

## *Analysis of the Donggala-Palu Tsunami Characteristics based on Rupture Duration ( $T_{dur}$ ) and Active Fault Orientation using the HC-plot Method*

Analisa karakteristik tsunami Donggala-Palu berdasarkan rupture duration ( $T_{dur}$ ) dan orientasi sesar aktif menggunakan metode HC-plot

Ramadhan Priadi\*, Angga Wijaya, Maria Annaluna Pasaribu, dan Riska Yulinda

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

\*Email: ramadhanpriadi6@gmail.com

Submit: 4 Januari 2019; Revised: 20 Juli 2019; Accepted: 1 Agustus 2019

**Abstract:** September 28th, 2018, Donggala-Palu earthquake M 7.5 occurred at depth of 12 km and generated tsunami to be released off the coast in Palu Bay. The tsunami that occurred in Palu was very interesting because the results of the earthquake source mechanism Palu had a type of strike-slip fault that should not have generated a tsunami. This study purpose to estimate the characteristics of the Donggala-Palu tsunami based on rupture duration ( $T_{dur}$ ) and orientation fault activated using the HC-plot method. The data used in this study are data waveforms from 17 seismic stations and CMT Global catalog data with the area of research  $0.87^{\circ}N - 1.78^{\circ}S$  and  $118.64^{\circ}E - 120.95^{\circ}E$ . The waveform data used is a phase P-PP vertical component signal with a Bandpass-filter 1-5 Hz for determination  $T_{dur}$ . The fastest rupture duration from the earthquake source is obtained from the calculation of each station. Delay time measurement after P wave for 90% ( $T^{0.9}$ ), 80% ( $T^{0.8}$ ), 50% ( $T^{0.5}$ ), and 20% ( $T^{0.2}$ ) from its peak value. Then the HC-plot method is used to estimate the orientation of generator fault Palu earthquake and the direction of rupture from the focal mechanism. From the results of processing obtained 2 pairs of seismic stations with almost the same distance but with different azimuths. The fastest rupture duration is at BBSI station with  $T_{dur}$  value of 82.014 s and distance from station to epicenter  $5.559^{\circ}$ . So that the rupture direction is in the azimuth  $150^{\circ}$  from the north. The result of fault orientation was obtained hypocenter distance to the centroid for nodal plane 1 is 6.32 km and nodal plane 2 is 30.17 km with distance centroid to hypocenter is 31.22 km. So in Palu earthquake, the tsunami generator fault was in nodal plane 1 with direction north-south. Criteria obtained indicate that the Palu earthquake M 7.5 has potential for a tsunami because of its  $T_{dur}$  value has meet  $T_{dur} r \leq 65$  s, but from the result of the focal mechanism direction field not passing through the Palu bay is thought to be another parameter that generates a tsunami and Palu koro fault line uncharted.

**Keywords:** rupture,  $T_{dur}$ , Palu-Donggala earthquake, HC-plot

**Abstrak:** Pada tanggal 28 september 2018 terjadi gempa Donggala-Palu M 7.5 dengan kedalaman 12 km yang menyebabkan tsunami dilepas pantai teluk Palu. Tsunami yang terjadi di Palu sangat menarik karena dari hasil mekanisme sumber gempa Palu memiliki jenis patahan strike-slip yang seharusnya tidak membangkitkan tsunami. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi karakteristik tsunami Donggala-Palu berdasarkan rupture duration ( $T_{dur}$ ) dan orientasi sesar teraktifkan menggunakan metode HC-plot. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data waveform dari 17 stasiun seismik dan data katalog Global CMT dengan luasan daerah penelitian  $0.87^{\circ}N - 1.78^{\circ}S$  dan  $118.64^{\circ}E - 120.95^{\circ}E$ . Data waveform yang digunakan merupakan sinyal komponen vertikal phase P-PP dengan filter Bandpass 1-5 Hz untuk penentuan  $T_{dur}$ . Rupture duration tercepat dari sumber gempa diperoleh dari hasil perhitungan masing-masing stasiun. Dilakukan pengukuran delay time setelah gelombang P untuk 90% ( $T^{0.9}$ ), 80% ( $T^{0.8}$ ), 50% ( $T^{0.5}$ ), dan 20% ( $T^{0.2}$ ) dari nilai puncaknya. Kemudian metode HC-plot digunakan untuk mengestimasi orientasi patahan pembangkit gempabumi Palu serta arah rupture dari mekanisme sumber. Dari hasil pengolahan diperoleh 2 pasangan stasiun seismik dengan jarak hampir sama namun dengan azimuth berbeda. Rupture duration tercepat berada di stasiun BBSI dengan  $T_{dur}$  sebesar 82.014 s dan jarak stasiun ke epicenter sebesar  $5.559^{\circ}$ . Sehingga diperoleh arah rupture berada pada azimuth  $150^{\circ}$  dari arah utara. Hasil orientasi sesar diperoleh jarak hiposenter ke centroid untuk nodal plane 1 sebesar 6.32 km dan nodal plane 2 sebesar 30.17 km dengan jarak centroid ke hiposenter sebesar 31.22 km. Maka pada gempa Palu sesar pembangkit tsunami berada di nodal plane 1 dengan arah utara-selatan. Kriteria yang diperoleh menunjukkan jika gempa Palu M 7.5 berpotensi tsunami karena nilai  $T_{dur}$  telah memenuhi  $T_{dur} r \leq 65$  s, namun dari hasil mekanisme bidang patah arah sesar tidak melewati teluk Palu diduga terdapat parameter lain yang membangkitkan tsunami Palu maupun terusan sesar Palu koro yang belum terpetakan.

