

Penentuan Hiposenter Dan Mekanisme Fokus Gempa Bumi $M_{L4,8}$ 1 Januari 2015 Di Sekitar Sesar Matano

Muhammad Fawzy Ismullah Massinai, Muhammad Altin Massinai, Aulia Puji Astuti,
Nurainun Sholihat Arifuddin*

Departemen Geofisika, FMIPA Universitas Hasanuddin, Makassar

**fawzy@sci.unhas.ac.id*

SARI

BMKG mencatat terjadi gempa pada Kamis 1 Januari 2015 pukul 22:20:04,8 waktu GMT atau Jumat 2 Januari 2015 pukul 06:20:04,8 WITA. Hiposenter terletak di 120,870 BT, 2,220 LS dan kedalaman 17 km dengan kekuatan $M_{L4,8}$. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui mekanisme bidang sesar penyebab terjadinya gempa tersebut dengan menggunakan hiposenter dan mekanisme fokus. Penelitian ini menggunakan gelombang gempa/ *waveform* $M_{L4,8}$ 1 Januari 2015 yang terekam pada beberapa stasiun pengamatan gempa milik BMKG. *Waveform* tersebut diolah untuk mendapatkan *arrival time* gelombang P dan S serta polaritas pertama *arrival* gelombang P. Metode yang digunakan untuk menentukan hiposenter adalah Metode Geiger dengan masukan *arrival time* gelombang P dan S. Mekanisme fokus ditentukan menggunakan polaritas fase pertama *arrival* gelombang P dan hiposenter dari langkah sebelumnya. Hiposenter yang didapatkan dari penelitian ini berada pada 2,2073° LS, 120,798° BT dan kedalaman 10 km. RMS hasil perhitungan ini sebesar 0,7391. Mekanisme fokus gempa ini adalah sesar *oblique* yaitu sesar normal dengan komponen sinistral/ *left-lateral strike slip* dengan parameter strike 312°, dip 71° dan rake -14°. Hasil ini konsisten dengan jenis Sesar Matano sebagai kelanjutan dari Sesar Palu-Koro. Gempa ini terjadi akibat aktivitas Sesar Matano. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dari mitigasi bencana alam gempa bumi di daerah sepanjang Sesar Matano.

Kata kunci: hiposenter, mekanisme fokus, Sesar Matano, *oblique*, *left-lateral strike slip*.

ABSTRACT

Earthquake was recorded by BMKG on Thursday January 1, 2015 at 22:20:04.8 GMT or Friday January 2, 2015 at 06:20:04.8 Central Indonesia Time. Hypocenter located at 120.87 E, 2.22 S with depth of 17 km and magnitude $M_{L4.8}$. Purpose of this research is to study fault plane mechanism that cause this earthquake using hypocenter and focal mechanisms. This research used waveform $M_{L4.8}$ January 1, 2015 which recorded at BMKG earthquake observation stations. Waveform is processed to obtain arrival time P- and S-wave and polarity of arrival time P-wave. Method used to determine hypocenter is Geiger Method with input are arrival time P- and S-wave.

How to Cite: Massinai, M.F.I., Massinai, M.A., Astuti, A.P., Arifuddin, N.S., 2020. Penentuan Hiposenter Dan Mekanisme Fokus Gempa Bumi $M_{L4,8}$ 1 Januari 2015 Di Sekitar Sesar Matano. Jurnal Geomine, 8(2): 142-150.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Article History:

Submite 14 Juli 2020

Received in from 15 Juli 2020

Accepted 30 Agustus 2020

Lisensec By:

