

**ANALISIS EFEK DIREKTIVITAS GEMPA BUMI *STRIKE-SLIP* M_w 7.3 FLORES,
14 DESEMBER 2021**

***DIRECTIVITY EFFECT ANALYSIS OF THE M_w 7.3 STRIKE-SLIP FLORES
EARTHQUAKE, DECEMBER 14, 2021***

Rifat Agus Taufik, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia
Iman Suardi*, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia
Dimas Salomo J. Sianipar, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika,
Indonesia

*e-mail: iman.suardi@stmkg.ac.id

Abstrak. Gempa bumi Flores M_w 7.3 pada 14 Desember 2021 bermekanisme *strike-slip* dan memicu kerusakan yang signifikan di wilayah Pulau Flores dan sekitarnya. Pada gempa bumi *strike-slip* bermagnitudo besar, pola penjalaran rekahan (*rupture*) kerap asimetris dan menimbulkan efek direktivitas. Data *waveform* dari 103 stasiun seismik milik jaringan BMKG pada jarak terdekat hingga 950 km dari episenter gempa diolah dengan metode inversi spektrum amplitudo berdasarkan azimuth stasiun menggunakan perangkat lunak Kiwi Tools. Penelitian ini menghasilkan pola direktivitas *rupture* berdasarkan pola durasi semu stasiun, yang mana stasiun yang memiliki azimuth relatif searah dengan penjalaran *rupture* akan mengalami pemendekan durasi semu, begitu pula sebaliknya. Hasil menunjukkan bahwa stasiun yang berada relatif di sebelah barat episenter memiliki durasi semu antara 2 hingga 7 detik, sedangkan stasiun yang relatif di sebelah timur episenter memiliki nilai durasi semu yang lebih tinggi, yaitu antara 12 hingga 18 detik. Dengan pemodelan kurva sinusoidal antara durasi semu dengan azimuth stasiun, diketahui bahwa gempa bumi ini memiliki direktivitas ke arah barat laut pada azimuth -78° atau berarah *strike* 282° , selaras dengan pemodelan mekanisme sumber pada penelitian sebelumnya.

Kata kunci: Gempa bumi Flores 2021, efek direktivitas, inversi spektrum amplitudo, durasi semu, gempa bumi *strike-slip*

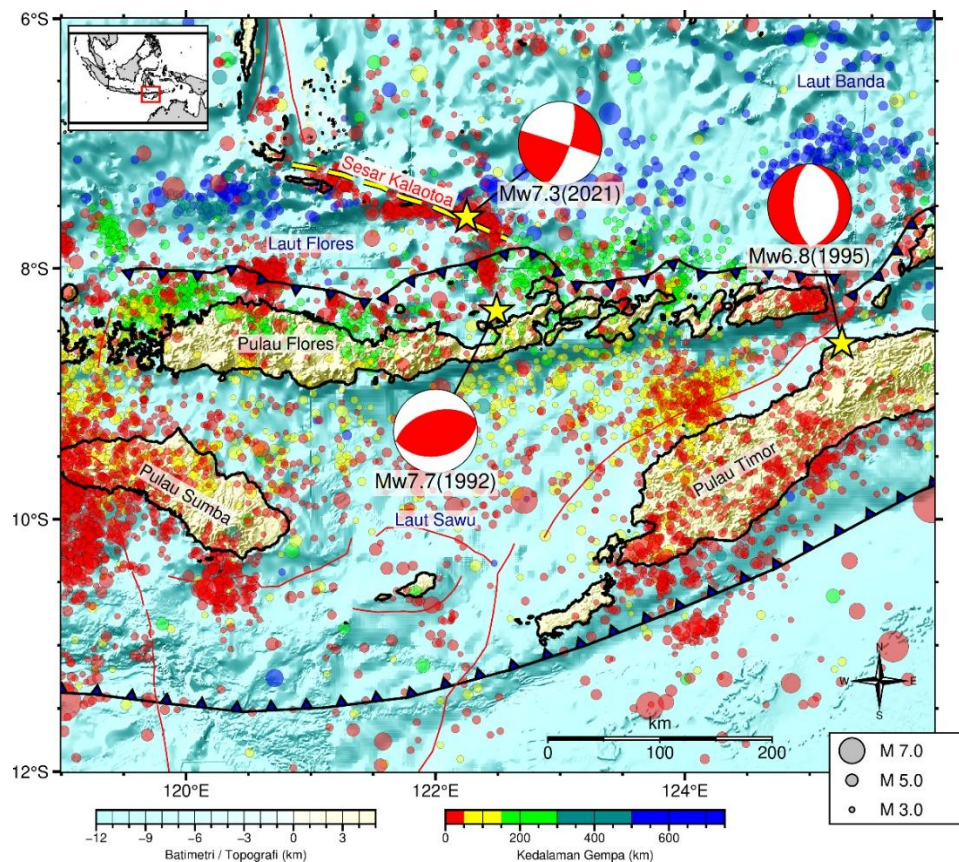
Abstract. The M_w 7.3 Flores earthquake on December 14, 2021, showed a *strike-slip* mechanism and caused significant damage across Flores Island and its surrounding regions. In large *strike-slip* events, *rupture* propagation patterns are frequently asymmetrical, resulting the *directivity* effects. *Waveforms* data from 103 BMKG seismic stations network, located at epicentral distances up to 950 km, were processed using an amplitude spectrum inversion method based on station azimuths using Kiwi Tools software (Cesca et al., 2011). This study derived the *rupture* *directivity* pattern based on the apparent duration at each station, wherein stations with azimuths broadly aligned with *rupture* propagation direction experienced shortened apparent durations, and opposite applies. The results indicate that stations located relatively to the west of the epicenter recorded apparent durations ranging from 2 to 7 seconds, whereas stations to the relative east exhibited longer apparent durations ranging from 12 to 18 seconds. Through sinusoidal curve modelling of the relationship between apparent duration and station azimuth, it was determined that the *rupture* showed a northwestward *directivity* at

an azimuth of -78° (or a strike direction of 282° , which is consistent with the source mechanism models reported in previous studies.