**Kata kunci:** rupture,  $T_{dur}$ , Gempa Palu-Donggala, HC-plot

## 1 PENDAHULUAN

Daerah Palu merupakan salah satu kawasan seismik aktif di Indonesia. Tingginya tingkat aktivitas kegempaan di kawasan ini tidak lepas dari lokasinya yang berada pada zona benturan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik (Ibrahim dkk., 2010). Pertemuan ketiga lempeng ini bersifat konvergen dan ketiganya bertumbukan secara relatif mengakibatkan Daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya menjadi salah satu daerah yang memiliki tingkat kegempaan yang cukup tinggi di Indonesia berkaitan dengan aktivitas sesar aktif. Wilayah Palu merupakan wilayah yang memiliki potensi kegempaan yang tergolong tinggi sebagai akibat keberadaan Sesar Palu Koro (Walpersdorf dkk., 1998). Sesar Palu Koro merupakan sesar sinistral aktif yang bergerak dengan kecepatan sekitar 25-30 mm/tahun. Pada tanggal 28 september 2018 terjadi gempa Donggala-Palu M 7.5 dengan kedalaman 12 km yang menyebabkan tsunami dilepas pantai teluk Palu dengan ketinggian tsunami mencapai 15 m.

Tsunami yang terjadi di Palu sangat menarik karena dari hasil mekanisme sumber gempa Palu memiliki jenis patahan strike-slip yang seharusnya tidak membangkitkan tsunami. Kriteria untuk gempa tektonik dapat menyebabkan tsunami adalah gempa bumi tersebut memiliki episenter di tengah laut dengan kedalaman dangkal (0-30 km), magnitude dengan kekuatan sekurang-kurangnya Magnitudo 6.5, serta mekanisme sumber dengan pola sesar naik atau turun. Namun pada gempa Palu dari hasil pemodelan gempa Palu Magnitudo 7.5 memiliki mekanisme sumber strike-slip dengan episenter berada di darat. Kriteria yang telah ditetapkan kurang akurat karena tidak berlaku untuk semua kejadian gempa yang berpotensi membangkitkan tsunami. Maka perlu parameter tambahan untuk dapat mengkarakterisasi kejadian tsunami yang terjadi di Palu. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi karakteristik tsunami Donggala-Palu berdasarkan rupture duration ( $T_{dur}$ ) dan orientasi sesar teraktifkan menggunakan metode HC-plot.