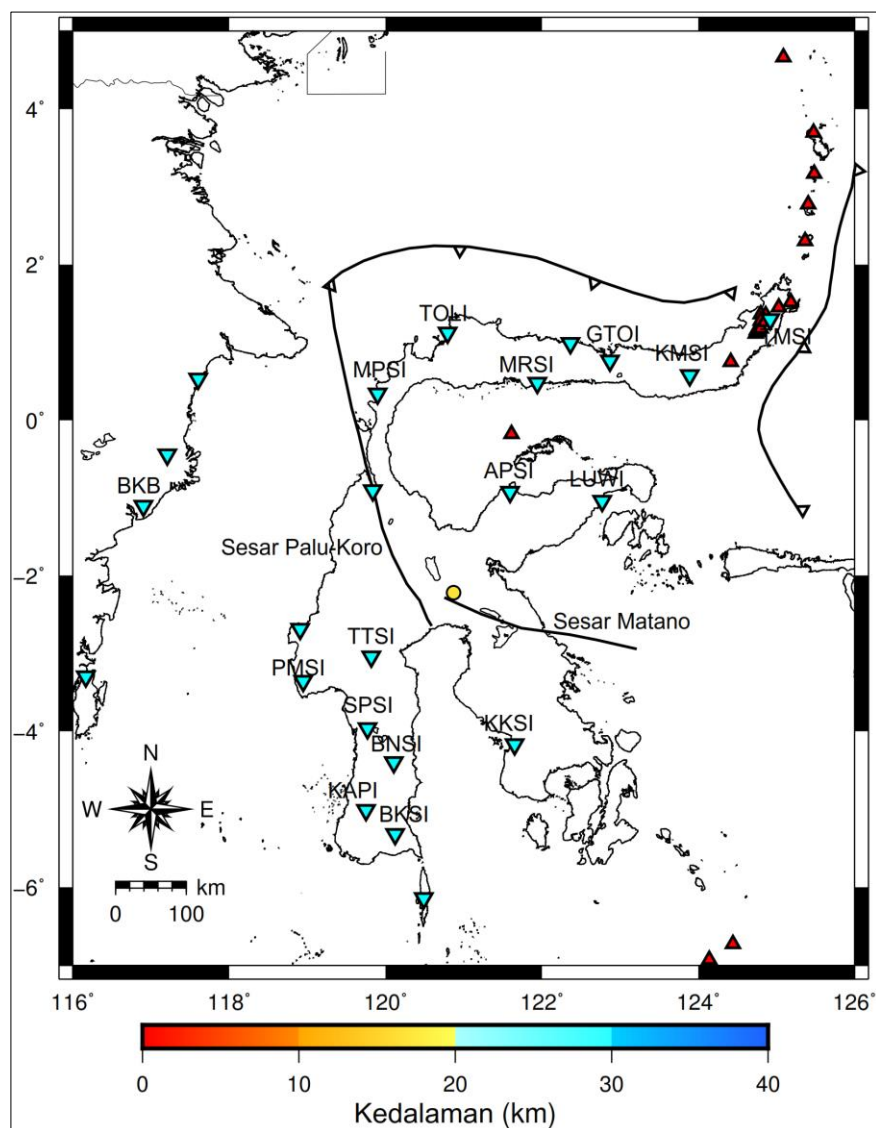
[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Focal mechanisms determined using the first polarity of arrival P-wave and hypocenter from previous step. Hypocenter obtained from this research is located at 2.2073 S, 120.798 E and 10 km depth. RMS is 0.7391. Focal mechanism of this earthquake is oblique fault, is normal fault with left-lateral strike slip component. Parameters are strike 312° , dip 71° and rake -14° . This result is consistent with Matano Fault type as a continuation of Palu-Koro Fault. $M_{L_v}4.8$ January 1, 2015 earthquake occurred because Matano Fault activity. Research results can provide a basis form earthquake hazard mitigation along Matano Fault zone.

Keyword: hypocenter, focal mechanisms, Matano Fault, oblique, left-lateral strike slip.

PENDAHULUAN



Gambar 1. Episenter (titik kuning) dan sebaran stasiun pengamatan gempa milik BMKG di Sulawesi dan sekitarnya.

Sulawesi adalah salah satu daerah dengan tingkat seismisitas yang tinggi di Indonesia (Umar et al., 2016). Hal ini disebabkan oleh gerakan lempeng tektonik sekitar daerah ini (M. F. I. Massinai et al., 2015). Manifestasi dari hal tersebut adalah beberapa sesar, salah satunya adalah sesar Matano. Pada Kamis 1 Januari 2015 waktu GMT atau Jumat pagi 2 Januari 2015

WITA terjadi gempa di sekitar perbatasan Prov. Sulawesi Selatan (Kab. Luwu Timur) dan Sulawesi Tengah (Kab. Morowali Utara. BMKG mencatat bahwa gempa tersebut terjadi pada Kamis 1 Januari 2015 pukul 22:20:04,8 waktu GMT atau Jumat 2 Januari 2015 pukul 06:20:04,8 WITA. Hiposenter terletak di 120,87° BT, 2,22° LS dan kedalaman 17 km dengan kekuatan M_L 4,8 seperti terlihat pada **Gambar 1**. Gempa ini diasumsikan terjadi akibat aktivitas Sesar Matano.

Episenter gempa tersebut terletak di sekitar Sesar Matano. Sesar Matano yang merupakan sesar yang memotong Sulawesi Tengah dan melalui Danau Matano, merupakan kelanjutan dari Sesar Palu-Koro ke arah timur yang kemudian berlanjut dengan prisma akresi Tolo di Laut Banda Utara. Di darat sesar Matano dicirikan oleh kelurusan lembah, yang membentang dari pantai Lengan Tenggara Sulawesi, memotong Sesar Naik Poso di Sulawesi Tengah dan akhirnya bergabung dengan Sesar Palu-Koro (M. A. Massinai et al., 2018). Beberapa penulis percaya bahwa sesar Matano merupakan ujung barat dari sesar Sorong, Irian Jaya (Tjia, 1978). Beberapa penulis juga menuliskan bahwa Sesar Matano merupakan kelanjutan dari sesar Palu-Koro (Hamilton, 1973); (Parkinson & Dooley, 1996); (Watkinson & Hall, 2011). Sesar ini memiliki mekanisme yang sama dengan sesar Palu-Koro yaitu sesar normal dengan komponen mendatar sinistral/ *left-lateral strike slip* (Bellier et al., 2006) berarah baratlaut – timur tenggara kecuali pada segmen Pewusai. Sesar Matano memiliki 6 segmen, yang berurut dari barat ke timur, yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Segmentasi Sesar Matano (Pusgen, 2017).

