Semua fitur geologi tersebut dapat dimungkinkan menjadi sumber gempa

bumi *swarm* di Pesawaran ini. Secara litologi, batuan penyusun didominasi oleh Endapan Gunungapi Muda (Qhv) berupa lava (andesit-basalt), breksi, dan tuff dari erupsi G. Ratai, G. Betung, G. Pesawaran, dan G. Rajabasa yang menindih secara tidak selaras kompleks G. Kasih Tak Terpisahkan (Pzg) (Tabel 1) (Mangga dkk., 1993).



Gambar 1. Peta geologi daerah Pesawaran. Garis putus-putus merupakan struktur kelurusan, segitiga hijau lokasi manifestasi geotermal (modifikasi dari Mangga dkk., 1993)

Tabel 1. Kode dan formasi pada peta geologi daerah penelitian

Kode	Formasi
Qhv	Endapan Gunungapi Muda
Qhvd	Endapan Gunungapi Muda Betung
Qhvt	Endapan Gunung Muda Pulautangkit
Tomh	Formasi Hulusimpang
Tpot	Formasi Tarahan
Km1	Formasi Menanga
Pzg	Kompleks G.Kasih Tak Terpisahkan
Pzgj	Kuarsit Sidodadi
Tmda	Dasit Piabung
Tmgr	Batuan Granit Tak Terpisahkan

Metode Penelitian

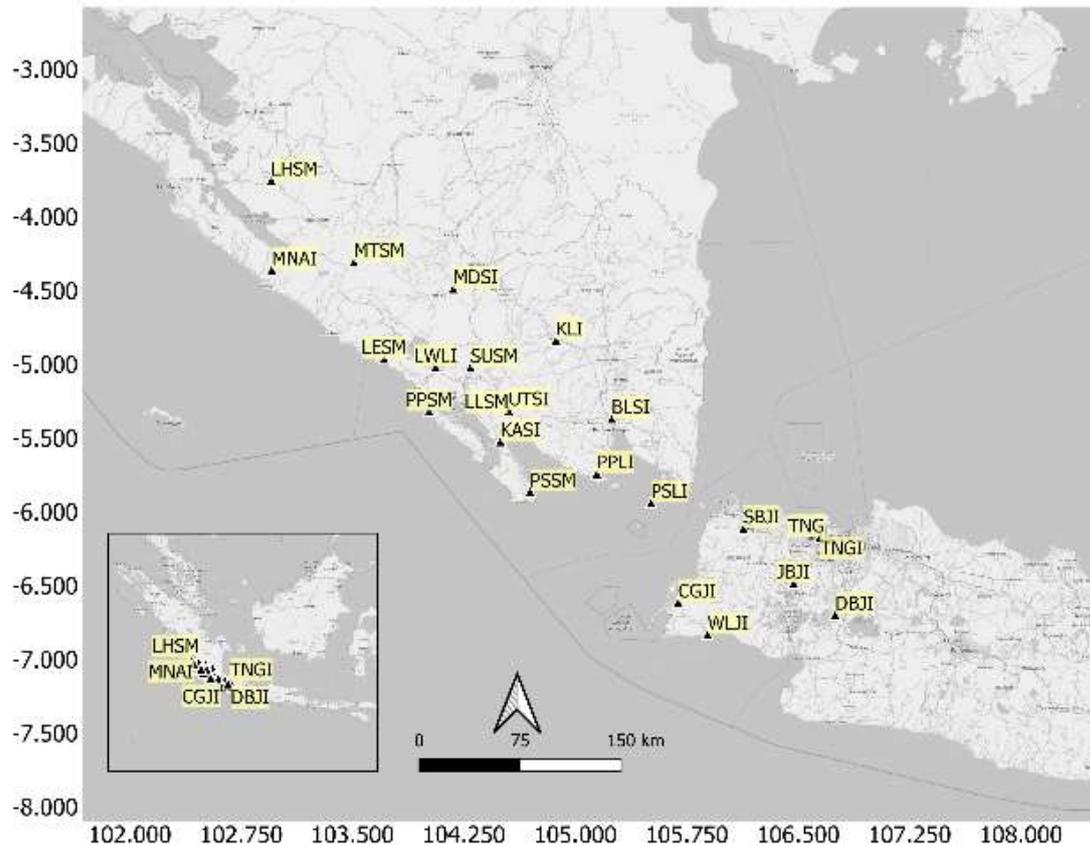
Daerah penelitian berada di Kabupaten Pesawaran, Lampung, khususnya di Way Ratai, dengan koordinat $105,00^{\circ} - 105,30^{\circ}$ BT dan $5,40^{\circ} - 5,75^{\circ}$ LS.