Terdapat parameter lain yang dapat dijadikan acuan untuk menentukan kejadian tsunami yaitu rupture duration (Lomax dan Michelini, 2011). Rupture duration dapat merepresentasikan penyebab tsunami dari hubungan antara pangang rupture dan rupture duration dimana panjang rupture sebanding dengan rupture duration, sehingga semakin lama duration rupture maka akan semakin panjang rupture dan momen magnitude yang dihasilkan (Pribadi dkk., 2014). Dari hubungan antara rupture duration dan momen magnitudo dapat mengetahui kriteria gempabumi berpotensi tsunami. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Madlazim dan Hariyono, 2014) gempabumi berpotensi terjadi tsunami memiliki kriteria  $T_{dur} \leq 65s$ ,  $T_d \leq 10s$ ,  $T_{50EX} \geq 1s$ ,  $T_{dur} \times T_d \geq 650s^2$ , dan  $T_{50EX} \times T_d \geq 10s^2$ . Parameter tersebut dapat digunakan untuk menentukan gempa berpotensi tsunami. Nilai  $T_{dur}$  diperoleh dari data waveform yang digunakan merupakan sinyal komponen vertikal phase P-PP dengan filter Bandpass 1-5 Hz (Madlazim, 2011). Gempa yang memiliki  $T_{dur}$  yang lebih lama dari krite-

ria yang ditentukan diidentifikasi sebagai gempa penyebab tsunami sedangkan gempa yang memiliki  $T_{dur}$  lebih cepat diidentifikasi sebagai gempa yang tidak menyebabkan tsunami.

Selain  $T_{dur}$  mekanisme sumber dapat digunakan sebagai parameter tambahan lainnya untuk memberikan informasi orientasi geometri sesar yang terjadi di sumber. Dari orientasi geometri sesar tersebut dapat ditentukan bidang patah teraktifkan dari suatu gempa. Bidang patah teraktifkan dapat ditentukan menggunakan metode HC-plot. Metode H-C plot merupakan metode untuk mengestimasi lokasi centroid terhadap jarak hiposenter (Zahradnik dkk., 2008). Prinsipnya adalah ketika dua bidang patahan yang melewati centroid antara nodal plane I dan nodal plane II terdefiniskan oleh sudut strike dan dip dari solusi momen tensor. Kemudian dengan asumsi jika bidang patahan berbentuk planar, maka bidang patah yang sesungguhnya merupakan salah satu diantara nodal plane I dan nodal plane II yang terdekat dengan hiposenter. Data yang digunakan pada metode HC-plot merupakan data inversi waveform dan bukan data travel time dari gelombang seismik. Dengan menentukan bidang patah teraktifkan pada event gempabumi maka dapat memetakan sesar yang menjadi generator pembangkit utama saat terjadi gempabumi.

## 2 DATA DAN METODOLOGI

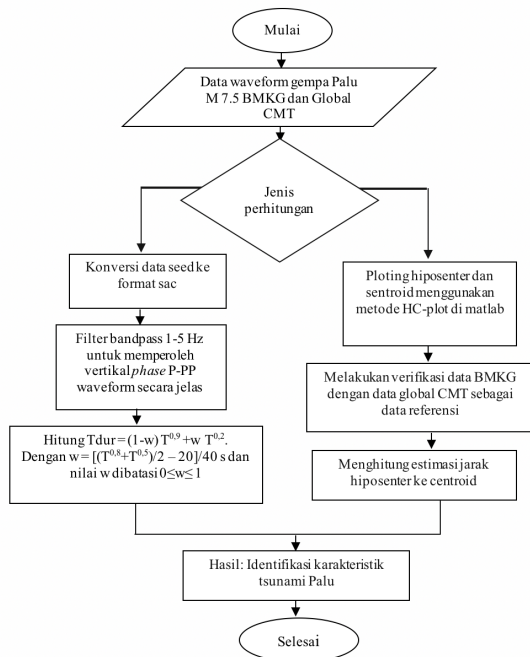
Penelitian ini menggunakan data waveform gempabumi Donggala-Palu M 7.5 pada tanggal 28 september 2018 dengan luasan daerah penelian  $0.87^\circ N - 1.78^\circ S$  dan  $118.64^\circ E - 120.95^\circ E$ . Data waveform yang digunakan merupakan sinyal komponen vertikal phase P-PP dengan filter Bandpass 1-5 Hz yang diperoleh dari webdc3 BMKG. Data momen tensor yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari katalog Global CMT. Data yang diperoleh dari webdc3 merupakan format SEED sehingga perlu dilakukan konversi dalam format SAC untuk dapat dilakukan pengolahan.