Keywords: 2021 Flores Earthquake, directivity effect, amplitude spectral inversion, apparent duration, strike-slip earthquake

PENDAHULUAN

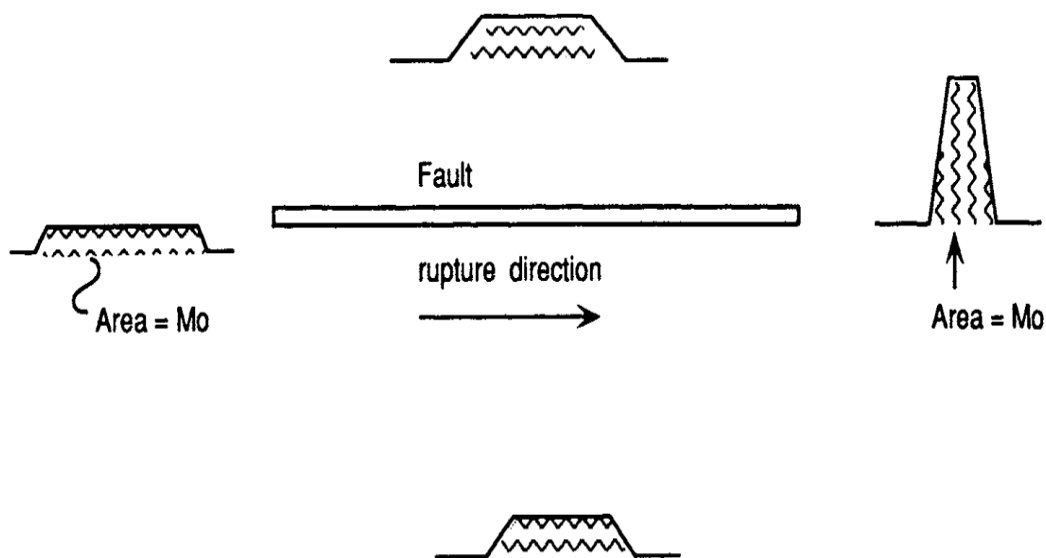
Pulau Flores dan sekitarnya merupakan salah satu wilayah yang memiliki tingkat seismisitas tinggi di Indonesia. Wilayah ini memiliki catatan seismisitas yang signifikan dengan mekanisme gempa bumi yang bervariasi. Berdasarkan peta seismisitas yang disajikan pada Gambar 1, salah satu peristiwa gempa bumi yang paling merusak dan signifikan di wilayah ini adalah gempa bumi Flores M_w 7.3 pada 14 Desember 2021 (BMKG, 2021).



Gambar 1. Seismisitas wilayah Flores dan sekitarnya (2015 – 2025) serta beberapa kejadian gempa bumi signifikan. Data seismisitas bersumber dari BMKG. Data mekanisme sumber berasal dari Global CMT.

Berdasarkan penelitian lanjutan terkait dengan mekanisme gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021 oleh Supendi et al. (2022), diketahui bahwa gempa ini berepisenter pada koordinat 7.555° LS 122.248° BT dengan kedalaman 12.19 km dengan mekanisme sesar geser atau *strike-slip*. Supendi et al. (2022) mengungkapkan bahwa gempa dengan *strike* 288° , *dip* 78° , dan *rake* 169° ini tidak bersumber dari aktivitas Flores *Back-Arc Thrust* yang selama ini mendominasi sumber gempa di wilayah Laut Flores, melainkan dari sebuah sesar geser mengangan (*dextral strike-slip*) yang belum teridentifikasi sebelumnya, yang kemudian diidentifikasi sebagai Sesar Kalaotoa dengan orientasi patahan dekstral berarah barat laut-tenggara.

Pada gempa bumi dengan mekanisme *strike-slip* dan bermagnitudo besar, pola penjalaran rekahan (*rupture*) seringkali menunjukkan ketidaksimetrisan dan menunjukkan efek direktivitas. Efek direktivitas adalah fenomena yang muncul akibat sumber gempa bumi yang bukan berupa titik, melainkan memiliki dimensi spasial dan bergerak di sepanjang bidang sesar. Fenomena ini terjadi ketika *rupture* menjalar menuju ke stasiun pengamat dan menyebabkan pemendekan durasi dan peningkatan amplitudo gelombang sebagai akibat dari efek Doppler (Ben-Menahem, 1961), seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Pemahaman mengenai direktivitas ini berguna untuk mengetahui arah dominan dari penjalaran *rupture*, sekaligus menjawab ambiguitas dalam penentuan bidang sesar (*fault plane*). Oleh karena itu, karakteristik *rupture* pada gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021 akan diteliti untuk memberikan bukti ilmiah terkait dinamika sumbernya, sekaligus memmmberikan informasi terkait karakteristik guncangan gempa yang berguna untuk pemutakhiran peta bahaya seismik di wilayah Pulau Flores dan sekitarnya.