No	Segmen	Mekanisme	Panjang (km)
1.	Kuleana	Sesar mendatar sinistral/ <i>left-lateral strike slip</i>	22
2.	Pewusai	Sesar naik/ <i>reverse</i>	46
3.	Matano	Sesar mendatar sinistral/ <i>left-lateral strike slip</i>	35
4.	Pamsoa	Sesar mendatar sinistral/ <i>left-lateral strike slip</i>	44
5.	Ballawai	Sesar mendatar sinistral/ <i>left-lateral strike slip</i>	26
6.	Geressa	Sesar mendatar sinistral/ <i>left-lateral strike slip</i>	80

Langkah pertama dalam mempelajari kegempaan dan hubungannya dengan sesar adalah penentuan hiposenter. Hiposenter diperlukan untuk mempelajari struktur, rezim tektonik dan proses yang membangkitkan aktivitas kegempaan di suatu lokasi (M. F. I. Massinai et al., 2017). Ketepatan penentuan hiposenter bergantung pada beberapa faktor, salah satunya adalah *travel time residual* yang kecil. Banyak metode yang telah dikembangkan guna mendapatkan hasil hiposenter yang baik. Salah satunya adalah Metode Geiger (Geiger, 1912). Dasar dari metode ini adalah meminimalisir selisih *travel time* antara data *travel times* observasi dan kalkulasi dengan perhitungan menggunakan jaringan stasiun pengamat gempa bumi dengan memanfaatkan model *travel time* bumi yang sferis (Nugraha et al., 2016). Setelah itu banyak metode yang dapat dilakukan setelah mendapatkan hiposenter. Salah satunya adalah menentukan solusi mekanisme fokus. Mekanisme fokus gempa merupakan metode penentuan parameter orientasi bidang sesar (Umar et al., 2016). Metode ini mampu menjelaskan penjalaran energi gempa bumi yang bersumber dari hiposenter. Pergeseran sesar seringkali dipercaya sebagai sumber energi tersebut, sehingga dengan mempelajari mekanisme penjalarannya akan didapatkan hasil mekanisme pergeseran dari bidang sesar berupa *strike* (jurus sesar), *dip* (kemiringan sesar) dan *rake* (M. F. I. Massinai et al., 2019).

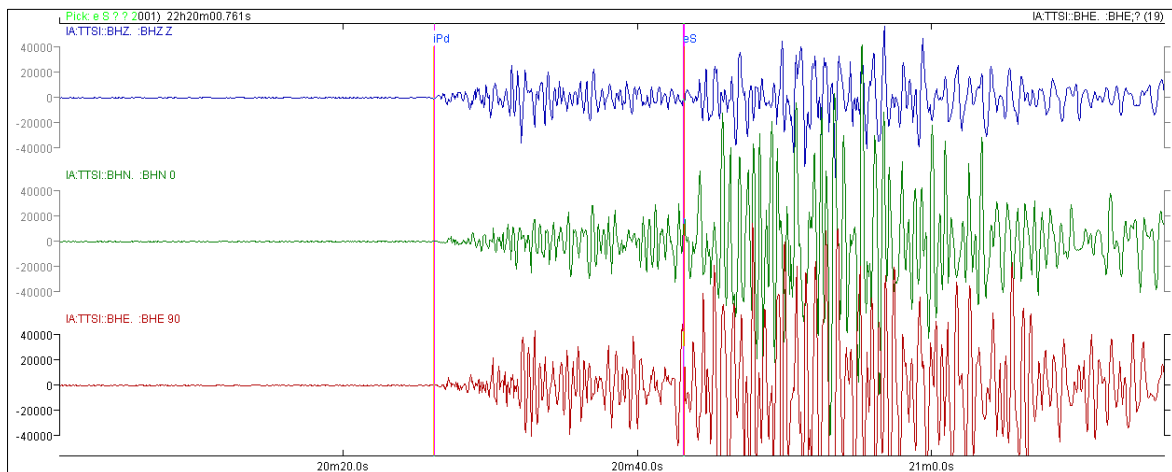
Penelitian di wilayah Sesar Matano masih sedikit (Watkinson & Hall, 2011). Hal ini karena Sesar Matano sering diasumsikan merupakan kelanjutan dari sesar Palu-Koro (Socquet et al., 2006). Penelitian lain di sesar Matano seperti analisis energi kumulatif dan periode ulang untuk mengetahui karakteristik gempa bumi (Kurniawati et al., 2020). Ada pun penelitian yang menggunakan hiposenter dan mekanisme fokus seperti gempa pada tanggal 29 Mei 2017 di Poso, Sulawesi Tengah (M. F. I. Massinai et al., 2019) dan gempa pada tanggal 4 Januari 2009 di Manokwari, Papua Barat (Umar et al., 2016).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui mekanisme bidang sesar penyebab terjadinya gempa M_L 4,8 1 Januari 2015 dengan menggunakan hiposenter dan mekanisme