Hasil konversi diperoleh dalam 3 komponen yaitu BHN, BHZ, dan BHE dimana untuk perhitungan  $T_{dur}$  hanya menggunakan komponen vertical yaitu BHZ. Sedangkan estimasi plotting hiposenter ke centroid menggunakan hasil inversi waveform untuk penentuan orientasi sesar. Nilai  $T_{dur}$  untuk setiap stasiun dapat dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2) (Madlazim, 2011).

$$T_{dur} = (1 - w)T^{0,9} + wT^{0,2} \quad (1)$$

$$w = \frac{\left[ \frac{T^{0,8} + T^{0,2}}{2} - 20 \right]}{40s} \quad (2)$$

Dimana  $T_{dur}$  merupakan rupture duration,  $w$  adalah konstanta, dan  $T^n$  merupakan delay time gelombang P. Nilai  $T^n$  merupakan delay time setelah gelombang P untuk 90% ( $T^{0,9}$ ), 80% ( $T^{0,8}$ ), 50% ( $T^{0,5}$ ), dan 20% ( $T^{0,2}$ ) dari nilai puncaknya.  $T_{dur}$  menggunakan data komponen vertikal dengan prinsip menerapkan prinsip 4 pole dan filter bandpass 5-20 Hz untuk mendapatkan rekaman seismogram pada frekuensi tinggi, namun pada penelitian ini digunakan filter bandpass 1-5 Hz untuk memperoleh vertikal phase P-PP waveform secara jelas (Lomax dan Michelini, 2012). Data



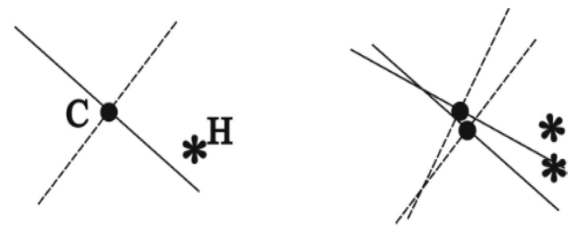
**Gambar 1.** Diagram alir yang menjadi panduan dalam pengerjaan penelitian

high frequency akan dikonversi menjadi *velocity-squared envelopes* untuk memperoleh nilai rms terkecil (Nakamura, 1988). Maka untuk memperoleh nilai  $T_{dur}$  dilakukan picking pada arrival time gelombang P. Dampak tsunami sangat dipengaruhi oleh pergeseran dasar laut.

Gambar 1 memperlihatkan diagram alir penelitian. Karena terdapat subjectivitas dalam melakukan picking phase gelombang maka penentuan phase P-PP pada waveform harus dilakukan secara teliti untuk memperoleh nilai  $T_{dur}$  yang valid. Setelah melakukan picking pada waveform maka dilakukan perhitungan nilai  $T_{dur} = (1-w)T^{0.9} + wT^{0.2}$  dengan nilai  $w$  yang dibatasi  $0 \leq w \leq 1$  menggunakan bantuan matlab. Maka akan diperoleh nilai  $T_{dur}$  komponen  $Z$  untuk satu stasiun.

Perhitungan  $T_{dur}$  dilakukan untuk setiap stasiun seismic pada wilayah penelitian. Sinyal periode pendek yang terekam oleh stasiun dengan jarak stasiun ke epicenter yang hamper sama namun memiliki azimuth yang berbeda digunakan untuk mengestimasi arah rupture. Arah rupture diinterpretasikan dari durasi rupture sinyal yang terekam di stasiun (Lomax dan Michelini, 2011). Diinterpretasikan jika arah rupture menuju ke stasiun dengan durasi rupture tercepat dari pasangan stasiun yang memiliki jarak stasiun ke episenter yang hamper sama namun dengan azimuth yang berlawanan.

Setelah nilai  $T_{dur}$  diperoleh maka dilakukan estimasi orientasi geometri mekanisme sumber sesar menggunakan metode HC-plot. Metode H-C plot merupakan metode untuk mengestimasi lokasi centroid terhadap jarak hiposenter. Data yang digunakan pada metode HC-plot merupakan data inversi waveform dan bukan data travel time dari gelombang seismic (Duputel dkk., 2011). Bidang patah akan diperoleh dari hasil estimasi jarak antara hiposenter terhadap centroid



**Gambar 2.** Stematik posisi hiposenter yang tidak terletak pada salah satu bidang nodal plane

dengan prinsip bidang patah yang relative bergerak merupakan bidang patah yang salah satu diantara nodal plane I dan nodal plane II yang terdekat dengan hiposenter.

