

STUDI KARAKTERISTIK GEMPABUMI SIGNIFIKAN MW > 6.0 AKIBAT AKTIVITAS SISTEM BUSUR BELAKANG SEGMENT BALI LOMBOK MENGGUNAKAN ANALISIS ENERGI KUMULATIF DAN PERIODE ULANG

*STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF SIGNIFICANT EARTHQUAKES MW > 6.0 DUE
TO FLORES BACK ARC THRUST FAULT SYSTEM FOR BALI-LOMBOK SEGMENT
USING THE ANALYSIS OF CUMULATIVE ENERGY AND RETURN PERIOD OF
EARTHQUAKES*

Tomy Gunawan*, Aldilla Damayanti Purnama Ratri, Mohamad Taufik Gunawan

Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III Denpasar, Bali, 80361

*E-mail: tomy.gunawan@bmkgo.go.id

Naskah masuk: 5 Juli 2019

Naskah diperbaiki: 26 Oktober 2019

Naskah diterima: 19 Juni 2020

ABSTRAK

Analisis energi dan periode ulang gempabumi akibat aktivitas sistem busur belakang Flores dilakukan untuk mengetahui besarnya energi yang telah dilepaskan serta menghitung periode ulang gempabumi yang akan terjadi disertai kemungkinan energi yang akan dilepaskan oleh gempabumi di masa yang akan datang. Data yang digunakan adalah katalog gempabumi *International Seismological Centre (ISC)*, *Engdahl-van der Hilst-Buland (EHB)* dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) tahun 1963-2018. Daerah penelitian dibatasi pada daerah dengan rentang 7,5 LS – 8,5 LS dan 115 BT – 117 BT. Perhitungan energi gempabumi didapatkan dengan mengkonversikan nilai momen seismik kedalam energi fisis gempabumi. Sedangkan nilai momen seismik didapatkan dari konversi magnitudo gempabumi. Nilai periode ulang didapatkan dengan membagi nilai slip rata-rata terhadap *sliprate*. Dengan asumsi bahwa energi seismik potensial yang tersimpan pada sistem busur belakang Flores segmen Bali-Lombok setara dengan gempabumi Mw 7,4 dan energi seismik yang telah terlepas selama periode 1963-2018 setara dengan gempabumi Mw 7,3, maka selisih atau sisa energi seismik yang masih tersimpan setara dengan Mw 7,0. Sedangkan hasil perhitungan periode ulang gempabumi signifikan Mw 6,7 – Mw 7,1 berkisar antara 117 tahun hingga 201 tahun.

Kata kunci: energi seismik, energi kumulatif, gempabumi, periode ulang

ABSTRACT

The analysis of seismic energy and return period of the earthquakes due to the Flores back arc thrust fault system were conducted to determine the amount of the seismic energy that has been released and to estimate the return period and potential energy of the significant earthquakes which may occur in the future. The data used in this study were retrieved from the earthquake catalogues of the International Seismological Centre (ISC), Engdahl-van der Hilst-Buland (EHB) dan The Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics of the Republic of Indonesia (BMKG) between 1963 to 2018. The research area is restricted to the range of 7.5 LS - 8.5 LS and 115 BT - 117 BT. The earthquake energy was obtained by converting the values of seismic moment into the physical energy of the earthquake. Whereas, the seismic moment value was obtained using the empirical formulas which show the relation between seismic moment and magnitude of the earthquake. The return period of the earthquakes has been done by dividing the average slip of the specific earthquake against the slip rate of the fault system. By taking the assumption that the potential seismic energy which stored in the Flores back arc thrust fault system, segment Bali-Lombok, is equal to the earthquake Mw 7.4, while the seismic energy which has been released is equal to the earthquake Mw 7.3. We estimate the remaining seismic potential energy is equal to the earthquake Mw 7.0. Whereas the return period of the significant earthquakes Mw 6.7 – Mw 7.1 is about 117 to 201 years.