fokus. Hasil penelitian ini dapat digunakan oleh pihak terkait sebagai dasar penyusunan mitigasi bencana gempa di sekitar daerah penelitian.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan gelombang gempa/ *waveform* $M_{L,4,8}$ 1 Januari 2015 yang terekam pada beberapa stasiun pengamatan gempa milik BMKG (**Gambar 1**). *Waveform* tersebut memiliki informasi mengenai *arrival time* gelombang P (t_p) dan S (t_s) serta polaritasnya masing masing. Penentuan parameter tersebut didasari oleh amplitudo gelombang yang lazimnya disebut *picking arrival time*. *Picking arrival time* gelombang P dilakukan pada komponen BHZ, berwarna biru pada **Gambar 2**. Sedangkan untuk gelombang S dilakukan pada komponen BHN (hijau) atau BHE (merah). Proses ini menghasilkan *arrival time* gelombang P (t_p) dan S (t_s) serta polaritas pertama *arrival* gelombang P. Penentuan polaritas ini dengan melihat arah amplitudo *arrival time* gelombang P. Jika amplitudo berupa puncak maka ditulis sebagai C/ *compression* dan jika lembah ditulis D/ *dilatation*. Hasil *picking arrival time* dapat dilihat di **Tabel 2**.



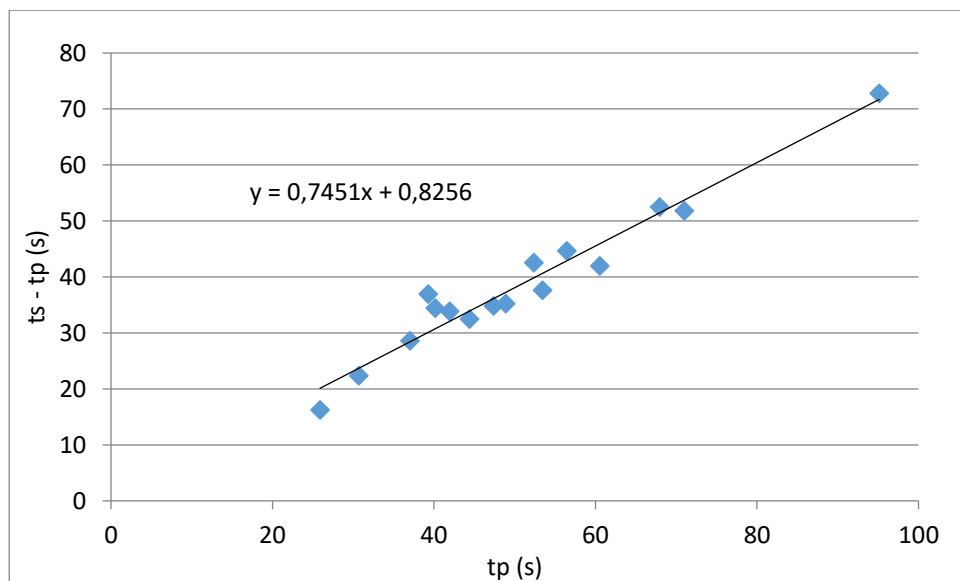
Gambar 2. Contoh proses *picking arrival time* pada stasiun TTSI.

Tabel 2. Hasil *picking arrival time* pada 16 stasiun pengamat gempa bumi.

No	Stasiun	Menit	t_p (detik)	t_s (detik)	$t_s - t_p$ (detik)	Polaritas
1.	TTSI	20	25,891	42,13	16,239	D
2.	APSI	20	30,653	52,982	22,329	C
3.	SPSI	20	37,004	65,566	28,562	C
4.	KKSI	20	39,26	76,185	36,925	C
5.	LUWI	20	40,127	74,523	34,396	D
6.	BNSI	20	41,921	75,726	33,805	C
7.	PMSI	20	44,377	76,842	32,465	C
8.	MPSI	20	47,371	82,144	34,773	C
9.	MRSI	20	48,853	84,027	35,174	C
10.	BKSI	20	52,34	94,854	42,514	C
11.	KAPI	20	53,43	91,01	37,58	D
12.	TOLI	20	56,437	101,09	44,653	C
13.	GTOI	21	0,526	42,471	41,945	C
14.	BKB	21	7,932	60,43	52,498	D
15.	KMSI	21	11	62,803	51,803	C
16.	TMSI	21	35,115	107,899	72,784	C

