

Estimation of Rupture Duration and M_{wp} Values to Identify Tsunami Generating Earthquakes in Northern Sulawesi

Estimasi Durasi *Rupture* dan Nilai M_{wp} untuk Mengidentifikasi Gempa Bumi yang Menghasilkan Tsunami di Sulawesi Utara

Hiola M. F. H.* dan Nasrurroh A.

Program Studi Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika,
Jl. Perhubungan I No.5 Banten, Indonesia, 15221

*Email: hayqalfikri50@gmail.com

Submit: 14 Agustus 2018; Revised: 28 Juli 2019 ; Accepted: 25 Agustus 2019

Abstract: *Sulawesi is an area that has a high potential for tsunamis, especially in the North Sulawesi region due to the presence of a Pundungan Mayu subduction resulting from a double collision between the Maluku Sea plate and Halmahera and Sangihe arcs. Analysis of the duration rupture and estimated M_{wp} has been carried out using the P-wave phase in the North Sulawesi region as one of the tsunami early warning parameters. The data used were teleseismic body wave (300-900) from three tsunami-generating earthquakes with magnitudes above 7 (Sulawesi earthquake November 16, 2008, Celebes earthquake February 11, 2009, Molucca earthquake November 15, 2014) taken from the IRIS waveform catalog with 90 stations BHZ component registrar. The wave used is the P-PP wave phase (20% -90%) with a high frequency bandpass (1-2 Hz) butterworth filter. The results of the duration of the rupture obtained for the Sulawesi earthquake, Celebes earthquake, Molucca earthquake respectively 53.72 s, 52.98 s, 52.50 s. Whereas for M_{wp} , it has conformity with M_w from the IRIS catalog. So it can be concluded that the tsunami-generating earthquake in Sulawesi has a duration of rupture greater than 50 s which can be categorized as tsunamigenic earthquake (≥ 50 s) and the use of M_{wp} can be applied.*

Keywords: *rupture duration, tsunami, Northern Sulawesi, M_{wp}*

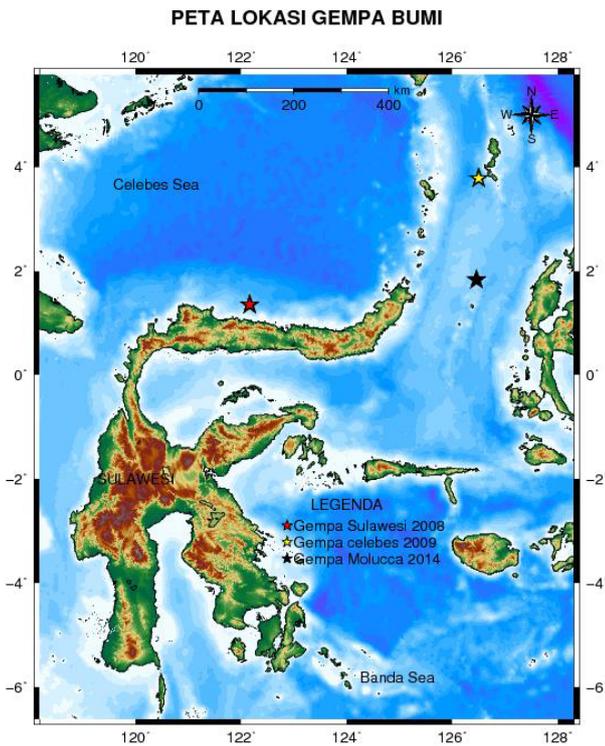
Abstrak: Sulawesi merupakan daerah yang sangat berpotensi tsunami terutama pada daerah Sulawesi bagian Utara akibat adanya penunjaman Punggungan Mayu hasil tumbukan ganda antara lempeng Laut Maluku dengan busur Halmahera dan Sangihe. Telah dilakukan analisis durasi *rupture* dan estimasi M_{wp} dengan menggunakan fase P-wave di daerah Sulawesi bagian Utara sebagai salah satu parameter peringatan dini tsunami. Data yang digunakan adalah teleseismik gelombang badan (300-900) dari tiga gempa pembangkit tsunami dengan magnitude di atas 7 (gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014) yang diambil dari katalog *waveform* IRIS dengan 90 stasiun pencatat komponen BHZ. Gelombang yang digunakan adalah