Keywords: seismic energy, cumulative energy, earthquake, return period of the earthquake

1. Pendahuluan

Wilayah Bali hingga Lombok merupakan salah satu daerah di Indonesia yang memiliki tingkat seismisitas tinggi. Hal ini dikarenakan adanya beberapa generator gempabumi di segmen Bali - Lombok, yaitu di bagian utara adanya aktivitas *Flores Back Arc Thrust Fault* sedangkan di bagian selatan adanya aktivitas subduksi antara Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia [1]. Gempabumi merupakan suatu fenomena alam berupa getaran dari pergerakan lempeng yang menyebabkan terjadinya pelepasan energi secara tiba-tiba dari batuan di kerak bumi [2]. Salah satu parameter gempabumi yang penting adalah magnitudo, dimana kita bisa mengetahui seberapa besar energi yang dilepaskan ketika terjadi gempabumi dengan melakukan konversi magnitudo terhadap energi.

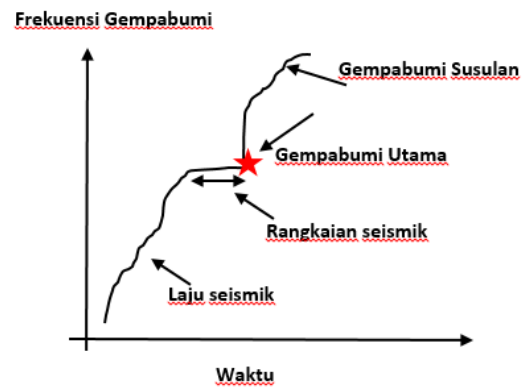
Penelitian ini mengambil serangkaian gempabumi yang terjadi di sekitar segmen Bali hingga Lombok selama periode 1963-2018. Dalam kurun waktu 56 tahun terakhir telah terjadi 8 gempabumi signifikan dengan $M_w > 6$. Hasil penelitian PUSGEN tahun 2017[3] menunjukkan bahwa untuk segmen Bali-Lombok memiliki karakteristik sesar naik dengan garis patahan (*fault line*) yang membentang timur-barat sepanjang 84 km (lihat tabel 1). Berdasarkan data focal mechanism gempabumi di Bali-Lombok dengan $M_w > 6$ (lihat gambar 4), terlihat bahwa sebagian besar memiliki tipe sesar naik dengan slip vektor ke arah utara dan dengan nilai rata-rata sebesar 22 derajat serta memiliki bidang sesar yang sejajar dengan *Flores Back Arc Thrust Fault* yaitu berarah timur-barat. Dalam penelitian ini, dilakukan analisa aktivitas seismic selama kurang lebih 56 tahun dengan menggunakan data gempabumi dari katalog *International Seismological Centre (ISC)*, *Engdahl-van der Hilst-Buland (EHB)* dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) di segmen Bali-Lombok untuk mengetahui besarnya energi yang telah dilepaskan serta menghitung periode ulang gempabumi yang akan terjadi disertai kemungkinan energi yang akan dilepaskan oleh gempabumi tersebut.

Pada Gambar 1 kondisi normal, energi yang tersimpan akan menyebabkan gempabumi kecil di area tersebut (*background rate*). Ketika akan terjadi gempabumi kuat, rangkaian gempabumi kecil (*seismic quiescence*) perlahan akan menurun selama

periode waktu tertentu. Oleh karena itu *seismic quiescence* tersebut bisa digunakan sebagai indikator gempabumi yang akan terjadi (*main shock*) [4].

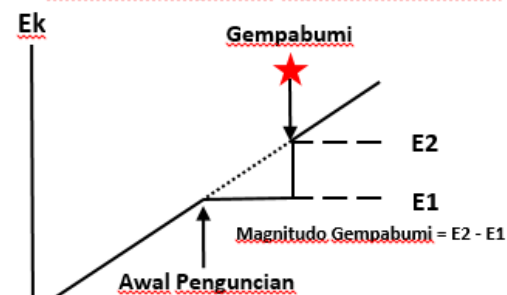
Meskipun litosfer dalam kondisi normal, ketika ada gerakan mekanis baik itu berupa gesekan, getaran dan sebagainya pada waktu tertentu akan terkunci sehingga menyebabkan aktivitas seismic berkurang dan terjadi penyimpanan energi di daerah seismogenik. Energi yang tersimpan ini pada waktu tertentu akan dilepaskan dalam bentuk gempabumi dengan kekuatan yang bervariasi [16].

Pada gambar 2, terlihat ada dua panah hitam yang menunjukkan awal dan akhir periode penguncian. Pada akhir periode penguncian, gempabumi yang akan terjadi besarnya dihitung dari E_1 dan E_2 . Setelah gempabumi terjadi, maka wilayah seismogenik akan melanjutkan kembali pelepasan energinya namun dengan skala yang lebih kecil [4].