Kesalahan kecil dalam penentuan *arrival time*/ *picking* dan ketidak-tepatan model kecepatan dapat membuat galat yang besar pada penentuan hiposenter. Verifikasi hasil

penentuan *arrival time* gelombang P dan S menggunakan Diagram Wadati (Nugraha et al., 2019). Asumsi yang digunakan adalah jika t_p dan $t_s - t_p$ masing masing *waveform* diplot dalam sebuah koordinat, maka dapat dibuat garis regresi linier. Gradien garis tersebut adalah $V_p/V_s - 1$. Nilai V_p/V_s sendiri sekitar 1,73. Secara subjektif, jika gradien garis di bawah 0,6 dan di atas 0,8 maka *arrival time* perlu ditentukan ulang. Hasil penentuan t_p dan t_s ini menjadi masukan untuk menentukan hiposenter. **Gambar 3** memperlihatkan Diagram Wadati dari hasil *picking arrival time* sebelumnya. Gradien yang didapatkan sebesar 0,745 sehingga hasil ini dapat diterima.



Gambar 3. Diagram Wadati dari 16 stasiun pengamat gempa bumi.

Studi ini menggunakan program Hypoellipse (Lahr, 2012) untuk menentukan hiposenter. Hypoellipse merupakan program *open source*. Program ini memetakan hiposenter berdasarkan Metode Geiger (Geiger, 1912) yang meminimalisir selisih *travel time* antara data *travel time* observasi dan kalkulasi (Lahr, 2012). Metode ini juga menghitung menggunakan jaringan stasiun pengamat gempa bumi dengan memanfaatkan model *travel time* bumi yang sferis (Nugraha et al., 2016). Selain *arrival time* gelombang P dan S, program ini juga membutuhkan model kecepatan bawah permukaan sebagai masukan. Model kecepatan yang digunakan adalah model IASP91 (Kennett & Engdahl, 1991). Masukan lainnya berupa koordinat posisi masing masing stasiun pengamat gempa bumi.

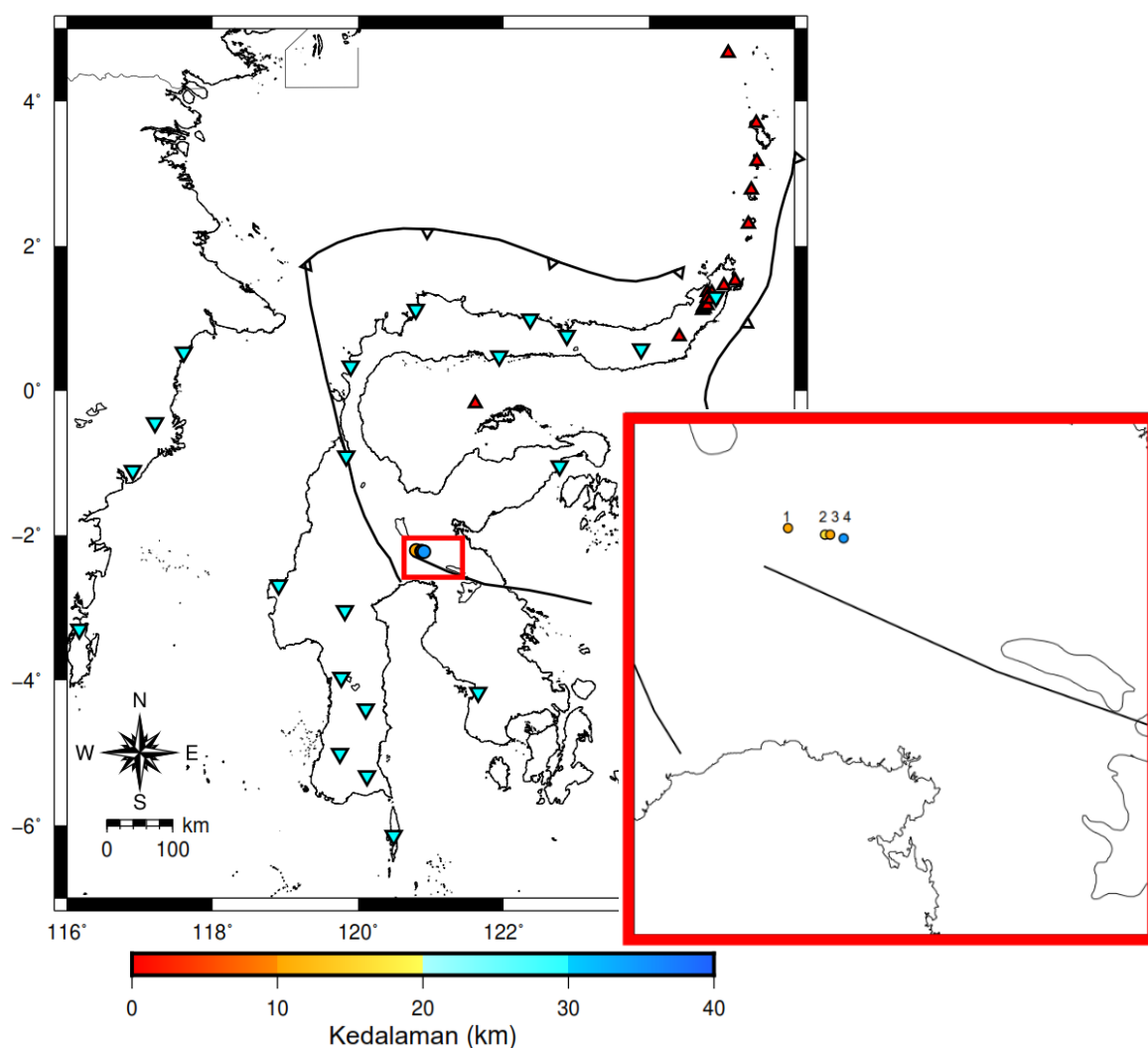
Mekanisme fokus ditentukan menggunakan program Azmtak (Suetsugu, 1997) yang menggunakan polaritas fase pertama *arrival* gelombang P dan hiposenter dari langkah sebelumnya. Program ini merupakan program *open source*. Masukan lainnya berupa koordinat hiposenter dari Hypoellipse dan koordinat posisi masing masing stasiun pengamat gempa bumi. Hasilnya berupa *strike*, *dip* dan *rake* untuk masing masing bidang sesar dan divisualisasi dalam bentuk *beach-ball*. Penentuan bidang sesar yang mengaktifkan gempa tersebut dapat dilakukan dengan membandingkan nilai *strike* yang didapatkan dengan *strike* sesar yang diduga penyebab gempa tersebut.