Hasil perhitungan yang diperoleh merupakan hasil jarak antara hiposenter ke nodal plane 1, jarak antara hiposenter ke nodal plane 2, dan jarak antara hiposenter ke centroid dari hasil matrik perhitungan (Zahradnik dkk., 2008). Stematik metode H-C Plot dapat menjelaskan notasi H dengan tanda bintang merupakan hiposenter dan C merupakan centroid yang dilewati oleh nodal plane I dan nodal plane II. Wilayah yang oval menunjukkan daerah slip yang dominan. Sedangkan jika hiposenter dan centroid terletak pada bidang I dapat diidentifikasi jika nodal plane I merupakan bidang patah yang teraktifkan.

Terdapat situasi khusus ketika hiposenter tidak terletak dengan bidang nodal manapun seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 2. Maka untuk mengantisipasi hal tersebut dilakukan perbandingan dengan memasukkan beberapa hipocenter dan centroid tambahan sebagai representasi dari ketidakpastian lokasi hiposenter dan centroid sehingga akan ditemukan bidang patah yang teraktifkan merupakan nodal plane yang paling dominan terhadap lokasi beberapa hiposenter.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

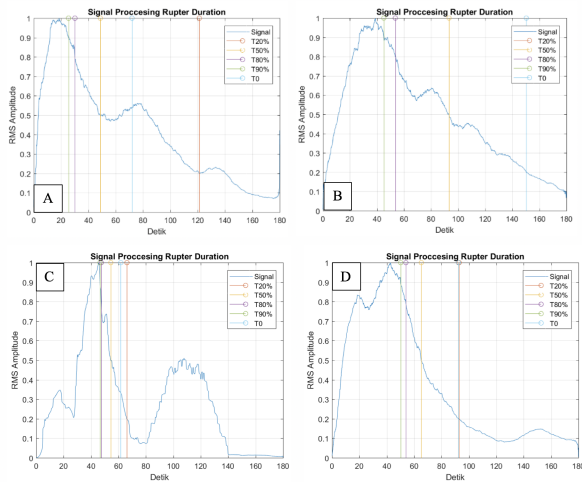
Tsunami dibangkitkan oleh beberapa penyebab diantaranya gempabumi di dasar lautan, letusan gunung api bawah laut, longsoran, dan jatuhnya meteoroid. Pada kejadian tsunami 90% berasal dari hasil tektonik dan 10% lagi disebabkan oleh gangguan lainnya. Pada kasus gempa Palu M 7.5 tsunami yang terjadi didahului oleh gempa kuat namun dengan mekanisme sumber *strike-slip*. Mekanisme sumber *strike slip* kecil kemungkinan untuk dapat membangkitkan tsunami. Maka dilakukan perhitungan durasi rupture pada masing-masing stasiun.

Hasil pengolahan data diperoleh 2 pasangan stasiun seismic yang memiliki jarak yang sama namun dengan azimuth yang berbeda. Stasiun seismic dengan nilai  $T_{dur}$  tercepat adalah stasiun BBSI dengan pasangan stasiun TMSI. Nilai nilai  $T_{dur}$  untuk masing-masing stasiun seismic adalah 82.01 s untuk stasiun BBSI dan 152.3 s untuk stasiun TMSI. Sehingga arah rupture gempa lebih dekat ke stasiun BBSI, maka arah rupture menuju ke stasiun BBSI.

Kemudian pasangan stasiun seismic lainnya adalah stasiun SRSI dan MRSI. Nilai nilai  $T_{dur}$  untuk stasiun SRSI sebesar 61.70 s sedangkan stasiun MRSI sebesar 93.75 s dimana nilai  $T_{dur}$  tercepat berada di stasiun SRSI. Sehingga

**Tabel 1.** Nilai *rupture duration* masing-masing stasiun seismik

Stasiun	$T_{dur}$ (s)	Long	Lat	Jarak	Azimuth
SRSI	61.7033	120.8778	-2.5316	2.156219	154.2193
SMSI	102.05	122.3654	0.9885	2.893826	56.9431
BKSI	103.05	120.1224	-5.3219	4.735414	177.7925
LUWI	107.55	122.7717	-1.0418	2.867516	99.06518
MRSI	93.75	121.9406	0.4771	2.2674	61.92499
BBSI	82.014	122.5706	-5.4879	5.55963	151.7603
MKSI	34.9176	119.898	0.3374	0.928351	177.407
TMSI	152.3	124.92	1.2948	5.324741	69.26965
BNSI	97.9	120.1065	-4.4006	3.814236	177.4981
KMSI	134.25	123.98	0.5745	4.204481	73.92077
SGKI	178.95	117.6043	0.5302	2.590433	115.6223
GTOI	103.6094	122.87	0.76	3.22605	65.26207
PMSI	119.35	118.9149	-3.5008	3.086031	19.4008
MKS	117.8	119.4696	-5.2178	4.651646	5.803985
TOLI2	61.4015	120.7817	1.1112	1.898036	26.32475
SMKI	80.3	117.2085	-0.4461	2.735288	93.01565