Gambar 1. Contoh rangkaian aktivitas precursor seismic [Modifikasi dari 4]

Teori Energi Kumulatif pada daerah seismogenik dan penentuan magnitudo kejadian Gempabumi



Gambar 2. Model Energi kumulatif secara teoritis [Modifikasi dari 4].

Tabel 1. Karakteristik sumber gempabumi utara Bali hingga Lombok [3]

Nama Struktur		Slip Rate (mm/year)	Mekanisme Fokal	Kemiringan	Atas	Bawah	Lebar (km)	Mmax
Utama	Segmen							
<i>Flores Back Arc Thrust</i>	Bali	7.0	<i>Reverse slip</i>	45	3	18	84	7.4

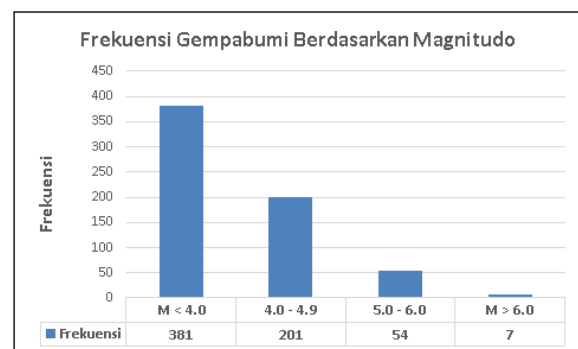
2. Metode Penelitian

Data. Dalam penelitian ini, data yang digunakan merupakan data kompilasi dari beberapa katalog gempa bumi diantaranya katalog ISC, EHB dan BMKG [5-7]. Sedangkan daerah penelitian dibatasi pada daerah dengan rentang 7,5 LS – 8,5 LS dan 115 BT – 117 BT. Dengan memilah gempa bumi - gempa bumi dangkal ($h < 60$ km) pada area penelitian tersebut, didapatkan bahwa pada rentang tahun 1963 hingga 2018 setidaknya terdapat 643 kejadian gempa bumi yang diduga akibat aktivitas *Flores Back Arc Thrust* segmen utara Bali hingga Lombok. Gambar 3 menunjukkan bahwa kejadian gempa bumi sebagian besar didominasi oleh gempa bumi - gempa bumi dengan magnitudo kurang dari 4,0. Sedangkan Gambar 4 menunjukkan sebaran episenter gempa bumi akibat aktivitas *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok. Dalam kurun waktu 56 (1963 – 2018) tahun tercatat bahwa sistem *Flores Back Arc Thrust* utara Bali hingga Lombok memicu tujuh gempa bumi signifikan dan merusak ($M_w > 6.0$). Dilihat dari waktu terjadinya, gempa bumi - gempa bumi dengan pelepasan energi yang besar tersebut dapat dikelompokkan dalam dua periode yaitu rangkaian gempa bumi Karangasem tahun 1979 dan rangkaian gempa bumi Lombok tahun 2018. Hal ini ditinjau dari lokasi, waktu dan kekuatan rangkaian gempa bumi tahun 1979 dan 2018 yang tidak terpaut terlalu jauh satu sama lain sehingga dapat dikategorikan sebagai pasangan gempa bumi atau *doublets earthquake* [8] (lihat gambar 4).