fase gelombang P-PP (20%-90%) dengan filter butterworth frekuensi tinggi bandpass (1-2 Hz). Hasil durasi *rupture* yang diperoleh untuk gempa Sulawesi, gempa Celebes, gempa Molucca berturut-turut adalah 53.72 s, 52.98 s, 52.50 s. Sedangkan untuk M_{wp} memiliki kesesuaian dengan M_w dari katalog IRIS. Sehingga dapat disimpulkan gempa bumi pembangkit tsunami di Sulawesi memiliki durasi *rupture* lebih besar dari 50 s yang dapat dikategorikan sebagai *tsunamigenic earthquake* (≥ 50 s) dan penggunaan M_{wp} dapat diterapkan.

Kata kunci: durasi *rupture*, Sulawesi bagian Utara, tsunami, M_{wp}

1 PENDAHULUAN

Sulawesi Utara merupakan salah satu wilayah Indonesia dengan tingkat ancaman bencana alam tsunami yang cukup tinggi. Tsunami dapat disebabkan oleh beberapa faktor baik eksternal seperti jatuhnya meteor di laut ataupun faktor internal seperti longsor namun umumnya tsunami di Indonesia disebabkan oleh aktivitas seismik yaitu gempabumi bawah laut dengan magnitude lebih besar dari 7 dengan kedalaman kurang dari 100 km dan deformasi naik atau turun (BMKG, 2012). Tsunami salah satu bencana alam yang berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan erosi dan korban jiwa pada kawasan pesisir pantai dan kepulauan. Salah satu bencana tsunami sangat merusak adalah Tsunami Aceh yang menewaskan ratusan ribu orang dan mengakibatkan kerusakan parah di wilayah terdampak khususnya di wilayah Aceh, atau tsunami mentawai pada tahun 2010 yang mengakibatkan ratusan korban jiwa. Maka diperlukan parameter-parameter sebagai bahan pertimbangan pengambilan keputusan apakah terjadi tsunami atau tidak dalam waktu cepat agar parameter gempabumi dapat disampaikan sedini mungkin termasuk apabila ada potensi terjadi tsunami sehingga waktu untuk evakuasi masyarakat ke tempat aman lebih lama. Waktu ini dikenal dengan sebutan *golden time tsunami* (Pribadi, dkk., 2013). Parameter tersebut diantaranya adalah durasi *rupture* dan M_{wp} .



Gambar 1. nocaption

Durasi *rupture* memiliki korelasi langsung dengan panjang *rupture* (Khoiridah dan Utama 2016) dimana panjang *rupture* (L) adalah parameter yang paling berpengaruh pada kejadian gempabumi (Madlazim, 2011) sehingga dapat menggambarkan ukuran kekuatan gempa yang menyebabkan tsunami. Selain durasi *rupture*, M_{wp} juga dapat digunakan untuk parameter dini tsunami karena metode yang digunakan lebih cepat dan stabil (Tsuboi dkk., 2000) dimana gempa yang digunakan adalah gempa tele (300-900) (Lomax dan Michelini, 2011). Kedua parameter tersebut menggunakan fase *P-wave* sehingga tidak membutuhkan waktu lama dan mengandung informasi yang komprehensif tentang ukuran *event* gempa dan karakter sumber (Boatwright dan Choy, 1986).

Salah satu daerah di Indonesia yang rentan mengalami kejadian tsunami adalah Sulawesi khususnya daerah Sulawesi di bagian Utara yang memiliki aktivitas seismik yang cukup aktif (Cipta, 2009) ditandai dengan banyak sumber-sumber seismik yaitu subduksi Sulawesi Utara (*North Sulawesi Trench/ Minahasa Trench*), Sesar Gorontalo, *Sulu Thrust*, dan tumbukan ganda laut Maluku (*Molucca sea collision*) (Rahayu dan Keumala, 2015). Penulis menggunakan tiga gempabumi pembangkit tsunami (*tsunamigenic earthquake*) yaitu gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 yang diambil dari katalog *waveform Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) dengan 90 stasiun pencatat komponen BHZ teleseismik (300 -900) data gempabumi yang digunakan memiliki magnitudo gempa diatas 7 agar hasil yang didapatkan jelas. Lokasi episenter gempabumi ditunjukkan pada Gambar 1.