2.1 Susunan Stasiun BMKG

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah katalog waktu tiba gelombang P dan S dari 22 kejadian gempa bumi *swarm* yang terjadi pada tanggal 5 Januari 2021 - 16 Januari 2021. Rekaman data seismik ini direkam oleh jaringan stasiun BMKG sekitar Lampung, Sumatera Selatan,

Bengkulu, Banten, dan Jakarta. Data bersifat terbatas hanya untuk peneliti yang melakukan kolaborasi dengan BMKG Kotabumi, Lampung dan didapatkan secara resmi dari pihak BMKG terkait.

Stasiun yang digunakan berjumlah 25 dengan tipe seismometer yaitu *broadband* (Gambar 2). Selanjutnya, data yang diperoleh akan digunakan untuk relokasi hiposenter gempa bumi *swarm* menggunakan metode *double difference* melalui *software hypoDD*.



Gambar 2. Sebaran stasiun yang digunakan dalam penelitian. Segitiga hitam merupakan stasiun yang dioperasikan oleh BMKG.

2.2 Lokasi Relatif

Tingkat akurasi dari penentuan lokasi hiposenter dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya seperti susunan jaringan seismometer, fase gelombang P dan S, tingkat ketelitian pembacaan waktu tiba gelombang, dan pengetahuan tentang struktur kecepatan gelombang seismik pada kerak bumi (Gomberg et al., 1990). Koreksi pada struktur kecepatan gelombang seismik dapat diminimalisir secara efektif dengan menggunakan metode lokasi gempa relatif (Got et al., 1994). Pada penelitian ini, metode relokasi gempa bumi relatif dilakukan dengan menggunakan algoritma *double-difference* dari Waldhauser dan

Ellsworth (2000). Algoritma ini terimplementasikan di dalam paket *hypoDD* yang dapat diakses dengan bebas melalui [website https://www.ldeo.columbia.edu/~felixw/hypoDD.html](https://www.ldeo.columbia.edu/~felixw/hypoDD.html)

Algoritma *double-difference* ini memanfaatkan hiposenter dan juga jalur rambat gelombang dari dua gempa bumi yang berdekatan. Dua gempa bumi yang berdekatan akan menghasilkan kemiripan pada jalur rambat gelombang (Fréchet, 1985; Got et al., 1994). Perbedaan waktu rambat dari dua kejadian gempa bumi berdekatan yang terekam dalam satu

stasiun pengamatan bisa menjadi karakter yang merepresentasikan jarak spasial hiposenter dari dua gempa bumi tersebut. Perhitungan perbedaan waktu rambat, atau dikenal dengan istilah *double-difference* (dr_k^{ij}) pada stasiun k terhadap dua kejadian gempa bumi i dan j adalah sebagai berikut (Waldhauser & Elsworth, 2000):

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{calc} \quad (1)$$

dengan t_k^i dan t_k^j merupakan waktu rambat observasi dan kalkulasi pada stasiun k untuk masing-masing kejadian gempa i dan j .

Terdapat tiga tahap dalam merelokasi posisi gempa menggunakan *hypoDD*, diantaranya adalah pembentukan pasangan *event* atau kejadian gempa yang saling berdekatan, pembentukan kluster, dan relokasi *double-difference*. Pada tahap pertama, yaitu pembentukan pasangan *event*, dilakukan dengan menggunakan program *ph2dt*. Program *ph2dt* berguna untuk mencari katalog data fase gelombang P dan S untuk kemudian dibentuk pasangan *event* serta memberikan informasi waktu rambat gelombang pada stasiun terkait. Program ini membangun jaringan dengan menghubungkan antar *event* hingga mencapai total pasangan *event* maksimum yang ditentukan (dikenal dengan parameter MAXNGH) dalam radius tertentu (dikenal dengan parameter MAXSEP). Adapun dalam penentuannya, program ini hanya mempertimbangkan kumpulan *event* yang berdekatan yang memiliki 8 pasangan fase yang sama atau lebih (dikenal dengan parameter MINLNK). Hasil dari program *ph2dt* adalah *dt.ct*, *event.sel*, *event.dat*, dan *ph2dt.log*.