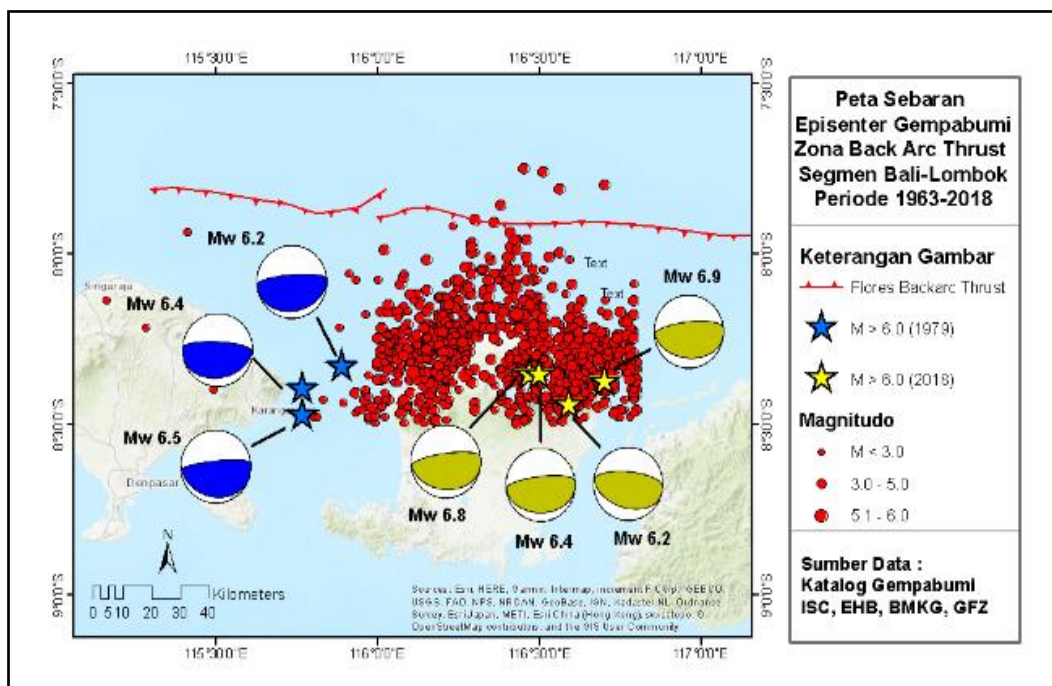
Momen Seismik Skalar. Besar kecilnya sebuah gempa bumi dapat dinyatakan dalam sebuah kuantitas fisika yang dikenal dengan momen seismik. Hanks dan Kanamori [9] mendefinisikan momen seismik skalar (M_0) sebagai,

$$M_0 = \mu \bar{D} A \quad (1)$$

dimana momen seismik (M_0) dinyatakan dalam Nm, rigiditas (μ) dalam Nm^{-2} , slip rata-rata (\bar{D}) dalam meter dan *rupture area* (A) dalam m^2 . Berbeda halnya dengan slip rata – rata dan *rupture area* yang dapat ditentukan melalui pengukuran baik langsung maupun tidak langsung, rigiditas atau modulus geser batuan merupakan nilai asumsi dimana setiap penelitian dapat berbeda nilainya sesuai dengan pertimbangan fisis masing-masing penelitian.



Gambar 3. Diagram sebaran data gempa bumi sistem busur belakang Flores segmen utara Bali hingga Lombok berdasarkan magnitudo.



Gambar 4. Peta sebaran epicenter gempa bumi akibat aktivitas Flores back arc thrust segmen Bali-Lombok periode tahun 1963 - 2018.

Tabel 2. Parameter untuk Model Bumi Standar 31-Lapis Volume – Terata-rata untuk lapisan litosfer yang diturunkan dari PREM*[11]

Lapisan	r (km)	P (kg m ⁻³)	μ (N m ⁻²)
1	6371.0 - 6368.0	1020	2.66 x 10 ¹⁰
2	6368.0 - 6356.0	2600	2.66 x 10 ¹⁰
3	6356.0 - 6346.6	2900	4.41 x 10 ¹⁰
4	6346.6 - 6331.0	3372	6.81 x 10 ¹⁰
5	6331.0 - 6331.0	3372	6.78 x 10 ¹⁰
6	6331.0 - 6291.0	3372	6.75 x 10 ¹⁰
7	6291.0 - 6251.0	3372	6.71 x 10 ¹⁰

*r jarak terhadap pusat bumi, ρ adalah densitas lapisan, μ adalah rigiditas.

Nilai rigiditas lapisan bumi, salah satunya, dapat diperoleh dari model 31-lapis bumi yang diturunkan dari PREM atau Preliminary Reference Earth Model [10]. Tabel 2 menunjukkan nilai densitas dan rigiditas lapisan litosfer [11]

Hubungan Momen Seismik dengan Panjang, Lebar dan Luas Rupture. Meskipun momen seismik (M_0) memberikan gambaran yang lebih baik tentang sumber gempa bumi secara fisis, tetapi tidak dapat membedakan antara gempa bumi dengan slip rata-rata yang besar yang terjadi pada luasan *rupture* yang sempit atau sebaliknya gempa bumi dengan slip rata-rata yang kecil pada *rupture area* yang luas. Wells dan Coppersmith [12] mempelajari hubungan magnitudo terhadap panjang, lebar dan luas *rupture* secara statistik dan membaginya berdasarkan mekanisme sumbernya yaitu *strike slip*, *reverse* dan *normal*.