Peta pada artikel ini dibuat menggunakan program *Generic Mapping Tools* (GMT) (Wessel et al., 2013). Program ini ialah salah satu program *open source* yang digunakan untuk membuat peta.

HASIL PENELITIAN

Hiposenter yang didapatkan dari penelitian ini berada pada 2,2073° LS, 120,798° BT dan kedalaman 10 km. RMS hasil perhitungan ini sebesar 0,7391, lebih kecil dari RMS hasil

perhitungan BMKG yaitu 1,777. Secara statistik, hasil ini lebih baik dari BMKG. Pada **Gambar 4** terlihat hiposenter yang dihasilkan memiliki jarak relatif paling dekat dengan Sesar Matano sehingga secara tektonik hasil ini dapat diterima. Hal ini menunjukkan bahwa gempa $M_{L_v}4,8$ 1 Januari 2015 terjadi akibat aktivitas dari sesar Matano. Pada **Tabel 3** terlihat hiposenter hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil dari lembaga lain. Perbandingan ini menunjukkan bahwa hasil yang didapatkan tidak terlalu berbeda bahkan kedalaman yang didapatkan sama dengan hasil dari GFZ asal Jerman. Namun nilai kedalaman ini perlu dikaji kembali sebab secara *default*, Hypoellipse akan mengeluarkan kedalaman 10 km sebagai model awal yang berarti jika hasil inversi memberikan kedalaman kurang dari 10 km maka yang keluar tetap 10 km.



Gambar 4. Perbandingan posisi episenter: 1 – episenter hasil penelitian ini; 2 – BMKG; 3 – GFZ; 4 – USGS/IRIS.

Table 3. Hiposenter dari penelitian ini, BMKG serta lembaga yang lain.

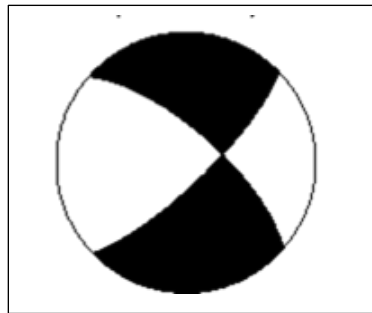
No	Lembaga	Lintang ($^{\circ}$ LS)	Bujur ($^{\circ}$ BT)	Kedalaman (km)	RMS (ms)
1.	Penelitian ini	2,2073	120,798	10	0.7391
2.	BMKG	2,22	120,87	17	1,777
3.	GFZ	2,22	120,88	10	n.a
4.	USGS/ IRIS	2,227	120,906	35	n.a

Perbedaan lainnya sangat dimungkinkan karena modifikasi metode Geiger. Modifikasi ini merupakan kombinasi masukan yakni model kecepatan dan model awal yang digunakan sehingga keakuratan *picking arrival time* gelombang P dan S dalam menentukan model awal sangat mempengaruhi solusi dari metode ini.