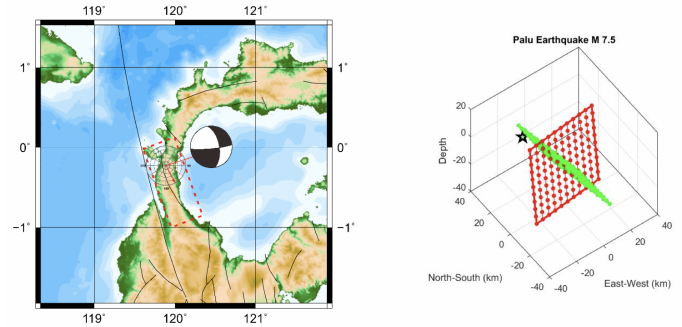


**Gambar 3.** A) Signal processing  $T_{dur}$  di stasiun BBSI, B) Signal processing  $T_{dur}$  di stasiun TMSI, C) Signal processing  $T_{dur}$  di stasiun SRSI, D) Signal processing  $T_{dur}$  di stasiun MRSI

arah rupture menuju ke stasiun SRSI untuk pasangan stasiun SRSI dan MRSI. Nilai  $T_{dur}$  yang diperoleh dapat digunakan untuk mengestimasi nilai azimuth rupture. Arah rupture dari gempa bumi Palu M 7.5 sebesar  $150^\circ$  dari arah utara. Tabel 1 memperlihatkan nilai  $T_{dur}$  untuk setiap stasiun seismik beserta jarak dari stasiun ke episenter gempa.

Dari table 1 diperlihatkan jarak stasiun TMSI ke episenter gempa sebesar  $5.324741^0$  sedangkan untuk stasiun BBSI sebesar  $5.55963^0$ . sehingga kedua stasiun tersebut memiliki jarak stasiun ke episenter yang hampir sama namun dengan azimuth yang berlawanan. Kriteria yang diperoleh menunjukkan jika gempa Palu M 7.5 berpotensi tsunami hal ini karena nilai  $T_{dur}$  yang terukur telah memenuhi  $T_{dur} \geq 65s$  yang tercatat distasiun MRSI dan TMSI. Nilai  $T_{dur}$  merupakan hasil pembobotan dari delay time setelah phase P-PP untuk 90% ( $T^{0.9}$ ), 80% ( $T^{0.8}$ ), 50% ( $T^{0.5}$ ), dan 20% ( $T^{0.2}$ ) dari nilai puncaknya.

Gambar 3 memperlihatkan hasil Signal processing  $T_{dur}$  di stasiun BBSI, TMSI, SRSI, dan MRSI. Stasiun BBSI dan TMSI serta SRSI dan MRSI dipilih sebagai pasangan sta-



**Gambar 4.** Geometri dan orientasi sesar gempa bumi Palu M 7.5

siun karena memiliki jarak yang sama dari stasiun ke episenter gempa namun memiliki azimuth yang berlawanan. Begitu pula dengan stasiun SRSI dan MRSI. Nilai  $T_{dur}$  yang diperoleh sudah melalui pembobotan gelombang P untuk 90% ( $T^{0.9}$ ), 80% ( $T^{0.8}$ ), 50% ( $T^{0.5}$ ), dan 20% ( $T^{0.2}$ ) dari nilai puncaknya. Sehingga nilai  $T_{dur}$  telah dikoreksi dengan rms amplitude. Stasiun terdekat dari episenter gempa seperti TOLI2 tidak dipilih sebagai penentu parameter karena memiliki efek distance terhadap jarak episenter ke stasiun dan tidak memiliki pasangan stasiun yang memiliki jarak sama namun dengan azimuth yang berlawanan.