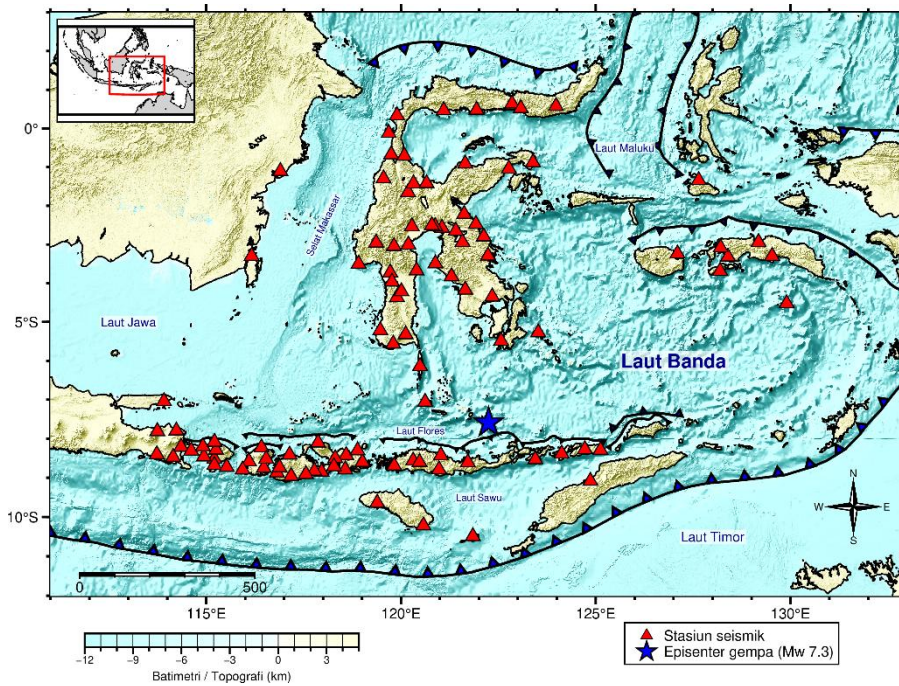


Gambar 2. Variabilitas azimuth fungsi waktu sumber untuk sesar yang pecah secara unilateral (Lay dan Wallace, 1995)

METODE

Untuk mengetahui karakteristik perambatan *rupture* pada gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021, dilakukanlah analisis nilai durasi semu yang terekam pada jaringan stasiun seismik di sekitar episenter gempa bumi. Durasi semu adalah waktu yang dibutuhkan oleh energi seismik untuk dilepaskan sepenuhnya dari sumbernya menurut perspektif stasiun pengamatan (Cesca et al., 2011). Metode ini menggunakan variasi durasi semu yang terekam di berbagai stasiun seismik untuk mengestimasi arah dominan dengan asumsi bahwa stasiun yang berada pada arah perambatan (*forward directivity*) akan merekam durasi semu yang lebih pendek, sedangkan stasiun yang berada pada arah yang berlawanan dengan arah perambatan (*backward directivity*), akibat dari efek Doppler seismik (Cesca et al., 2011).

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah *waveform* komponen SHZ, SHN, dan SHE yang terekam oleh 103 stasiun seismik milik jaringan BMKG pada radius 0 hingga 950 km relatif terhadap episenter gempa, yaitu 7.555° LS 122.248° BT. Peta persebaran stasiun yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sebaran lokasi stasiun seismik untuk analisis direktivitas

Untuk mengetahui nilai durasi semu pada setiap stasiun, dilakukanlah pengolahan *waveform* dengan metode inversi spektrum amplitudo menggunakan perangkat lunak Kiwi Tools (Cesca et al., 2011) yang berjalan pada sistem operasi Linux Ubuntu. Prosedur pengolahan data untuk analisis efek direktivitas dilakukan dengan langkah-langkah berikut.

1. *Pre-processing*

Tahapan ini berfungsi agar *waveform* dapat dianalisis lebih lanjut dengan tepat, meliputi koreksi respons instrumen dan *filtering*. Koreksi respons instrumen diproses dengan menghilangkan sinyal yang terganggu akibat pengaruh alat. Data kemudian dilakukan *filtering* menggunakan *bandpass filter* pada rentang frekuensi 0.012 hingga 0.05 Hz.

2. Inversi durasi semu stasiun

Proses ini dijalankan dengan perangkat lunak Kiwi Tools (Cesca et al., 2011) melalui tiga tahapan berikut.

a. Penentuan Green's function

Seismogram sintetik dibuat dengan menggunakan model kecepatan 1D standar, yaitu AK135 (Kennett et al., 1995). Parameter input yang digunakan meliputi mekanisme gempa bumi (*strike, dip, rake*), kedalaman hiposenter, dan momen seismik (M_0) yang telah diperoleh melalui katalog gempa bumi maupun dari penelitian terdahulu.

b. *Grid search durasi*

Untuk mengestimasi durasi semu, dilakukan iterasi nilai durasi (T) dari rentang terkecil hingga terbesar. Pada tiap-tiap langkah iterasi, *source time function* (STF) dengan durasi T dikonvolusikan dengan Green's function yang telah diperoleh sebelumnya untuk menghasilkan seismogram sintetik lengkap.