Selanjutnya adalah mekanisme fokus. Berikut merupakan hasil penelitian ini dengan parameter sesar yang dapat dilihat pada **Tabel 4** dan dalam bentuk *beach-ball* pada **Gambar 5**.

Table 4. Nilai parameter sesar.

Bidang sesar	Strike ($^{\circ}$)	Dip ($^{\circ}$)	Rake ($^{\circ}$)
1	46	77	-160
2	312	71	-14



Gambar 5. *Beach-ball* mekanisme fokus.

Hasil mekanisme fokus terdapat dua nilai bidang sesar sehingga perlu dianalisa lebih lanjut untuk mengetahui bidang sesar yang mengaktifkan $M_{L4,8}$ 1 Januari 2015 tersebut. Pada **Gambar 1** dan **4**, terlihat Sesar Matano berarah relatif barat laut – timur tenggara. Barat laut relatif berada pada rentang $270^{\circ} - 360^{\circ}$ dan timur tenggara relatif pada rentang $90^{\circ} - 180^{\circ}$. Bidang sesar 1 memiliki nilai strike yang tidak memenuhi kriteria tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa gempa ini diaktifkan oleh bidang sesar 2 dengan parameter *strike* 312° , *dip* 71° dan *rake* -14° .

Posisi hiposenter untuk gempa $M_{L4,8}$ 1 Januari 2015 dari penelitian ini dapat diterima secara statistik dan tektonik sehingga gempa ini terjadi akibat aktivitas Sesar Matano. Mekanisme fokus pada hasil penentuan bidang sesar aktif menunjukkan bidang sesar 1 sebagai bidang penyebab gempa ini. Menurut (Umar et al., 2016), sesar normal ditunjukkan oleh nilai *rake* yang berada pada rentang $-180^{\circ} - 0^{\circ}$ dan sesar naik jika pada rentang $0^{\circ} - 180^{\circ}$. Menurut (Cronin, 2010), interpretasi juga dapat dilakukan melalui *beach-ball*. Jika hanya tiga kuadran yang terlihat maka mekanismenya adalah sesar normal jika titik tengahnya di kuadran putih dan sesar naik jika di kuadran hitam. Sesar *oblique* jika yang terlihat empat kuadran. Bidang sesar selalu berpasangan kuadran hitam dan putih dengan mekanisme pergeseran dari kuadran putih ke kuadran hitam.

Nilai *rake* pada bidang sesar 2 menunjukkan sesar normal. *Beach-ball* yang ditunjukkan memperlihatkan sesar *oblique*. Kuadran hitam relatif berada di kiri atas dan kanan bawah. Garis pada kuadran adalah *strike* masing-masing bidang sesar sehingga nilai *strike* bidang sesar 2 menunjukkan bidang sesar ini bergerak relatif dari kuadran putih di kanan bawah menuju kuadran hitam di kiri atas dan dari kuadran putih di kiri bawah menuju kuadran hitam di kanan atas. Mekanisme ini menunjukkan sesar mendatar sinistral/ *left-lateral strike slip*. Interpretasi ini menunjukkan mekanisme fokus gempa ini adalah sesar *oblique* yaitu sesar normal dengan komponen sinistral/ *left-lateral strike slip* dengan parameter *strike* 312° , *dip* 71° dan *rake* -14° . Hasil ini konsisten dengan jenis Sesar Matano sebagai kelanjutan dari Sesar Palu-Koro.

Sesar di Sulawesi bagian tengah umumnya terhubung, seperti Sesar Palu-Koro dan Sesar Matano (Bellier et al., 2006). Jika ditelusuri ke arah timur akan ditemukan Sesar Sorong yang juga memiliki mekanisme sesar mendatar sinistral/ *left-lateral strike slip* (Bellier et al., 2006); (Socquet et al., 2006). Hal ini terjadi tak lepas dari pertemuan tiga lempeng tektonik

yang lazim disebut *triple junction* di Sulawesi. Mekanisme sesar ini diawali oleh *collision* oleh Lempeng Sunda (Eurasia) di area Kalimantan dan Sulawesi lalu bertemu dengan Lempeng Laut Filipina (Pasifik) ke arah barat menyebabkan Sesar Sorong bertipe sesar mendatar sinistral. Kemenurusan sesar ini berlanjut ke dataran Sulawesi menjadi Sesar Matano dan Sesar Palu-Koro yang membagi Sulawesi menjadi blok selatan bertipe anticlockwise rotation dan blok utara yang bertipe clockwise rotation (Socquet et al., 2006).