$$M = 4.49 + 1.49 \times \log RLD \quad (2)$$

$$M = 4.37 + 1.95 \times \log RW \quad (3)$$

$$M = 4.33 + 0.90 \times \log RA \quad (4)$$

Persamaan (2), (3) dan (4) menunjukkan hubungan antara magnitudo dengan panjang, lebar dan luas *rupture* untuk gempa bumi - gempa bumi dengan mekanisme sumber jenis *reverse*. M merepresentasikan magnitudo gempa bumi, RLD merupakan representasi dari panjang *subsurface rupture* dalam km, RW merupakan lebar *downdip rupture* dalam km dan RA adalah *rupture area* dalam km².

Hubungan Momen Seismik dengan Magnitudo dan Energi. Gutenberg dan Richter [13] pertama kali memperkenalkan perhitungan energi seismik berdasarkan nilai Magnitudo gelombang permukaan (M_s), seperti persamaan berikut,

$$\log E_s = 4,8 + 1,5 M_s \quad (5)$$

Dimana E_s adalah energi seismik dalam Joule (Nm).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Chen dan Chen [14] menunjukkan kecocokan yang lebih baik antara data empiris dan teoritis menggunakan beberapa persamaan yang menunjukkan hubungan antara momen seismik dengan beberapa jenis magnitudo (M_s , m_b , M_l). Hubungan antara momen seismik dengan magnitudo gelombang body ditunjukkan oleh persamaan berikut,

$$\log M_0 = 1,5 m_b + 9,0 \text{ untuk } 3,8 < m_b \leq 5,2 \quad (6)$$

$$\log M_0 = 3 m_b + 1,2 \text{ untuk } 5,2 < m_b \leq 6,5 \quad (7)$$

dan untuk magnitudo lokal dengan saturasi pada skala M_l 6.3 ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut,

$$\log M_0 = 1,5 M_l + 8,7 \text{ untuk } 3,6 < M_l \leq 5,0 \quad (8)$$

$$\log M_0 = 3 M_l + 1,2 \text{ untuk } 5,0 < M_l \leq 6,3 \quad (9)$$

Dari ketiga jenis magnitudo tersebut, semuanya mengalami saturasi pada skala tertentu. Untuk gempa bumi - gempa bumi besar digunakan magnitudo momen (M_w) yang tidak mengalami saturasi pada skala tertentu. Magnitudo momen didefinisikan sebagai,

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 6,0 \quad (10)$$

berdasarkan Choy dan Boatwright [15], energi seismik dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$E_s = M_0 \cdot 1.6 \times 10^{-5} \quad (11)$$

dimana E_s adalah energi seismik dalam Joule.

Periode Ulang Gempabumi. Dalam penelitian ini periode ulang gempa bumi didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai dislokasi sebesar slip rata-rata gempa bumi dengan kekuatan tertentu, dibagi dengan nilai *slip rate* pada sesar segmen lokasi gempa bumi yang bersangkutan. Secara sederhana hubungan tersebut dapat digambarkan dengan Persamaan 12, dimana T adalah periode ulang dalam tahun, \bar{D} adalah slip rata-rata dalam meter, dan S adalah laju pergeseran sesar dalam meter pertahun.