Penulis menggunakan perangkat lunak *Seismic Analy-*

Tabel 1. nocaption

Date	Time (UTC)	Region	Magnitude	Latitude	Longitude	Depth (km)
2014-11-15	02:31:42	Northern Molucca Sea	Mw 7	1.83°	126.46°	47.8
2009-02-11	17:34:51	Talud Island, Indonesia	Mw 7.1	3.78°	126.50°	24.2
2008-11-16	17:02:32	Minahasa Peninsula, Sulawesi	Mw 7.3	1.35°	122.16°	28.1

sis Code (SAC) pada Ubuntu untuk mengestrak file mentah dari IRIS dan untuk melakukan berbagai proses pengolahan data (menampilkan sinyal serta menghitung energi, M_o , M_{wp} dan T_{dur}). Sedangkan untuk visualisasi gambar penulis menggunakan perangkat lunak GMT pada Ubuntu. Diharapkan tulisan ini dapat dijadikan sebagai referensi parameter tambahan untuk pertimbangan pengambilan keputusan peringatan dini tsunami yang dapat diterapkan di seluruh wilayah Indonesia yang rentan terjadi tsunami sehingga mitigasi bencana alam tsunami di Indonesia khususnya wilayah Sulawesi bagian utara dapat lebih baik.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Data

Pada penelitian ini, penulis menggunakan 3 data gempa bumi yang memicu terjadinya tsunami di Sulawesi bagian utara. Data tersebut diperoleh dari katalog NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Dalam kurun waktu 1995 – 2017 hanya terdapat 3 gempa bumi di wilayah Sulawesi yang memicu terjadinya tsunami, yaitu gempa Sulawesi tahun 2008, gempa Celebes tahun 2009 dan gempa Molucca tahun 2014, dengan $M_w \geq 7.0$ dan kedalaman dibawah 60 km, seperti yang terlihat pada tabel dibawah.

Sinyal gempa yang digunakan dalam proses pengolahan diperoleh dari IRIS (*Incorporated Incorporated Research Institutions for Seismology*). Rekaman data yang digunakan berupa sinyal *broadband* komponen BHZ gempa teleseismik dengan jarak stasiun ke episenter $30^\circ < \delta \leq 90^\circ$. Tujuannya adalah untuk menghilangkan efek triplikasi, difraksi, dan percampuran fase gelombang antara yang satu dengan yang lain [13]. Terdapat 90 stasiun yang digunakan dalam penelitian ini dengan masing-masing gempa 30 stasiun. Data sinyal diambil dalam format SEED (*Standart for the Exchange of Earthquake Data*) yang kemudian dikonversi ke dalam format SAC (*Seismic Analysis Code*) menggunakan program RDSEED.

2.2 Metodologi

Data dianalisa untuk menghasilkan beberapa parameter penentuan tsunami, yaitu *rupture duration* (T_{dur}), magnitudo momen (M_{wp}), dan rasio antara energi seismik (E) dan momen seismik (M_o).

2.2.1 Rupture Duration (T_{dur})

Lomax dan Michelini (2011) mengemukakan bahwa parameter panjang *rupture* dari suatu gempa bumi merupakan parameter yang paling dominan sebagai penyebab tsunami. Hubungan antara panjang *rupture* (L) dan *rupture duration*

adalah sebanding. *Rupture duration* dapat diperoleh melalui persamaan matematis sebagai berikut (Hara, 2007).

$$T_o^3 = \frac{M_o^2 W}{K^2 E} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{15\pi\rho\alpha^5} + \frac{1}{15\pi\rho\beta^5} \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{x(1-x)^2} \quad (3)$$

dimana T_o adalah durasi *rupture* (s), α adalah kecepatan gelombang P ($5 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$), β adalah kecepatan gelombang S ($\alpha/\sqrt{3}$), x adalah fungsi waktu dalam 0.1 - 0.5, W adalah koefisien, ρ adalah densitas material sumber ($2,6 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$), E adalah energi seismik dari fase gelombang P-PP (N.m), K adalah densitas material gelombang P dan S.