c. *Spectral fitting*

Waveform observasi dan sintetik hasil konvolusi ditransformasikan ke dalam domain frekuensi untuk mendapatkan spektrum amplitudonya. Proses inversi dilakukan dengan menghitung nilai *misfit* (selisih error) antara spektrum amplitudo *waveform* observasi dan sintetik pada setiap stasiun untuk setiap variasi nilai durasi

T. Nilai T yang menghasilkan misfit terkecil pada setiap stasiun kemudian dianggap sebagai durasi semu (Δt) untuk stasiun tersebut. Durasi semu pada stasiun dengan azimut φ dinyatakan melalui persamaan berikut (Cesca et al., 2011).

$$\Delta t(\varphi) \approx t_r + \frac{L}{V_R} - \frac{L}{V_P} \cos(\varphi)$$

Keterangan :

- $\Delta t(\varphi)$: Durasi semu di stasiun pengamat
 t_r : *Rise time*, durasi emisi energi seismik dari satu titik di sepanjang sumber
 L : Panjang *rupture*
 V_R : Kecepatan *rupture* yang diasumsikan konstan
 V_P : Kecepatan rata-rata gelombang P di wilayah penelitian
 φ : Sudut azimut stasiun terhadap arah penalaran *rupture*

3. Analisis azimut

Durasi semu (Δt) tersebut kemudian diplot terhadap azimut stasiun untuk melihat pola distribusi variasinya menggunakan perangkat lunak GMT versi 6.6 (Wessel dan Luis, 2019), yang kemudian akan dicocokkan dengan model matematis dari efek direktivitas. Terdapat dua model perambatan yang diuji, yaitu searah (*rupture* unilateral) dan dua arah (*rupture* bilateral) (Cesca et al., 2011).

a. *Rupture* unilateral (kurva sinusoidal dengan sepasang lobus)

$$\Delta t(\varphi) = -A \cos(\varphi - \varphi_0) + B$$

b. *Rupture* bilateral (kurva sinusoidal dengan lebih dari sepasang lobus)

$$\Delta t(\varphi) = A |\cos(\varphi - \varphi_0)| + B$$

Keterangan :

- $\Delta t(\varphi)$: Durasi semu sumber di stasiun pengamat
 φ_0 : Arah utama penalaran *rupture*
 A : Waktu tempuh gelombang P sepanjang *rupture* ($\frac{L}{V_P}$)
 B : Penjumlahan *rise time* dan *rupture time* ($t_r + \frac{L}{V_r}$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai durasi semu setiap stasiun

Sesuai dengan metode yang dilakukan pada bagian sebelumnya, didapatkan nilai durasi semu untuk gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021 pada 103 stasiun seismik milik jaringan BMKG yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Durasi semu dari semua stasiun yang diteliti untuk gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021

No.	Nama Stasiun	Koordinat		Azimut (°)	Lokasi	Durasi Semu (s)
		Latitude (°)	Longitude (°)			
1	AAFM	-8.2734	124.7230	146.96	Stasiun Tipe MR, Alor Selatan, Alor, NTT	15.5
2	AAI	-3.6872	128.1943	45.68	Stasiun LIBRA, Karang Panjang, Sirimau, Kota Ambon, Maluku	10.0