$$T = \bar{D}/S \quad (12)$$

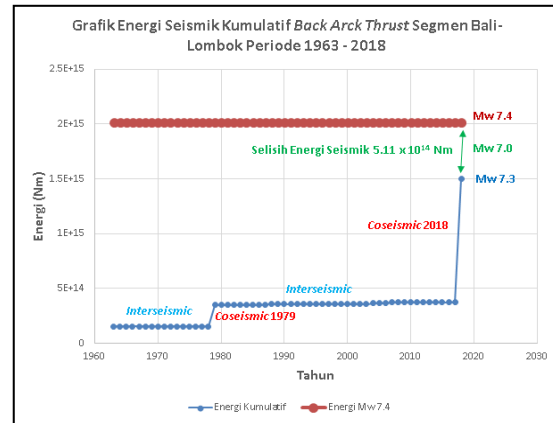
3. Hasil dan Pembahasan

Energi Seismik Kumulatif. Selama periode 1963 – 2018 (lihat Gambar 5) tercatat dua fase *coseismic* dimana merupakan fase terjadinya pelepasan energi seismik yang cukup besar di zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok. Pelepasan energi yang cukup besar tersebut terjadi pada rangkaian gempa bumi Karangasem tahun 1979 dimana total energi yang dilepaskan yaitu sebesar 1.94×10^{14} Joule atau setara Mw 6.7 (lihat Gambar 6.a). Fase *coseismic* terbaru yaitu rangkaian gempa bumi Lombok tahun 2018 dimana energi seismik total yang dilepas yaitu tidak kurang dari 9.18×10^{14} Joule atau hampir setara dengan gempa bumi berkekuatan Mw 7.2 (lihat Gambar 6.b).

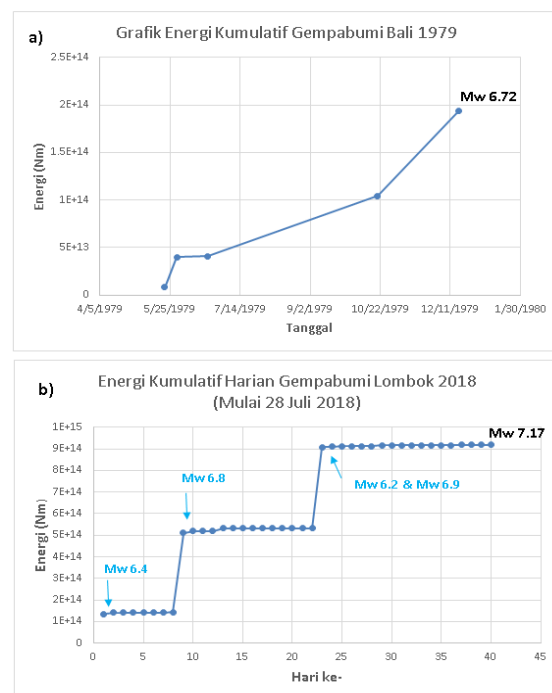
Selama kurun waktu 1963 -2018 total energi seismik yang telah dilepas tidak kurang dari 1.50×10^{15} Joule atau setara Mw 7.3. Berdasarkan penelitian PUSGEN [3], zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok memiliki potensi gempa bumi dengan magnitudo maksimum sebesar Mw7.4 atau setara dengan 2.01×10^{15} Joule. Jika diasumsikan bahwa energi tersebut merupakan energi potensial yang tersimpan dalam sistem *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok dan dikurangi dengan energi seismik yang telah terlepas dalam kurun waktu 1963-2018, maka selisih atau sisa energi yang diperkirakan masih tersimpan yaitu sebesar 5.11×10^{14} Joule atau setara gempa bumi dengan kekuatan Mw 7.0. Sehingga diperkirakan masih menyimpan potensi gempa bumi yang cukup besar dalam satu periode siklus seismik untuk segmen tersebut.

Pada 17 Maret 2019, kembali terjadi gempa signifikan yang dilaporkan menimbulkan kerusakan. Gempa bumi dengan magnitudo Mw 5.4 dan Mw 5.1 yang terjadi hanya dalam selang menit tersebut dilaporkan menyebabkan kerusakan bangunan di wilayah Lombok Timur dan dirasakan hingga Bali. Namun menariknya tidak seperti karakteristik gempa bumi *Flores Back Arc Thrust*, berdasarkan katalog dari *The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project*, kedua gempa bumi tersebut memiliki mekanisme sumber jenis sesar normal (lihat Gambar 7) [17,18].

Hal ini mengindikasikan bahwa gempa bumi disebabkan oleh sesar lokal. Namun aktifnya sesar lokal tersebut dimungkinkan dipicu oleh aktifitas pelepasan energi gempa bumi besar oleh sistem *Flores Back Arc Thrust* beberapa bulan sebelumnya.