Dokumen tipe *dt.ct* dibutuhkan untuk perhitungan perbedaan waktu rambat gelombang P dan S. Perhitungan perbedaan waktu rambat ini yang kemudian dijadikan parameter dalam penentuan jarak spasial antar *event*. Tahap berikutnya adalah

pembentukan kluster gempa. Pembentukan kluster gempa ditentukan berdasarkan beberapa parameter seperti jarak maksimum antar kluster *centroid* dan stasiun (DIST) serta data jaringan (OBSCT). Pada tahap terakhir, relokasi *double-difference* dilakukan secara iterasi. Banyaknya iterasi ditentukan dari ukuran data *set*, ukuran kluster, dan bobot dari gelombang P dan S.

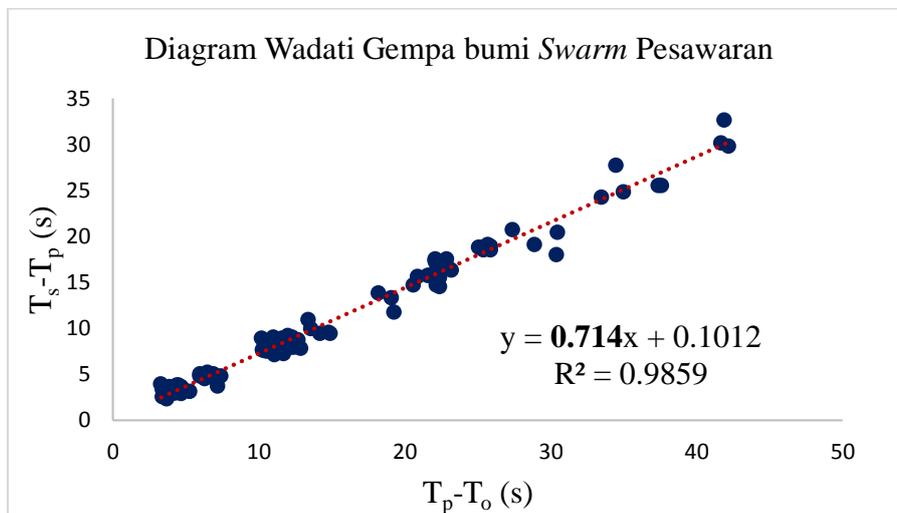
2.3 Relokasi hiposenter

Metode *double difference* baik digunakan untuk daerah yang memiliki seismisitas yang padat dan jarak antar *event* seismik jauh lebih kecil dibandingkan dengan jarak *event* ke stasiun pencatat gempa (beberapa km atau kurang dari 1 km). Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah hiposenter, waktu kejadian gempa bumi, koordinat stasiun seismik, waktu tiba gelombang seismik di setiap stasiun, dan model kecepatan gelombang seismik. Pada kasus kali ini, jarak antar episenter gempa bumi *swarm* sangat dekat yaitu 1 – 2 km dan sebaran stasiun berjarak antara 50 – 250 km. Sebanyak 335 fase dari 22 *event* gempa bumi *swarm* berhasil didapatkan.

Model kecepatan gelombang P berasal dari interpolasi model kecepatan *Crust 1.0* (Laske et al., 2013). Pemilihan model kecepatan ini dikarenakan informasi mengenai model kecepatan di daerah penelitian belum didapatkan. Model kecepatan gelombang S diperoleh menggunakan rasio dari Diagram Wadati (Tabel 2). Diagram Wadati menunjukkan hubungan antara waktu tiba gelombang P dikurangi *origin time* ($T_p - T_0$) dengan waktu tiba gelombang S dikurangi waktu tiba gelombang P ($T_s - T_p$). Diagram Wadati baik digunakan untuk memberikan estimasi nilai awal untuk rasio V_p/V_s . Nilai rasio V_p/V_s yang diperoleh dari Diagram Wadati adalah 1,74 (Gambar 3).