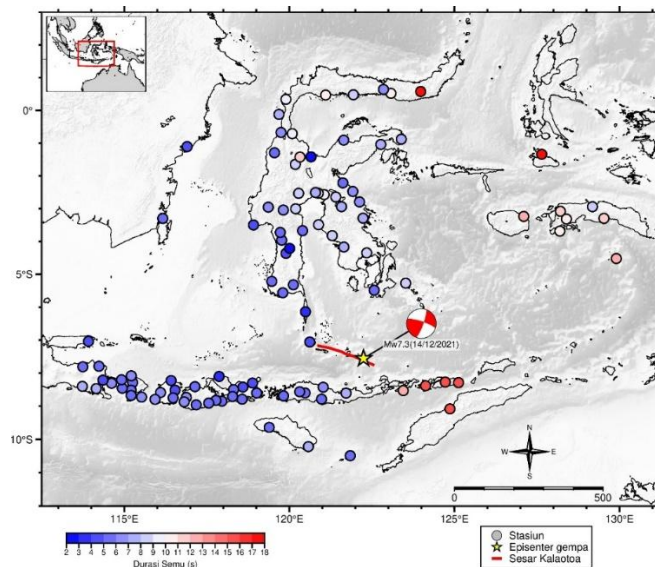
No.	Nama Stasiun	Koordinat		Azimut (°)	Lokasi	Durasi Semu (s)
		Latitude (°)	Longitude (°)			
3	ABJI	-7.7957	114.2342	267.92	Stasiun Asem Bagus, Jawa Timur	5.0
4	ALTI	-8.2907	125.1252	130.47	Stasiun Tipe A, Alor Timur, Alor, NTT	15.5
5	APSI	-0.9108	121.6487	338.56	Stasiun Ampana, Sulawesi	6.0
6	ATNI	-9.0835	124.8644	158.34	Stasiun Atambua	15.0
7	BASI	-10.2189	120.5777	233.39	Stasiun Baing, Sumba	7.0
8	BBSI	-5.4879	122.5706	320.97	Stasiun Bau Bau, Buton	5.0
9	BDBI	-8.5200	115.2088	263.20	Stasiun Badung, Bali	5.5
10	BGCI	-0.8816	123.3911	352.66	Stasiun Tipe A, Balantak, Banggai, Sulawesi Tengah	7.0
11	BHCM	-2.7965	122.1259	335.93	Stasiun Tipe MR, Bahodopi, Morowali, Sulawesi Tengah	6.0
12	BKB	-1.1073	116.9048	311.02	GEOFON Stasiun Balikpapan, Kalimantan Timur	4.0
13	BKSI	-5.3219	120.1224	298.29	Stasiun Bulukumba, Sulawesi	5.0
14	BLCM	-0.1229	119.6871	328.32	Stasiun Tipe MR, Balaesang Tanjung, Donggala, Sulawesi Tengah	7.0
15	BNDI	-4.5224	129.9045	62.02	GEOFON Stasiun Bandaneira	12.5
16	BNTI	-8.7881	120.9768	248.86	Stasiun Tipe A, Bajawa, Ngada, NTT	5.0
17	BSSI	-6.1428	120.4904	290.45	Stasiun Benteng, Pulau Selayar	3.5
18	BTCM	-2.4768	121.9241	335.36	Stasiun Tipe MR, Bungku Tengah, Morowali, Sulawesi Tengah	6.0
19	BYJI	-8.2140	114.3557	265.46	Stasiun Banyu Wangi, Jawa	4.5
20	BYLI	-8.2273	116.4201	264.48	Stasiun Tipe A, Bayan, Lombok Utara, NTB	4.0
21	DBNFM	-8.4241	118.5948	260.75	Stasiun Tipe MR, Donggo, NTB	4.5
22	DBNI	-8.5018	118.3121	260.40	Stasiun Kabupaten Dompu, Sumbawa	5.0
23	DNP	-8.6774	115.2097	262.20	Stasiun Denpasar, Bali	5.0
24	DOCM	-0.6759	119.7487	326.67	Stasiun Tipe MR, Donggala, Sulawesi Tengah	6.0
25	ESNI	-8.8500	117.9600	257.77	Stasiun Empang, Sumbawa, NTB	5.0
26	JAGI	-8.4703	114.1520	264.05	GEOFON Stasiun Jajag, Jawa Timur	7.0
27	JSBFM	-8.8717	116.8165	259.30	Stasiun Tipe MR, Jereweh, NTB	6.0
28	KBBI	-8.2860	115.2547	264.67	Stasiun Tipe B Kintamani, Bangli, Bali	5.0
29	KBKI	-3.2995	116.1668	297.43	Stasiun Kotabaru, Kalimantan	5.0
30	KGCM	0.6397	122.8516	350.29	Stasiun Tipe MR, Kwandang, Gorontalo	6.0
31	KJCM	-5.5646	119.8026	293.95	Stasiun Tipe MR, Kelara, Sulawesi Selatan	5.0
32	KKSI	-4.1718	121.6513	322.46	Stasiun Kolaka, Sulawesi Tenggara	7.0
33	KMBFM	-8.5654	120.3131	255.14	Stasiun Tipe MR, Kuwus, Manggarai Barat, NTT	5.5
34	KMMI	-7.0412	113.9157	272.18	Stasiun Kalianget	4.0
35	KMNI	-8.5883	116.0995	262.11	Stasiun Kota Mataram, NTB	6.5
36	KMSI	0.5745	123.9800	358.10	Stasiun Kotamubagu, Sulawesi	17.0