Prosedur pengolahan T_{dur} melalui beberapa tahap sebagai berikut:

- Menyediakan seismogram komponen vertikal dalam format SAC sebagai *raw data*.
- Memfilter sinyal menggunakan filter *high frequency band-pass* Butterworth 1 – 2 Hz untuk mendapatkan seismogram rekaman kecepatan pada *high frequency* (HF) untuk masing-masing stasiun, yang didapat dari proses FFT.
- Mengonversi seismogram HF tersebut menjadi *velocity-squared envelopes* untuk mendapatkan rms amplitudo dan dilakukan normalisasi untuk mendapatkan nilai amplitudo positif maksimum.
- Melakukan *picking* fase gelombang P – PP secara manual dan dikoreksi menggunakan Tau-P sebagai nilai T_{dur} masing-masing stasiun
- Nilai durasi *rupture* diperoleh dari nilai rata-rata seluruh stasiun (Tsuboi dkk., 1995).

2.2.2 Rasio Energi Seismik dan Momen Seismik (M_o)

Momen seismik adalah besaran yang dapat menggambarkan besar energi yang dilepaskan dari suatu gempa bumi. Berdasarkan metode Tsuboi (2000), M_o dapat ditentukan sebagai pergeseran komponen vertikal dari gelombang P yang dapat dirumuskan melalui persamaan berikut.

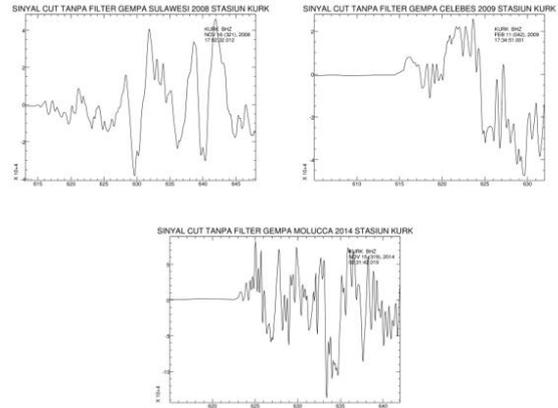
$$M_o = |Max(\int u_z(x_r, t) dt)| \frac{4\pi\rho\alpha^3 r}{F^p} \quad (4)$$

dimana M_o adalah momen seismik, $u_z(x_r, t)$ adalah nilai pergeseran pada komponen vertikal gelombang P, ρ adalah densitas, α adalah kecepatan gelombang P sepanjang jalur perambatan, R adalah jarak episenter, F^p adalah pola radiasi.

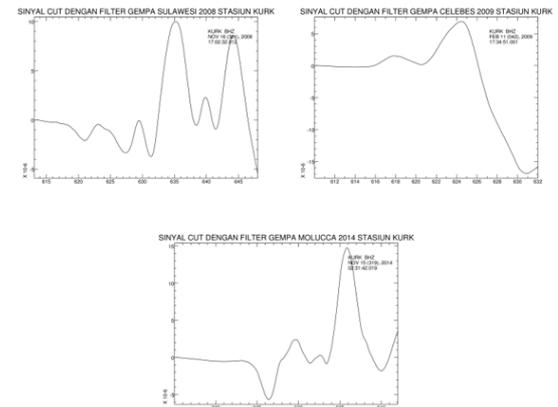
Sedangkan estimasi radisi energi seismik yang menggunakan gelombang P dapat diperoleh menggunakan formula sebagai berikut.

$$E = (1 + q)4\pi r^2 \frac{(F^p)^2}{(F_g F^p)^2} \rho \alpha \int v^2(t) dt \quad (5)$$

Berikut prosedur pengolahan sinyal untuk mendapatkan momen seismik dan energi seismik :



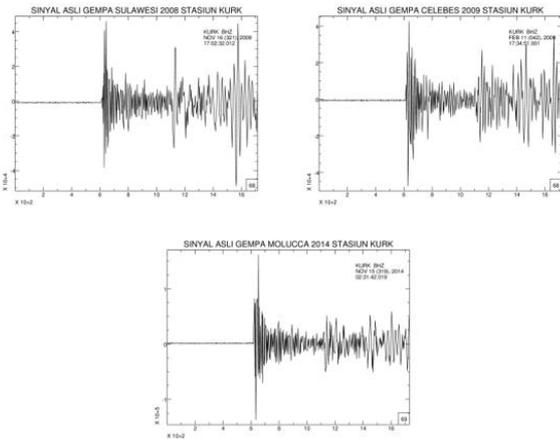
Gambar 2. Sinyal seismik sebelum *cut* dan filter *lowpass* untuk gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 pada stasiun KURK