Tabel 2. Model kecepatan *Crust 1.0* (Laske et al., 2013)

Kedalaman (km)	Kecepatan V_p (km/s)
0	1,750
1	1,876
2	2,269
3	2,662
4	3,055
5	3,449
10	5,415
20	6,251
30	6,841
40	6,915
50	6,932



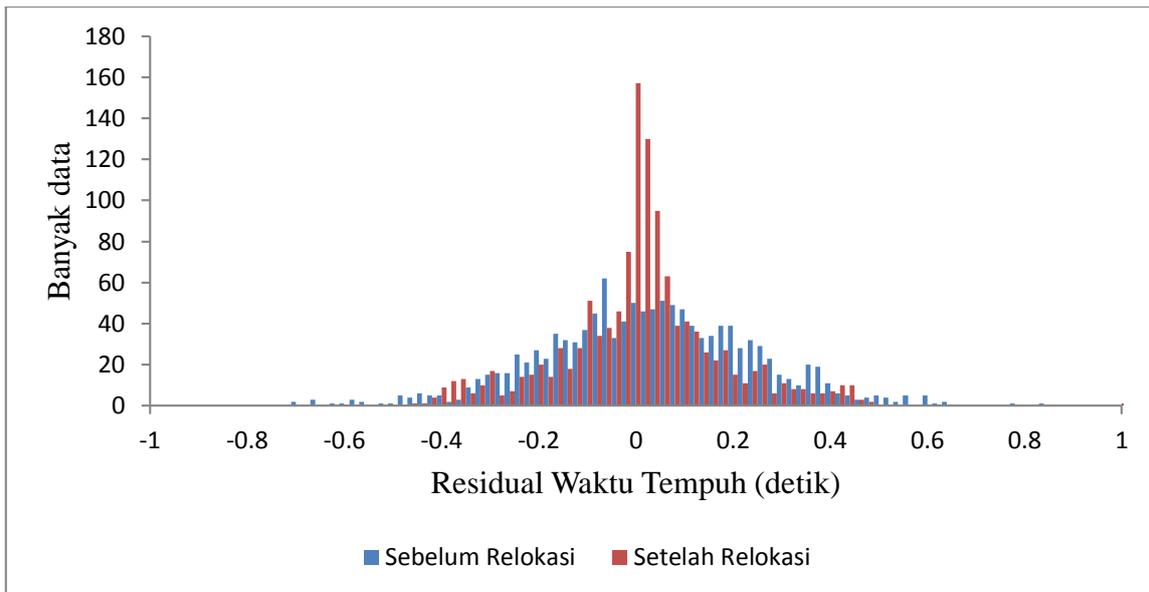
Gambar 3. Diagram Wadati gempa bumi Pesawaran. T_o adalah *origin time*, T_p dan T_s adalah waktu tiba gelombang P dan S berturut-turut.

Hasil dan Pembahasan

Hasil relokasi dapat dikatakan baik apabila selisih waktu tempuh antara observasi dan kalkulasi mendekati nol. Histogram pada Gambar 4 memperlihatkan sebaran selisih waktu tempuh observasi dan kalkulasi untuk fase P dan S dari setiap pasang *event* yang berdekatan (*neighbors*). Terlihat bahwa setelah dilakukan relokasi jumlah data dengan selisih waktu tempuh mendekati nol semakin meningkat.

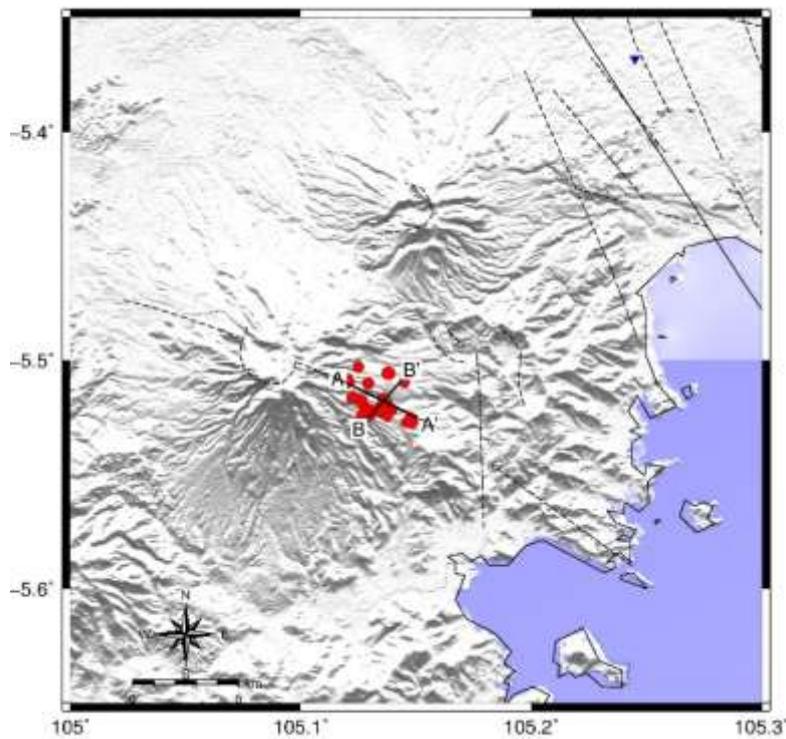
Berdasarkan plot episenter sebelum direlokasi (Gambar 5) terlihat bahwa sebaran gempa bumi cenderung menyebar di atas terduga Sesar Menanga dengan arah