KESIMPULAN

Gempa bumi $M_L 4,8$ 1 Januari 2015 terletak di koordinat berada pada $2,2073^\circ$ LS, $120,798^\circ$ BT dan kedalaman 10 km. RMS hasil perhitungan ini sebesar 0,7391. Gempa ini terjadi akibat aktivitas Sesar Matano. Mekanisme fokus gempa ini adalah sesar *oblique* yaitu sesar normal dengan komponen sinistral/ *left-lateral strike slip* yang konsisten dengan tipe mekanisme Sesar Matano dengan parameter yaitu *strike* 312° , *dip* 71° dan *rake* -14° . Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dari mitigasi bencana alam gempa bumi di daerah sepanjang Sesar Matano.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Universitas Hasanuddin, khususnya pada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LP2M) atas dukungan finansial pada penelitian ini, melalui hibah penelitian Internal Unhas skema Penelitian Dosen Pemula Unhas. Terima kasih kepada BMKG atas data yang diakses pada tahun 2015 lalu.

PUSTAKA

- Bellier, O., Sébrier, M., Seward, D., Beaudouin, T., Villeneuve, M., & Putranto, E. (2006). Fission track and fault kinematics analyses for new insight into the Late Cenozoic tectonic regime changes in West-Central Sulawesi (Indonesia). *Tectonophysics*, 413(3–4), 201–220. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.10.036>
- Cronin, V. (2010). *A Primer on Focal Mechanism Solution for Geologists*.
- Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bulletin of St. Louis University*, 8, 60–71.
- Hamilton, W. (1973). Tectonics of the Indonesian Region. *Geology Society of Malaysia*, 6(July), 3–10.
- Kennett, B. L. N., & Engdahl, E. R. (1991). Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105, 429–465.
- Kurniawati, I., Ratri, A. D. P., & Gunawan, T. (2020). Karakteristik gempabumi di sesar matano menggunakan analisis energi kumulatif dan periode ulang. *Jurnal Geoelebes*, 4(1), 33–40. <https://doi.org/10.20956/geoelebes.v4i1.8919>
- Lahr, J. C. (2012). *HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern* (1.1; p. 119). <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>
- Massinai, M. A., Massinai, M. F. I., Harimei, B., & Alimuddin, F. (2018). Analysis of Focal Mechanism Distribution in Northern Sulawesi. *Journal of Physics: Conf. Series*, 1093(012038), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1093/1/012038>
- Massinai, M. F. I., Astuti, A. P., Kiraman, M. R. B., Massinai, M. A., & Ramdhan, M. (2019). Hypocenter Determination and Focal Mechanism Solution of May 29 2017 Earthquake around Poso, Central Sulawesi, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1341(082017), 1–5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/8/082017>
- Massinai, M. F. I., Lantu, L., Aswad, S., & Massinai, M. A. (2015). Tectonics Earthquake Distribution Pattern Analysis Based Focal Mechanisms (Case Study Sulawesi Island, 1993 – 2012). *AIP Conference Proceedings*, 1658(030013), 1–10. <https://doi.org/10.1063/1.4915021>

- Massinai, M. F. I., Nugraha, A. D., Ramdhan, M., & Wandono, W. (2017). Precise Hypocenter Determination around Palu Koro Fault : a Preliminary Results. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 62(012056), 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012056>
- Nugraha, A. D., Supendi, P., Prabowo, B. S., Rosalia, S., Erlangga, Husni, Y. M., Widiyantoro, S., Puspito, N. T., & Priyono, A. (2019). The recent small earthquakes around Lembang Fault, Bandung, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1204(1), 012083. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1204/1/012083>
- Nugraha, A. D., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., & Widiyantoro, S. (2016). Unexpected earthquake of June 25th, 2015 in Madiun, East Java. *AIP Conference Proceedings*, 1730(1), 020001-1-020001–020004. <https://doi.org/10.1063/1.4947369>
- Parkinson, C., & Dooley, T. (1996). Basin formation and strain partitioning along strike-slip fault zones. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 47(8), 427–436.
- Pusgen, P. S. G. N. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017* (M. Irsyam, S. Widiyantoro, D. H. Natawidjaja, I. Meilano, A. Rudyanto, S. Hidayati, W. Triyoso, N. R. Hanifa, D. Djarwadi, L. Faizal, & Sunarjito (eds.); First). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., & Spakman, W. (2006). Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(8), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005JB003963>
- Suetsugu, D. (1997). Source Mechanism Practice. In *Lecture notes International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*.
- Tjia, H. D. (1978). Active Faults in Indonesia. *Geology Society of Malaysia*, 10(December), 73–92.
- Umar, E. P., Bakri, H., & Karnaen, M. (2016). Mekanisme Sumber Gempabumi (Focal Mechanism) Manokwari. *Jurnal Geomine*, 04(1), 11–18. <https://doi.org/100.33536/jg.v4i1.38>
- Watkinson, I., & Hall, R. (2011). The Palu-Koro and Matano faults, Sulawesi, Indonesia: Evolution of an active strike-slip fault system. *Geophysical Research Abstracts*, 13, 8270.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J., & Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 94(45), 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>