No.	Nama Stasiun	Koordinat		Azimut (°)	Lokasi	Durasi Semu (s)
		Latitude (°)	Longitude (°)			
37	KRAI	-3.3184	128.3947	44.50	Stasiun LIBRA, Ursana, Kairatu, Seram Bagian Barat , Maluku	10.0
38	LBNFM	-8.6017	119.0124	258.18	Stasiun Tipe MR, Lambu, NTB	5.0
39	LKCI	-3.4921	120.8858	320.32	Stasiun Tipe A, Lasusua, Lasusua, Sulawesi Tenggara	8.0
40	LKUCM	-3.2924	122.2332	334.68	Stasiun Tipe MR, Langgikima, Sulawesi Tenggara	7.0
41	LMTI	-8.6011	120.4771	254.03	Stasiun Tipe A, Langke Rembong, Manggarai, NTT	5.0
42	LOCM	-1.6502	120.1825	325.33	Stasiun Tipe MR, Lore Tengah, Poso, Sulawesi Tengah	8.0
43	LSCM	-4.3650	119.8987	306.13	Stasiun Tipe MR, Lalabati Rilau, Soppeng, Sulawesi Selatan	4.5
44	LSNI	-8.9600	117.1800	258.12	Stasiun Lunyuk, Sumbawa, NTB	5.0
45	LTNI	-8.7500	116.4800	260.60	Stasiun Lombok Timur, NTB	5.0
46	LUCM	-1.4262	120.3225	327.25	Stasiun Tipe MR, Lore Utara, Poso, Sulawesi Tengah	11.5
47	LUWI	-1.0418	122.7717	347.19	GEOFON Stasiun Luwuk, Sulawesi	7.0
48	MKS	-5.2178	119.4696	295.89	Stasiun Gowa, Sulawesi Selatan	5.0
49	MMCI	-2.9560	119.3631	313.12	Stasiun Tipe A, Mamasa, Sulawesi Barat	6.0
50	MPSI	0.3374	119.8980	331.01	Stasiun Mapaga, Sulawesi	9.0
51	MRSI	0.4771	121.9406	343.91	Stasiun Marisa, Sulawesi	8.0
52	MSCM	-2.5358	120.2813	321.57	Stasiun Tipe MR, Masamba, Luwu Utara, Sulawesi Selatan	8.0
53	MTCM	-2.5739	121.0545	327.26	Stasiun Tipe MR, Malili, Luwu Timur, Sulawesi Selatan	9.0
54	NJBM	-8.3098	114.6171	264.80	Stasiun Tipe MR, Negara, Bali	6.0
55	NKBI	-8.7261	115.5260	261.65	Stasiun Tipe B Nusa Penida,Klungkung,Bali	6.0
56	NLAI	-3.2390	127.0998	33.51	Stasiun Namlea, Ambon, Maluku	12.0
57	NSBMM	-3.0829	128.2095	41.64	Stasiun Tipe MR, Neniari, Seram Barat, Seram Bagian Barat, Maluku	11.0
58	OBMI	-1.3413	127.6444	28.75	Stasiun Pulau Obi, Maluku Utara	18.0
59	OMBFM	-8.6912	119.8248	255.10	Stasiun Tipe MR, Komodo, Manggarai Barat, NTT	5.0
60	PAFM	-8.3832	124.1280	188.12	Stasiun Tipe MR, Pantar Tengah, Alor, NTT	15.0
61	PBNI	-8.7900	118.5700	257.17	Stasiun Parado, Bima, NTB	5.0
62	PDLI	-8.1037	117.8729	264.57	Stasiun Tipe A, Tambora, Dompu, NTB	3.0
63	PICM	-0.7110	120.0888	328.59	Stasiun Tipe MR, Parigi Utara,Parigi Moutong,Sulawesi Tengah	9.0
64	PKCI	-4.3507	122.3436	329.28	Stasiun Tipe A, Palangga, Palangga, Sulawesi Tenggara	8.0
65	PLAI	-8.8275	117.7765	258.28	Stasiun Plampang	5.0
66	PMSI	-3.5008	118.9149	307.06	Stasiun Majene, Sulawesi Barat	4.5
67	POCI	-1.4203	120.6570	329.56	Stasiun Tipe A, Poso Pesisir, Poso, Sulawesi Tengah	2.0

No.	Nama Stasiun	Koordinat		Azimut (°)	Lokasi	Durasi Semu (s)
		Latitude (°)	Longitude (°)			
68	PPCM	-3.7270	119.7269	310.12	Stasiun Tipe MR, Patampanua, Pinrang, Sulawesi Selatan	5.0
69	PSJCM	-7.0600	120.6202	277.54	Stasiun Tipe MR, Pasimassungu, Kep. Selayar, Sulawesi Selatan	4.0
70	PWCM	-3.6739	120.4005	315.15	Stasiun Tipe MR, Pitumpanua, Sulawesi Selatan	5.5
71	RDCM	-1.2955	119.5525	322.98	Stasiun Tipe MR, Rio Pakava, Donggala, Sulawesi Tengah	5.5
72	RKCM	-2.9402	121.5806	329.92	Stasiun Tipe MR, Rauta, Sulawesi Tenggara	7.0
73	RNFM	-8.4293	121.0261	254.39	Stasiun Tipe MR, Riung, Ngada, NTT	6.0
74	RSNI	-8.9100	117.5600	257.93	Stasiun Ropang, Sumbawa, NTB	5.0
75	RTBI	-8.4597	114.9420	263.73	Stasiun Rangdo, Negare, Bali	5.0
76	SBBM	-8.2031	114.9179	265.33	Stasiun Tipe MR, Seririt, Bali	5.0
77	SBNI	-10.4923	121.8460	218.71	Stasiun Sabu, NTT	5.0
78	SLBFM	-8.7962	115.9341	260.82	Stasiun Tipe MR, Sekotong Tengah, NTB	6.0
79	SPSI	-3.9646	119.7691	308.58	Stasiun Sidrap, Sulawesi	5.0
80	SRBI	-8.0848	115.2126	265.98	Stasiun Singaraja, Bali	6.0
81	SRMI	-2.9415	129.1818	47.08	Stasiun Tipe A, Olong, Seram Utara, Maluku Tengah, Maluku	8.5
82	SRSI	-2.5316	120.8778	326.06	Stasiun Sorowako, Sulawesi Selatan	9.0
83	SWCM	-4.2145	120.0109	308.13	Stasiun Tipe MR, Sabbang Paru, Wajo, Sulawesi Selatan	2.0
84	TGCM	0.5201	123.0778	351.72	Stasiun Tipe MR, Telaga, Gorontalo	10.0
85	TLCM	-2.5093	120.7944	325.52	Stasiun Tipe MR, Tomoni, Luwu Timur, Sulawesi Selatan	7.0
86	TMTMM	-3.2980	129.5304	51.31	Stasiun Tipe MR, Japutih, Tehoru, Maluku Tengah, Maluku	11.0
87	TOCM	-2.6474	121.4080	329.88	Stasiun Tipe MR, Towuti, Luwu Timur, Sulawesi Selatan	8.0
88	TPCI	0.4675	121.0993	338.48	Stasiun Tipe A, Taopa, Parigi Moutong, Sulawesi Tengah	10.0
89	TSNI	-8.7100	118.2800	258.49	Stasiun Tarano, NTB	5.0
90	TTSI	-3.0451	119.8190	315.39	Stasiun Tana Toraja, Sulawesi	6.0
91	TUJI	-8.4018	113.7322	264.61	Stasiun Tipe B Tumpakrejo, Jember, Jawa Timur	7.0
92	TWSI	-8.7382	116.8821	260.24	Stasiun Taliwang, Sumbawa	6.0
93	USFM	-8.4120	117.1411	262.54	Stasiun Tipe MR, Utan, NTB	5.0
94	WBNI	-8.3026	118.8872	261.58	Stasiun Wera, Bima, NTB	4.0
95	WBSI	-9.6411	119.3911	246.13	Stasiun Waikabubak, Sumba	5.5
96	WEFM	-8.6070	121.7179	246.97	Stasiun Tipe MR, Wewaria, Ende, NTT	7.0
97	WKCM	-3.8259	121.2993	321.62	Stasiun Tipe MR, Wolo, Sulawesi Tenggara	8.0
98	WLFM	-8.5311	123.4499	218.82	Stasiun Tipe MR, Wulandoni, Lembata, NTT	12.5
99	WLTFM	-8.5182	116.5407	262.25	Stasiun Tipe MR, Wanasaba, NTB	4.0