sebaran Barat Laut – Tenggara. Setelah dilakukan pengolahan relokasi dengan *hypoDD* terlihat bahwa sebaran episenter semakin terpusat (Gambar 6) dan didapatkan hasil relokasi 19 dari 22 gempa atau sebesar 86,4%. Sebaran gempa bumi *swarm* hasil relokasi terlihat tetap memiliki kecenderungan ke arah Barat Laut – Tenggara dan tepat berada di atas jalur terduga Sesar Menanga. Sebaran episenter terdiri dari 2 kluster kecil yang saling berdekatan. Satu kluster terpusat dengan jumlah 11 gempa bumi dan tepat di sebelah Timur kluster tersebut terdapat kluster lain yang membentuk kecenderungan memanjang ke arah Barat Laut dengan jumlah 8 gempa bumi.



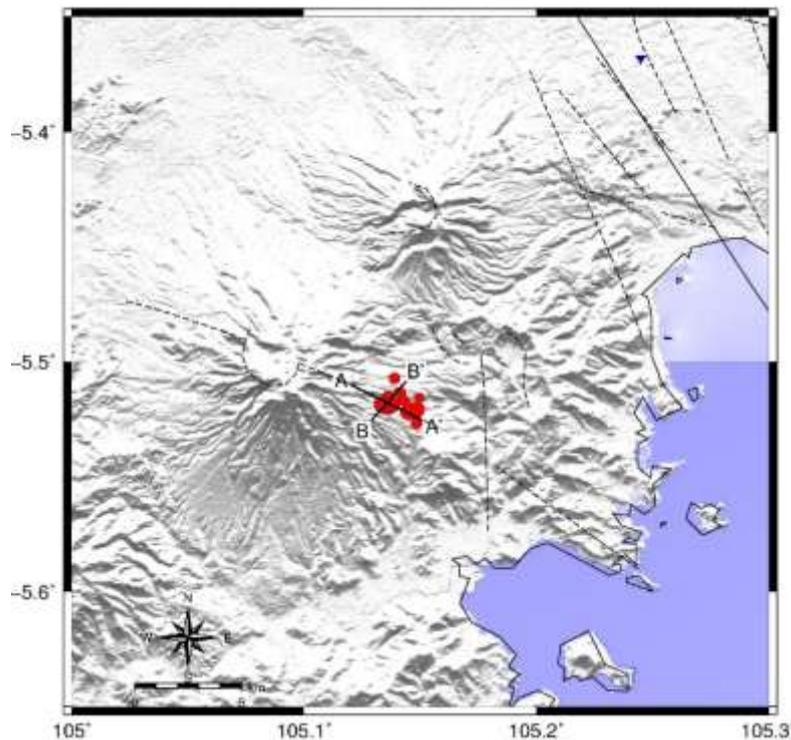
Gambar 4. Histogram selisih waktu tempuh antara observasi dan kalkulasi dari fase gelombang P dan S untuk setiap pasang *event* gempa bumi.

PETA SEBELUM RELOKASI



Gambar 5. Sebaran episenter gempa bumi *swarm* Pesawaran 5-16 Januari 2021. Titik merah merupakan letak episenter. Garis putus-putus yang melintasi episenter adalah terduga Sesar Menangka. Garis A-A' dan B-B' adalah garis yang digunakan untuk membuat sayatan terhadap kedalaman.

PETA SESUDAH RELOKASI



Gambar 6. Seperti Gambar 5 setelah direlokasi.