Gambar 3. Sinyal seismik setelah *cut* dan filter *lowpass* untuk gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 pada stasiun KURK

- Mengubah sinyal seismogram sensor *broadband* komponen vertikal yang berupa kecepatan menjadi sinyal pergeseran dengan cara integrasi.
- Melakukan filter *low pass* menggunakan filter *bandpass* butterworth 0.01 – 0.1 Hz berdasarkan hasil FFT. Filter penting dilakukan untuk memperjelas rekaman sinyal dan menggambarkan frekuensi sinyal seismik (menghilangkan *noise*) untuk mempermudah proses *picking*.
- Melakukan *picking* gelombang P (10s sebelum waktu tiba gelombang P sampai 10s sebelum waktu tiba gelombang S untuk mendapatkan gelombang P (Lomax dkk., 2007)).
- Menghitung nilai M_o menggunakan persamaan (4) dan nilai E menggunakan persamaan (5)

Sinyal yang digunakan untuk menghitung nilai M_o dan E tunjukan pada gambar dibawah.



Gambar 4. Rekaman sinyal seismik utuh setiap gempa pada stasiun KURK

Untuk mendapatkan rasio antara energi dan momen seismik dapat dicari melalui persamaan berikut.

$$\theta = \log_{10} \frac{E}{M_o} \quad (6)$$

Parameter rasio dapat digunakan sebagai parameter penentuan tsunami. Kebanyakan gempa bumi memiliki nilai $\theta \approx -4.9$ sedangkan untuk θ kurang dari -5.9 sampai -6.3 ditemukan pada gempa bumi yang menimbulkan tsunami (Weinstein dan Okal, 2005).

2.2.3 Magnitude Momen (M_{wp})

M_{wp} merupakan magnitude momen gelombang P yang dihitung dari perpindahan komponen vertikal gelombang P. M_{wp} diperoleh dengan menambahkan 0.2 pada nilai rata-rata dari M_w (magnitude momen) yang dapat dihitung menggunakan formula sebagai berikut (Tsuboi, 2000).

$$M_w = \frac{\log M_o - 9.1}{1.5} \quad (7)$$

dimana M_w = momen magnitude dan M_o = momen seismik (N.m).

Prosedur pengolahan M_{wp} sama dengan pengolahan M_o yang kemudian setelah mendapatkan M_o dilanjutkan dengan perhitungan pada persamaan (7) untuk mendapatkan M_w lalu ditambah 0.2 untuk mendapatkan M_{wp} .

3 HASIL DAN DISKUSI

Data stasiun yang digunakan oleh penulis pada tulisan ini telah disaring dengan melihat kualitas rekaman sinyal gempa setiap stasiun yang baik dan menghindari gangguan seperti noise atau gangguan agar didapatkan kualitas hasil yang baik.

Dari hasil pengolahan yang diperoleh didapat parameter M_{wp} dan T_{dur} serta rasio energi/ M_o yang ditunjukkan pada Tabel 1 dibawah.

Hasil pengolahan nilai *rupture duration* terlama terjadi

Tabel 2. Tabel hasil pengolahan

Gempabumi	E (energi) (Nm)	M_o (momen seismik) (Nm)	θ (Ratio E/ M_o)	M_{wp}	Rupture duration
Sulawesi November 2008	1.82E+15	4.61E+19	-4.63	7.11	53.72
gempa Celebes Februari 2009	3.30E+15	3.53E+19	-4.21	7.01	52.98
gempa Molucca November 2014	7.24E+14	4.23E+19	-4.53	6.95	52.50

pada gempa Sulawesi 2008. Hal ini diakibatkan oleh magnitude yang besar ditandai dengan energi dan momen seismik lebih besar begitupun sebaliknya pada gempa dengan magnitude yang lebih kecil, *rupture duration* yang dihasilkan lebih cepat. Dari ketiga gempa pembangkit tsunami dengan batas minimum magnitude 7[1], *rupture duration* yang dihasilkan berkisar diatas 50 s sesuai dengan pernyataan Geist and Yoshika(1996) serta Lomax and Michellini(2011) bahwa gempa pembangkit tsunami umumnya memiliki *rupture duration* lebih besar dari 50 s.