Selain nilai  $T_{dur}$  digunakan parameter tambahan berupa mekanisme sumber untuk mengkarakterisasi tsunami Palu menggunakan metode HC-plot. Gambar 4 memperlihatkan hasil geometri patahan gempa Palu dari hasil HC-plot. Dari hasil perhitungan gempa Palu dengan strike= $348^\circ$ , dip= $40^\circ$ , slip= $-9^\circ$  memiliki jarak hiposenter ke centroid untuk nodal plane 1 sebesar 6.32 km dan nodal plane 2 sebesar 30.17 km dengan jarak centroid ke hiposenter sebesar 31.22 km. Sehingga pada gempa Palu sesar pembangkit tsunami berada di nodal plane 1 dengan arah utara-selatan.

**4 KESIMPULAN**

Rata-rata mekanisme sumber gempa penyebab tsunami ialah oblique normal atau oblique reverse sedangkan untuk gempa bumi yang tidak berpotensi tsunami memiliki mekanisme sumber strike-slip. Namun berbeda dengan gempa Palu M 7.5 yang memiliki mekanisme sumber strike-slip namun menghasilkan tsunami. Diperoleh jika nilai  $T_{dur}$  berkisar antara 34 s – 152 s sehingga kriteria untuk  $T_{dur} \geq 65s$  terpenuhi yang memungkinkan terjadinya tsunami. Hasil mekanisme sumber diperoleh jika pada gempa Palu sesar pembangkit tsunami berada di nodal plane 1 dengan jarak hiposenter ke centroid untuk nodal plane 1 sebesar 6.32 km yang mengarah utara-selatan. Diduga jika terdapat terusan patahan sesar Palu yang belum terpetakan karena dari hasil mekanisme sumber azimuth rupture berada di  $150^\circ$  dari arah utara sesar yang tidak melewati teluk Palu. Sehingga terdapat parameter lain yang menyebabkan tsunami di Palu terjadi. Perlu tinjauan dan penelitian lebih lanjut untuk mengkarakteristik secara pasti penyebab tsunami Palu.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) yang telah memberikan data.

## DAFTAR PUSTAKA

- Duputel, Z., Rivera, L., Kanamori, H., Hayes, G. P., Hirshorn, B., dan Weinstein, S., 2011. Real-time W phase inversion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63(7), 5.
- Ibrahim, G., Subardjo, dan Senjaya, P., 2010. *Tektonik dan Mineral di Indonesia*. Jakarta, Puslitbang BMKG.
- Lomax, A., dan Michelini, A., 2011. Tsunami early warning using earthquake rupture duration and P-wave dominant period: the importance of length and depth of faulting. *Geophysical Journal International*, 185(1), 283–291.
- Lomax, A., dan Michelini, A., 2012. Tsunami early warning within 5 minutes. *Pure and Applied Geophysics*, 169.
- Madlazim, dan Hariyono, E., 2014. Joko Tingkir program for estimating tsunami potential rapidly. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1617, pp. 57–59). AIP.
- Madlazim, M., 2011. Estimasi Durasi, Arah Dan Panjang Rupture Serta Lokasi-Lokasi Gempa Susulan Menggunakan Perhitungan Cepat. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya (JPFA)*, 1(2), 8–18.
- Nakamura, Y., 1988. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). In *Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 7, pp. 673–678). Tokyo-Kyoto Japan.
- Pasau, G., dan Tanauma, A., 2011. Pemodelan Sumber Gempa di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempa Bumi. *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(2), 202–209.
- Pribadi, S., Puspito, N. T., Yudistira, T., Afnimar, Ibrahim, G., Laksono, B. I., dan Adnan, Z., 2014. Identification of earthquakes that generate tsunamis in Java and Nusa Tenggara using rupture duration analysis. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1617, pp. 116–119). AIP.
- Walpersdorf, A., Vigny, C., Subarya, C., dan Manurung, P., 1998. Monitoring of the Palu-Koro Fault (Sulawesi) by GPS. *Geophysical Research Letters*, 25(13), 2313–2316.
- Zahradnik, J., Gallovic, F., Sokos, E., Serpetsidaki, A., dan Tselentis, A., 2008. Quick fault-plane identification by a geometrical method: Application to the Mw 6.2 Leonidio earthquake, 6 January 2008, Greece. *Seismological Research Letters*, 79(5), 653–662.