Sayatan melintang A-A' dan B-B' dibuat pada kedua peta sebelum dan setelah relokasi untuk melihat sebaran hiposenter dengan lebih detail (Gambar 7a, 7b dan Gambar 8a, 8b). Sayatan dibuat secara sejajar dan tegak lurus terhadap arah persebaran episenter. Meskipun sebaran episenter sebelum relokasi sudah menunjukkan kecenderungan di atas terduga Sesar Menanga, namun apabila diamati dari sayatan kedalaman pada Gambar 7a dan Gambar 8a, kedalaman hiposenter sebelum relokasi terlihat mendatar pada kedalaman yang sama yaitu 1, 2, 3, dan 4 km. Hal ini menunjukkan bahwa hiposenter belum terdefinisi dengan baik.

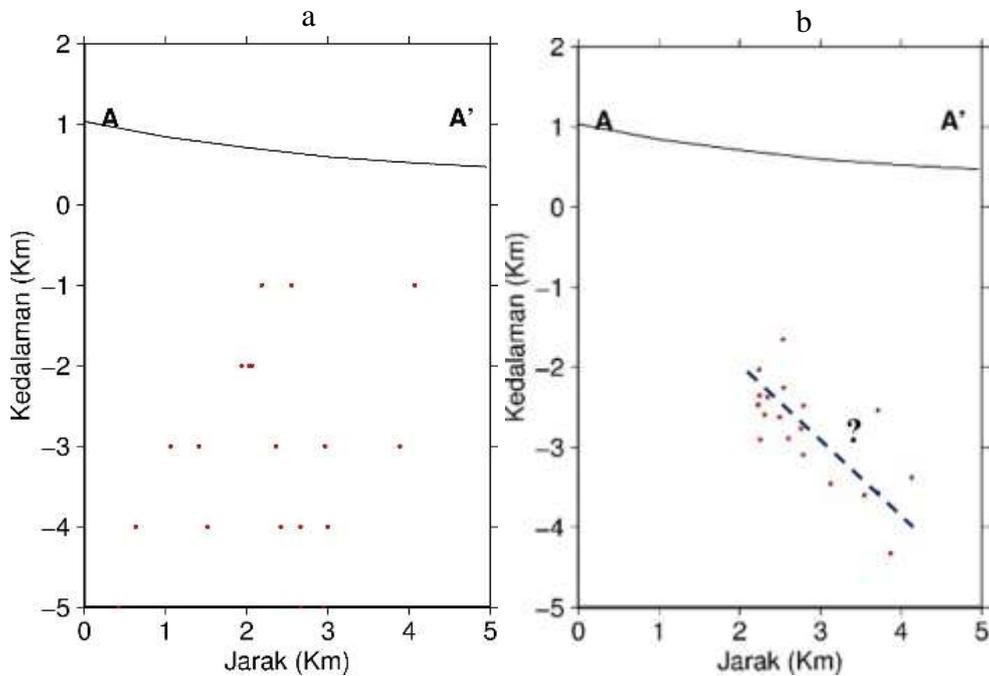
Setelah dilakukan relokasi, didapatkan sebaran kedalaman hiposenter (Gambar 7b dan Gambar 8b) yang beragam dari kedalaman 1,5 km – 4,5 km dengan distribusi kedalaman ke arah A' dan B' semakin dalam (Timur – Timur Laut). Arah vektor perpindahan lokasi hiposenter dapat diamati pada Gambar 9. Perubahan posisi cukup signifikan, terlihat bahwa terdapat 2

kluster, yang memusat di Selatan dan yang menyebar di Utara terduga Sesar Menanga.