Pengolahan *rupture duration* cenderung memiliki korelasi linear atau berbanding lurus dengan kekuatan gempa yang dihasilkan dan digambarkan dalam grafik berikut.

Gambar diatas memperlihatkan hasil pengolahan M_{wp} ketiga gempa untuk setiap stasiun KURK dimana penulis menggunakan impuls awal gempa.

M_{wp} yang dihasilkan penulis tidak jauh berbeda dari M_w hasil perhitungan IRIS dan dapat ditarik disimpulkan bahwa kedua magnitude M_w dan M_{wp} memiliki korelasi yang baik terbukti melewati ambang batas magnitude 7 untuk terjadinya tsunami di wilayah Indonesia setelah dilakukan pembulatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.

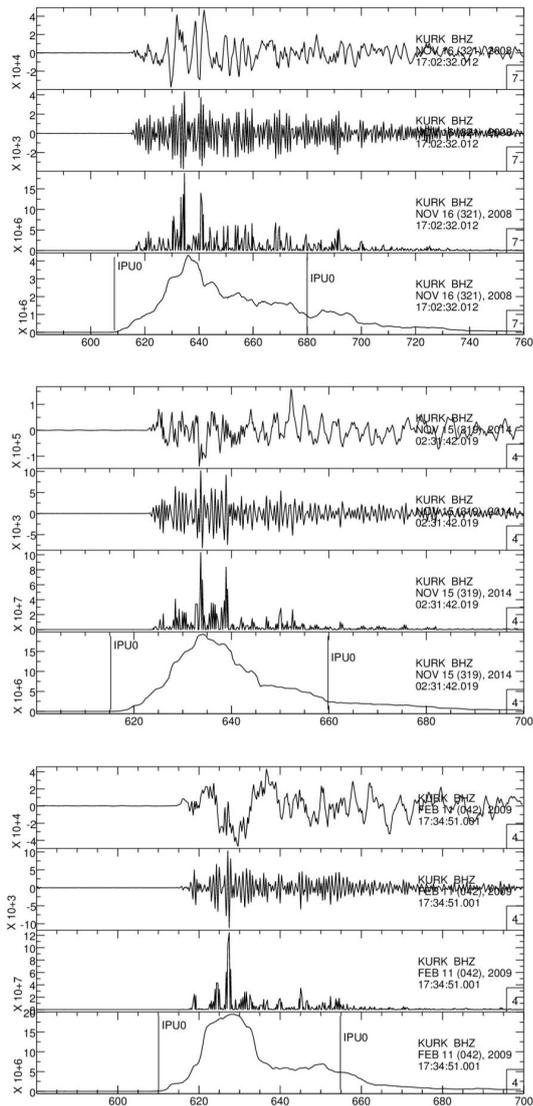
Kurva bergerak secara linear dan selisih M_{wp} dan magnitude IRIS hanya berselisih sekitar 0.1 hingga 0.2. Disisi lain, magnitude yang dihasilkan dari metode M_{wp} sangat efektif karena waktu yang dibutuhkan sangat cepat umumnya kurang dari 50 detik dengan hanya menggunakan impuls awal gelombang P dan telah dapat menggambarkan kekuatan gempa secara utuh.

Perhitungan E diperlukan untuk mendukung pengolahan sebelumnya yaitu M_{wp} dan *rupture duration* sebab *rupture* gempa bumi dipengaruhi oleh energi yang dilepaskan oleh sumber gempa bumi tersebut dan diilustrasikan sebagai momen seismik (M_o) yang mengakibatkan terbentuknya luas dan slip dari *rupture* sebagaimana dinyatakan pada persamaan 2.28 (Madlazim, 2011).