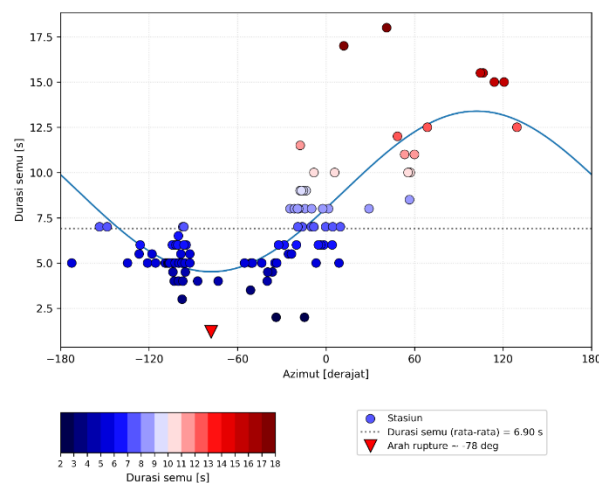
No.	Nama Stasiun	Koordinat		Azimut (°)	Lokasi	Durasi Semu (s)
		Latitude (°)	Longitude (°)			
100	WMCM	-2.2162	121.6220	333.75	Stasiun Tipe MR, Wita Ponda, Morowali, Sulawesi Tengah	5.0
101	WRJI	-7.8113	113.7456	267.87	Stasiun Tipe B Curahdami, Bondowoso, Jawa Timur	5.5
102	WUPCM	-3.0063	120.1927	318.17	Stasiun Tipe MR, Wara Utara, Sulawesi Selatan	8.0
103	WWCI	-5.2724	123.5251	342.46	Stasiun Tipe A, Wangi-wangi, Wakatobi, Sulawesi Tenggara	8.0

Lebih lanjut untuk memudahkan memahami data, dilakukanlah visualisasi dengan menggunakan pemetaan nilai durasi semu sesuai lokasi stasiun yang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta persebaran durasi semu stasiun yang dihasilkan oleh gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021

Selanjutnya, data tersebut dicocokkan dengan model unilateral. Hubungan antara durasi semu dengan azimuth stasiun disajikan pada Gambar 4.



Gambar 5. Plot durasi semu stasiun berdasarkan azimuth relatif terhadap episenter gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021. Sumbu X merupakan azimuth stasiun relatif terhadap episenter gempa dalam derajat. Sumbu Y merupakan durasi semu dalam detik.

Pembahasan

Peta pada Gambar 4 menunjukkan nilai durasi semu pada setiap stasiun yang direpresentasikan melalui gradasi warna dari biru untuk durasi singkat hingga merah untuk durasi panjang. Terdapat pola distribusi yang cukup jelas berdasarkan posisi stasiun relatif terhadap episenter gempa. Stasiun yang berlokasi sebelah barat episenter, meliputi wilayah NTB, Bali, Jawa, sisi timur Kalimantan, serta bagian barat dan selatan Sulawesi secara dominan merekam nilai durasi semu yang singkat dan berwarna biru tua hingga biru muda dengan rentang nilai antara 2 hingga 7 detik. Sebaliknya, stasiun yang berlokasi relatif di sebelah timur episenter, seperti bagian timur Flores hingga Kepulauan Maluku, merekam nilai durasi semu yang lebih panjang. Wilayah ini didominasi oleh warna merah muda hingga merah tua dengan rentang nilai durasi semu sekitar 12 hingga 18 detik.

Sebaran nilai durasi semu dari berbagai stasiun juga disajikan dalam bentuk plot pada Gambar 5. Sebaran nilai durasi semu direpresentasikan oleh titik dengan warna biru untuk durasi singkat, hingga merah untuk durasi panjang. Garis putus-putus horizontal menunjukkan nilai rata-rata dari durasi semu secara keseluruhan, yaitu sebesar 6.9 detik. Pola sebaran durasi semu stasiun membentuk kurva sinusoidal dengan sepasang lobus, yang merupakan indikasi adanya efek direktivitas akibat penjalaran *rupture* yang dominan ke salah satu sisi (*rupture* unilateral).