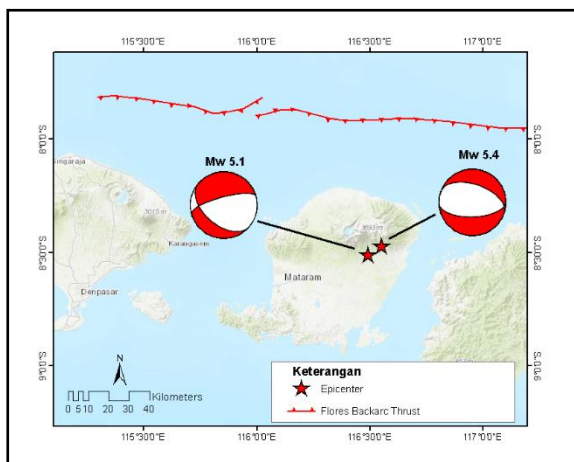
Gambar 5. (biru) Energi kumulatif gempa bumi zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok periode 1963 – 2018. (merah) Energi ekspektasi zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok berdasarkan PUSGEN 2017. (hijau) Selisih energi ekspektasi dan energi gempa bumi yang telah dilepas periode 1963 – 2018.



Gambar 6. (a) Energi kumulatif gempa bumi Karangasem tahun 1979. (b) Energi kumulatif gempa bumi Lombok periode 28 Juli – 5 September 2018.

Tabel 3. Periode ulang gempa bumi signifikan $M \geq 6.5$ zona Flores Back Arc Thrust segmen Bali-Lombok.

Magnitudo	PUSGEN 2017[3]			Wells & Coppersmith [12]		
	Rupture Area (km ²)	Slip rata-rata (m)	Periode ulang (tahun)	Rupture Area (km ²)	Slip rata-rata (m)	Periode ulang (tahun)
7.4	3363.53	1.41	201	2576.98	1.84	262
7.1	-	-	-	1196.13	1.40	201
7.0	-	-	-	926.12	1.28	183
6.9	-	-	-	717.06	1.17	168
6.8	-	-	-	555.19	1.07	153
6.7	-	-	-	429.87	0.98	140



Gambar 7. Distribusi episenter gempa bumi signifikan Lombok 17 Maret 2019 dan mekanisme sumber gempabuminya [17,18].

Periode Ulang Gempabumi. Sepanjang sejarah kegempaan di era modern, belum pernah tercatat gempa bumi dengan kekuatan Mw 7.4 terjadi pada zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok. Berdasarkan penelitian PUSGEN [3], sistem *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok memiliki *slip rate* sebesar 7 mm pertahun (lihat Tabel 1). Jika *slip rate* rata-rata dihitung menggunakan Persamaan 1 dan satu periode siklus gempa bumi dihitung dengan menggunakan Persamaan 12 maka untuk gempa bumi Mw 7.4 diperlukan waktu 200 hingga 250 tahun bergantung data luasan fault area yang digunakan dalam perhitungan (Lihat Tabel 3). Rentang waktu tersebut dapat diasumsikan sebagai satu periode siklus gempa bumi pada segmen Bali-Lombok akibat aktivitas *Flores Back Arc Thrust*.

Perhitungan periode ulang gempa bumi Mw 7.4 dengan menggunakan data luas *rupture area* yang diturunkan dari data karakteristik sumber gempa utara Bali-Lombok oleh PUSGEN [3] dan histori *dip fault* gempa bumi-gempa bumi besar ($M_w > 6.0$) sebelumnya, memberikan nilai yang lebih kecil (lihat Tabel 3) dibanding perhitungan menggunakan

nilai *rupture area* yang diturunkan dari persamaan Wells dan Coppersmith [12] (lihat Persamaan 4). Hal ini dikarenakan perhitungan menggunakan persamaan Wells dan Coppersmith [12] memberikan nilai luas *rupture* yang lebih besar dibanding data dari PUSGEN [3]. Rentang data yang jauh lebih pendek dibanding periode ulang gempabuminya menyebabkan sulit untuk memperkirakan awal dan akhir periode siklus gempa bumi zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok tersebut.

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa dalam kurun waktu 1963 – 2018 terdapat dua fase *coseismic*. Dari dua fase *coseismic* tersebut terlihat pola pelepasan energi yang bertahap pada periode waktu bulan hingga minggu. Jika diasumsikan pelepasan energi seismik pada segmen Bali-Lombok tersebut terlokalisasi pada subsegmen yang lebih kecil (Karangasem dan Lombok), maka pelepasan energi kumulatif tiap subsegmennya berkisar antara Mw 6.7 hingga Mw 7.1 (lihat Gambar 6). Sedangkan untuk periode ulang gempa bumi dengan Mw 6.7 hingga Mw 7.1 tersebut berkisar antara 117 – 201 tahun. Hal ini dapat menjelaskan kenapa pola periodik rangkaian gempa bumi besar pada subsegmen-subsegmen tersebut tidak terlihat hanya dengan data dalam rentang waktu 56 tahun.