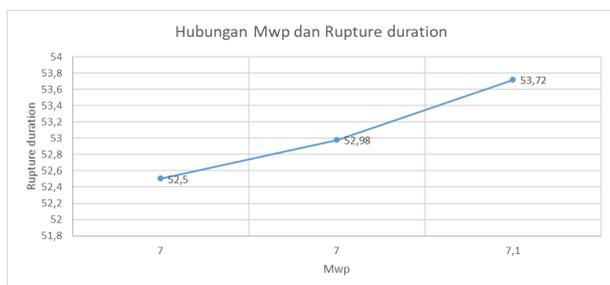
Dari perhitungan rasio energi dan momen seismik diperoleh bahwa ketiga gempa pembangkit tsunami di Sulawesi bagian utara memiliki nilai rasio (θ) ≥ -5 dan semakin besar kekuatan gempa maka energi dan momen seismik gempa cenderung semakin besar. Hasil ini membuktikan bahwa ketiga gempa tersebut masuk kategori *tsunamigenic earthquake* dan didukung dengan penelitian (Sugeng dkk., 2013) yang mengkategorikan *tsunamigenic earthquake* ≥ -5.5 .

4 KESIMPULAN

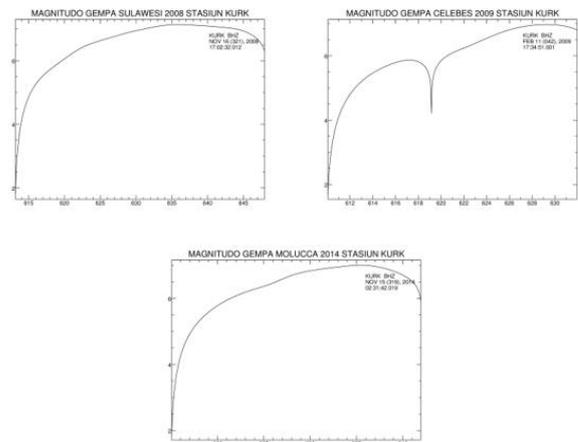
Rupture duration dan M_{wp} dapat menggambarkan kekuatan gempa sebenarnya dan efektif untuk mitigasi bencana alam tsunami karena waktu perhitungan yang cepat. Kedua parameter tersebut dapat didukung oleh rasio E/M_o sehingga memberikan hasil yang lebih akurat dalam pertimbangan



Gambar 5. Pengolahan *rupture duration* gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 pada stasiun KURKK



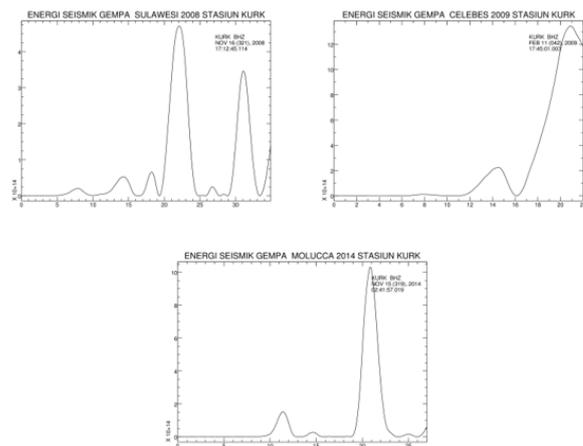
Gambar 6. Hubungan M_{wp} dan *rupture duration*



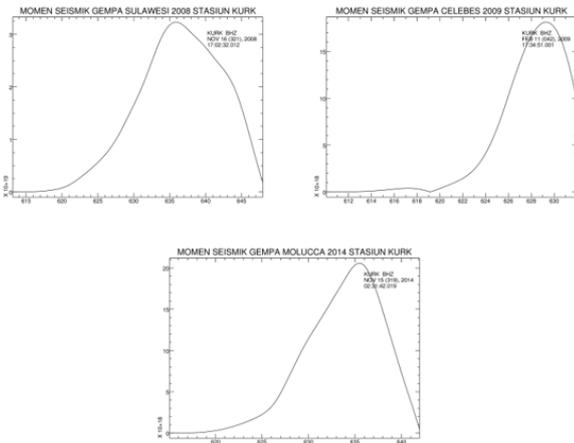
Gambar 7. Pengolahan M_{wp} gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 pada stasiun KURK