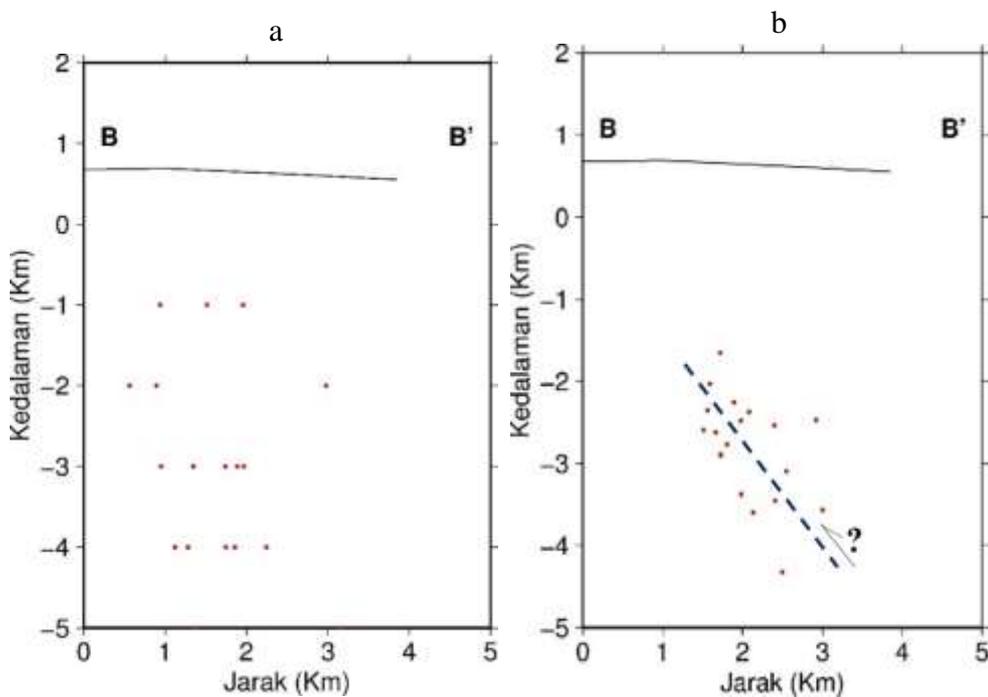
Berkaitan dengan letak hiposenter pada terduga Sesar Menanga, informasi mengenai jenis sesar ini masih sangat minim. Hasil sayatan hiposenter B-B' memperlihatkan adanya kecenderungan sebaran hiposenter yang miring ke arah Timur – Timur Laut yang diduga sebagai bidang sesar (garis biru putus-putus pada Gambar 9b). Besar kemiringan diperkirakan berkisar 38-45°. Diperkirakan gempa bumi *swarm* yang terjadi merupakan hasil dari pergerakan yang diduga bidang sesar tersebut. Pergerakan bidang sesar dapat melepaskan energi dan menjalar dalam bentuk gelombang seismik. Dengan mempertimbangkan magnitudo yang tidak terlalu besar, diperkirakan tidak terjadi skema *stick-slip* pada bidang sesar tersebut. Menelaah dari sebaran hiposenter, jika dibandingkan dengan sayatan A-A' yang sejajar dengan terduga Sesar Menanga, sayatan B-B' yang tegak lurus dengan sesar ini memiliki sebaran yang lebih sempit dan

cenderung terpusat di bawah garis sesar. Kecenderungan ini diduga merepresentasikan geometri bidang sesar yang memiliki jurus (*strike*) ke arah Barat Laut dengan kemiringan ke arah Timur –

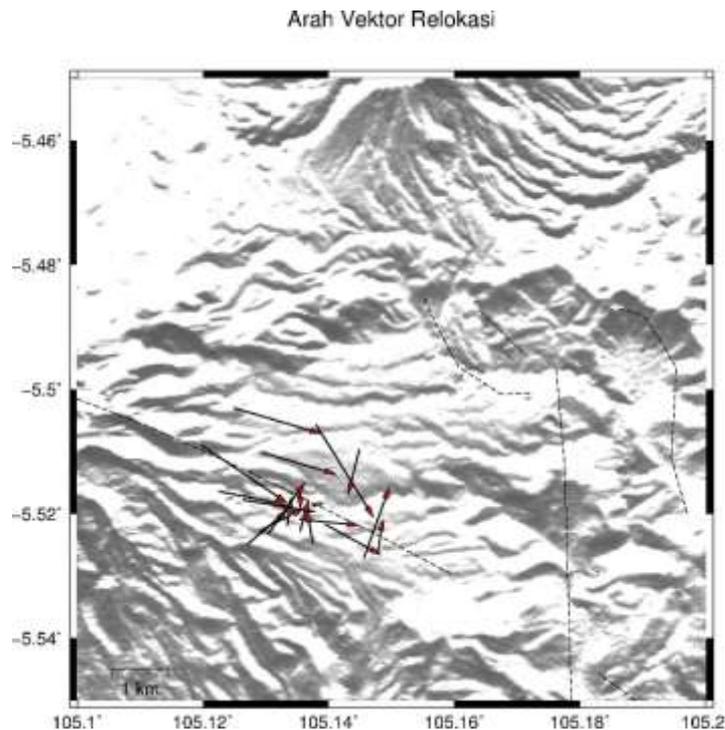
Timur Laut. Hal ini memperkuat dugaan bahwa kejadian gempa bumi *swarm* yang terjadi terbentuk dari aktifitas sesar dalam kasus ini terduga Sesar Menanga.