Variasi nilai durasi semu ini dikendalikan oleh dua hal utama, yaitu direktivitas ke depan (*forward directivity*) dan direktivitas ke belakang (*backward directivity*). Fenomena *forward directivity* terjadi pada stasiun yang berlokasi searah dengan penjalaran *rupture* dan ditandai dengan durasi semu yang singkat. Dalam hal ini, distribusi nilai durasi semu yang singkat terekam pada stasiun yang berada pada azimuth sekitar 10° hingga -180° . Sedangkan nilai durasi semu stasiun yang lebih panjang terdistribusi pada azimuth sekitar 0° hingga 180° . Dari grafik tersebut, didapat juga nilai minimum kurva yang menggambarkan arah *rupture*, yang diestimasi pada azimuth -78° dan ditandai dengan segitiga terbalik berwarna merah.

Dari hasil tersebut, diketahui bahwa pencarian nilai durasi semu menggunakan perangkat lunak Kiwi Tools (Cesca et al., 2011) menunjukkan bahwa gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021 memiliki direktivitas yang mengarah ke arah barat laut. Arah direktivitas yang dihasilkan adalah pada azimuth -78° , atau $N78^\circ W$, atau berarah *strike* 282° . Hasil ini tidak terlalu berbeda jauh dengan pemodelan orientasi patahan yang dilakukan oleh Supendi et al. (2022) yang bernilai $N72^\circ W$ atau berarah *strike* 288° .

Lebih lanjut, efek direktivitas ini mengakibatkan penguatan amplitudo gelombang (amplifikasi) yang dihasilkan oleh gempa bumi pada wilayah yang berada pada zona *forward directivity* (Causse, 2025). Sehingga, pada jarak dan kondisi geologi yang serupa, wilayah yang berada di zona *forward directivity* akan merasakan getaran gempa bumi yang lebih kuat dibandingkan dengan zona *backward directivity*. Hal ini sesuai dengan teori direktivitas yang dibahas oleh Lay & Wallace (1995), yang mana semakin singkatnya durasi semu yang terekam di suatu stasiun seismik, maka akan berimplikasi pada naiknya amplitudo gelombang, yang secara teknis akan menaikkan intensitas guncangan yang terasa.

KESIMPULAN

Dari hasil temuan pada penelitian ini, diperoleh kesimpulan bahwa Gempa bumi Flores M_w 7.3 14 Desember 2021 memiliki karakteristik efek direktivitas yang menunjukkan perambatan *rupture* mengarah ke arah barat laut dengan sudut azimuth -78° atau *strike* 282° yang cocok dengan model *rupture* unilateral dengan sepasang lobus. Hal ini dibuktikan analisis nilai durasi semu, yang mana durasi yang lebih singkat terekam pada stasiun yang berada relatif sisi sebelah barat episenter (*forward directivity*), berkisar antara 2 hingga 7 detik. Sebaliknya,

stasiun-stasiun yang berada relatif di sebelah timur episenter mengalami pelebaran nilai durasi semu (*backward directivity*), berkisar antara 12 hingga 18 detik.

Mengingat kompleksnya sistem sesar pembangkit gempa bumi di berbagai wilayah di Indonesia, maka diperlukan pengetahuan mendalam mengenai mekanisme sumber gempa bumi pada setiap wilayah yang berpotensi terjadi gempa bumi. Oleh karena itu, diharapkan penelitian ini mampu memberikan wawasan bagi wilayah lain terkait dengan karakteristik sesar geser (*strike-slip*) yang dapat menimbulkan potensi penguatan gelombang seismik pada area tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membimbing, membantu, serta berkontribusi dalam penelitian ini, terkhusus untuk Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah menyediakan data untuk penelitian ini. Tanpa adanya pihak-pihak tersebut, penelitian ini tidak akan berjalan dengan lancar. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat untuk pengetahuan mengenai dinamika sumber gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ben-Menahem, A., 1961, Radiation of Seismic Surface-Waves from Finite Moving Sources, hal. 131–136, in Bulletin of the Seismological Society of America
- BMKG, 2021, Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempa Bumi Di Laut Flores Nusa Tenggara Timur 14 Desember 2021:
- Causse, M., 2025, From earthquake rupture to strong ground-motion, Advance Access published 2025
- Cesca, S., Heimann, S., dan Dahm, T., 2011, Rapid directivity detection by azimuthal amplitude spectra inversion, Journal of Seismology, Vol. 15, no. 1, pp 147–164
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R., dan Buland, R., 1995, Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes, pp 108–124
- Lay, T. dan Wallace, T. C., 1995, Modern Global Seismology
- Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B. S., Widiyantoro, S., Simanjuntak, A., Palgunadi, K. H., Kurniawan, A., Marliyani, G. I., Nugraha, A. D., Daryono, D., Anugrah, S. D., Fatchurochman, I., Gunawan, M. T., Sadly, M., dkk., 2022, The Kalaotoa Fault: A Newly Identified Fault that Generated the Mw 7.3 Flores Sea Earthquake, Seismic Record, Vol. 2, no. 3, pp 176–185
- Wessel, P. dan Luis, J. F., 2019, The Generic Mapping Tools Version 6 Geochemistry , Geophysics , Geosystems, pp 5556–5565