Gambar 8. Perbandingan magnitudo dengan menggunakan metode M_{wp} dan hasil M_w IRIS



Gambar 9. Hasil pengolahan energi seismik gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 pada stasiun KURK



Gambar 10. Hasil pengolahan momen seismik gempa Sulawesi 16 November 2008, gempa Celebes 11 Februari 2009, gempa Molucca 15 November 2014 pada stasiun KURK

pengambilan keputusan potensi tsunami suatu kejadian seismik.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada dosen pembimbing kami terutama bapak Sugeng Pribadi selaku dosen pengampuh mata kuliah untuk monitoring tsunami. Terima kasih untuk kampus kami Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) sebagai tempat menempuh pendidikan dan mengembangkan diri bagi penulis. Terima kasih untuk teman-teman pendidikan penulis yang telah membantu untuk sharing ilmu pengetahuan. Terima kasih untuk Canonical Ltd sebagai develop Ubuntu yang digunakan penulis untuk pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2012. Pedoman Pelayanan Peringatan Dini Tsunami.
 Boatwright, J. dan Choy, G., 1986. Teleseismic Estimates of Energy Radiated by Shallow Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 91(B2), pp. 2095-2112.
 Cipta, A., 2009. Gempabumi Dan Tsunami Gorontalo, 17 Nopember 2008. *Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi*, Volume 4 Nomor 1, Januari 2009 : 1-12
 Geist, E. dan Yoshioka, S., 1996. Source Parameters Controlling the Generation and Propagation of Potential Local Tsunami, *Natural Hazards* 13: 151177.
 Khoiridah, S. dan Utama, W., 2016. Estimasi Karakteristik Durasi Rupture Pada Gempa Pembangkit Tsunami Studi Kasus: Gempa Bumi Nias, 28 Maret 2005. *Jurnal Geosaintek*. 02 / 03 Tahun 2016 Jurusan Teknik Geomatika, FTSP Institut Teknologi Sepuluh Nopember
 Lomax, A., Michelini, A., dan Piatanesi, A., 2007. An Energi-Duration Procedure for Rapid Determination of Earthquake Magnitude and Tsunamigenic Potential. *Geophys. J. Int.*, 170, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03469.x. pp.1195-1209.

Lomax, A. dan Michelini, A., 2011. Tsunami Early Warning using Earthquake Rupture Duration and PWave Dominant Period: The Importance of Length and Depth of Faulting. *Geophys. J. Int.*, 185: 283291. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2010
 Madlazim, 2011. Toward Indonesian Early Warning System by Using Rapid Rpture Duration Calculation, *Journal of Tsunami Society International*, Vol.30, Nomer 4.
 Pasau, G. dan Tanauma, A., 2011. Pemodelan Sumber Gempa Di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempa Bumi.
 Rahayu, H. P. dan Keumala, S. R., 2015. Holistic Evacuation Planning for the Improvement of Spatial Plan – A Case Study of Meuraksa Sub-District. *Symposium Nasional Mitigasi Bencana Tsunami TDMRC Universitas Syiah Kuala didukung oleh USAID (PEER Cycle 3) No.ISSN: 2477-6440.*
 Pribadi, S., Afnimar, Puspito, N. T., Ibrahim, G., 2013. Characteristics of Earthquake-Generated Tsunamis in Indonesia Based on Source Parameter Analysis. *Institut Teknologi Bandung.*
 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. *Institut Teknologi Bandung.*
 Hara, T., 2007. Measurement of The Duration of Highfrequency Energy Radiation and Its Application To Determination of The Magnitudos of Large Shallow Earthquakes. *Earth Planet Space*, 59, 2007, pp. 227-231.
 Tsuboi, S., Abe, K., Takano, K, dan Yamanaka, Y., 1995. Rapid Determination of Mw from Broadband P Waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, pp. 606-613.
 Tsuboi, S., 2000. Application of Mwp to Tsunami Earthquake. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 27, NO. 19, PAGES 3105-3108, OCTOBER 1, 2000.
 Weinstein, S.A. dan Okal, E.A., 2005. The Mantle Wave Magnitude Mm and The Slowness Parameter THETA: Five Years of Real-Time Use in The Context of Tsunami Warning. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, 779-799.