Gambar 7. Posisi kedalaman hiposenter (titik merah) gempa bumi *swarm* Pesawaran sebelum (a) dan setelah (b) relokasi hasil proyeksi dari semua titik terhadap sayatan A-A'.



Gambar 8. Seperti Gambar 5 untuk hiposenter hasil relokasi.



Gambar 9. Hasil perubahan vektor posisi episenter sebelum dan sesudah relokasi (anak panah).

Kesimpulan

Berdasarkan analisis sebaran hiposenter dan sayatan melintangnya, dapat disimpulkan bahwa penyebab gempa *swarm* Pesawaran pada Januari 2021 adalah adanya aktivitas Sesar Menanga yang sebelumnya masih terduga sesar.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada pihak BMKG Kotabumi Kelas III, Lampung Utara yang telah memberikan data dan membantu melakukan pengolahan data. Kami juga mengucapkan terimakasih kepada ITERA yang telah memberikan dana hibah penelitian untuk melakukan penelitian ini. Terakhir, kami mengucapkan terima kasih kepada Mohammad Tri Fitrianto S.Si, M.Sc. yang telah menjadi editor artikel ini.

Daftar Pustaka

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). 2018. @InfoBMKG. [Online]. [Accessed 21

February 2021]. Available from: <https://twitter.com/infoBMKG/status/1169528905591427072>

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). 2021. *Katalog Gempa bumi*. [Online]. [Accessed 21 February 2021]. Available from: http://repogempa.bmkg.go.id/repo_new/

Fréchet, J. 1985. *Sismogenèse et doublets sismiques*. Thèse d'Etat, Univ. Sci. et Méd. De Grenoble, Grenoble, France, pp. 206. http://east.ustrasbg.fr/jv/geoarchive/Doublets/Frechet_These_1985ocr.pdf

Gomberg, J.S., Shedlock, K.M., and Roecker, S.W. 1990. *The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation*. Bull. Seismol. Soc. Am. 80(6A), pp. 1605-1628.

Got, J.L., Fréchet, J., and Klein, F.W. 1994. *Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea*. J. Geophys. Res. 99(B8), pp. 15.375–15.386. <https://doi.org/10.1029/94JB00577>

Laske, G., Masters, G., Ma, Z. and

- Pasyanos, M. 2013. *Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust*. Geophys. Res. Abstracts, 15, Abstract EGU 2013-2658.
- Mangga, S.A., Amirudin, Suwarti, T., Gafoer, S., dan Sidarto. 1993. *Peta Geologi Lembar Tanjung Karang, Sumatera (skala 1:250.000)*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- McCaffrey, R. 1991. *Slip Vectors and Stretching of the Sumatran Fore Arc*. Geology. 19(9), p. 881-884. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0881:SVASOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0881:SVASOT>2.3.CO;2)
- Putri, M.K., Suharno, dan Hidayatika, A. 2014. *Introduction to Geothermal System of Way Ratai*. In Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 4-6 June 2014, Jakarta Convention Center, Indonesia.
- Passarelli, L., Heryandoko, N., Cesca, S., Rivalta, E., Rohadi, S., Dahm, T., and Milkereit, C. 2018. *Magmatic or not magmatic? The 2015-2016 seismic swarm at the long-dormant Jailolo Volcano, West Halmahera, Indonesia*. Front. Earth Sci. 6, p.79. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00079>
- Sianipar, D., Sipayung, R., and Ulfiana, E. 2020. *Excessive seismicity over a limited source: the August 2019 earthquake swarm near Mt. Salak in West Java (Indonesia)*. J. Seismol. 24, pp 1189-1204. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09957-w>
- Vavryčuk, V., and Hrubcová, P. 2017. *Seismological evidence of fault weakening due to erosion by fluids from observations of intraplate earthquake swarms*. J. Geophys. Res.: Solid Earth 122(5), pp. 3701-3718. <https://doi.org/10.1002/2017JB013958>
- Waldhauser, F., Ellsworth, W.L., 2000. *A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California*. Bull. Seismol. Soc. Am. 90, pp. 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>.
- Zobin, V.M., and Ivanova, E.I. 1994. *Earthquake swarms in the Kamchatka-Commander Region*. Geophys. J. Int. 117(1), pp. 33-47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03302.x>