4. Kesimpulan

Jika diasumsikan bahwa energi seismik potensial yang tersimpan pada zona *Flores Back Arc Thrust* segmen Bali-Lombok setara dengan magnitudo Mw 7.4 dan energi seismik yang telah terlepas selama periode 1963-2018 setara dengan Mw 7.3, maka selisih atau sisa energi seismik yang masih tersimpan setara dengan Mw 7.0. Perhitungan periode siklus gempa bumi Mw 7.4 menggunakan data PUSGEN 2017 dan persamaan Wells dan Coppersmith (1994) memberikan hasil yang cukup signifikan berbeda yaitu 201 tahun dan 262 tahun. Berdasarkan data dalam rentang tahun 1963-2018 tercatat dua kali fase *coseismic* dengan pelepasan energi total seismik berkisar Mw 6.7 dan Mw 7.1. Sedangkan hasil perhitungan periode ulangunya

berkisar antara 117 tahun hingga 201 tahun. Fase *coseismic* tidak menunjukkan pola tertentu dikarenakan dataset yang digunakan masih jauh lebih pendek dibanding perkiraan periode ulangnya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan teman-teman di Pusat Gempa Regional III – Bali atas diskusinya yang menarik.

Daftar Pustaka

- [1] Daryono, “Identifikasi Sesar Naik Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar”. *Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 2011.
- [2] M. Choudhury, P.Saha, S. Verma, “Effects of Earthquake on The Surrounding Environment : An Overview”, *Proceedings of International Conference on Recent Advances in Mechanics and Materials*, ICRAMM, 2016.
- [3] Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017*. ISBN: 978-602-5489-01-3, 2017.
- [4] Thanassoulas C, “Short – term Earthquake Prediction”, Printed in Greece by H. Dounias & Co., ISBN: 978-960-930268-5, 2007.
- [5] International Seismological Centre. *On-line Bulletin*. <http://www.isc.ac.uk>. Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2016.
- [6] International Seismological Centre. *EHB Bulletin*. <http://www.isc.ac.uk>. Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2016.
- [7] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.. *Earthquake Repository*. <http://repogempa.bmkg.go.id/query.php> , Jakarta, 2019.
- [8] Y. Y. Kagan, D. D. Jackson; “Worldwide doublets of large shallow earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*; 89 (5): 1147–1155, 1999
- [9] Hanks, T.C, dan H. Kanamori. “A moment magnitude scale”. *Journal of Geophysical Research*, 84,5, 2348-2350, 9B0059. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348> . 1979.
- [10] Dziewonski, Adam M., dan Anderson, Don L., “Preliminary reference Earth model”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 4, 297-356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7), 1981.
- [11] Tosi, N., R. Sabadini, A. M. Marotta, dan L. L. A. Vermeersen, “Simultaneous inversion for the Earth's mantle viscosity and ice mass imbalance in Antarctica and Greenland”, *J. Geophys. Res.*, 110,B07402,<https://doi.org/10.1029/2004JB003236>, 2005.
- [12] Wells, D.L. dan Coppersmith K.J., “New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture width, Rupture Area, and Surface Displacement”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002, 1994.
- [13] Gutenberg, B. and Richter, C.F., “Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, 105-146, 1956.
- [14] Chen, P., and Chen, H., “Scaling law and its applications to earthquake statistical relations”, *Tectonophysics*, 166, 53-72, 1989.
- [15] Choy, G. L., and Boatwright, J. L., “Global patterns of readiated seismic energy and apparent stress”, *J. Geophys. Res.*, 100, B9, 18,205-18,228, 1995.
- [16] Irfan,M, dkk. 2009. *Prediksi Bencana Alam Gempabumi Jangka Pendek Menggunakan Fenomena Anomali Medan Listrik Permukaan*. Bukit Kotatabang: Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kotatabang
- [17] Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse, “Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity”, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825
- [18] Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, The global CMT project 2004-2010: “Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes”, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002