Mengukur Peluang Kejadian Gempa Bumi dengan Lompatan Magnitudo di Wilayah Pulau Sumatera

Measuring Probability for Earthquake Events with a Magnitude Leap in the Region of Sumatra Island

Samsul Anwar

Jurusan Statistika, F.MIPA Universitas Syiah Kuala
Jln. Syech Abdurrauf, Kopelma Darussalam, Banda Aceh 23111, Indonesia
Naskah diterima 24 Januari 2019, selesai direvisi 18 November 2019, dan disetujui 25 November 2019
e-mail: samsul.anwar@unsyiah.ac.id

ABSTRAK

Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah rawan gempa bumi di Indonesia. Gempa bumi dengan magnitudo (M) besar dapat terjadi tanpa didahului oleh gempa bumi dengan magnitudo yang lebih kecil, kejadian tersebut diistilahkan sebagai gempa bumi dengan lompatan magnitudo. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur peluang terjadinya gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera dengan lompatan magnitudo pada interval tertentu. Metode analisis yang digunakan didasari pada konsep probabilitas kejadian saling bebas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peluang terjadinya gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera dengan lompatan magnitudo pada interval tertentu cenderung menjadi semakin kecil seiring bertambah besarnya lompatan magnitudo yang dianalisis terutama pada interval 5,6 – 6,7. Sedangkan untuk gempa bumi dengan $M \geq 7,6$; analisis probabilitas menunjukkan adanya peningkatan peluang terjadinya gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera dengan lompatan magnitudo pada interval tersebut meskipun dengan peluang yang cukup kecil.

Kata kunci: Gempa bumi, kejadian saling bebas, magnitudo, peluang, Pulau Sumatera.

ABSTRACT

Sumatra Island is one of the areas prone to earthquakes in Indonesia. An earthquake with a large magnitude (M) can occur without being preceded by an earthquake with a smaller magnitude. In this study the incident was termed as an earthquake with magnitude leap. The aims of this study is to measure the probability of the earthquakes in the region of Sumatra Island with magnitude leap at a specific interval. The method used in this study is based on a probability concept of an independent events. The result shows that the probability of occurring an earthquake in the region of Sumatra Island with leaped magnitude at a specific interval tends to decrease along with the growth of the magnitude evaluated specially in the interval in between 5.6 and 6.7. Whereas for earthquakes with $M \geq 7.6$; probability analyses shows an increase in the probability of an earthquake event in the region of Sumatra island with a magnitude leap at the interval although the probabilities are quite small.

Keywords: Earthquake, independent event, magnitude, probability, Sumatra island.

PENDAHULUAN

Secara geografis, Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah rawan gempa bumi di Indonesia. Hal ini dikarenakan berada pada pertemuan dua lempeng aktif dunia, yaitu lempeng Indo – Australia dan Eurasia. Natawidjaja (2007) menyebutkan bahwa lempeng Indo – Australia bergerak ke arah Utara menumbuk lempeng Eurasia dengan kecepatan 50 – 70 mm/ tahun. Zona tumbukan dua lempeng ini membentuk palung laut di sepanjang perairan barat Pulau Sumatra dan selatan Pulau Jawa, Bali, dan Lombok.

Galih dan Handayani (2007) melaporkan bahwa urutan wilayah dengan tingkat kerentanan terjadinya gempa bumi dari yang paling tinggi di Indonesia adalah wilayah Pulau Maluku – Banda, Sulawesi, Sumatera, Papua, NTT, Jawa dan terakhir adalah Kalimantan yang merupakan wilayah yang paling rendah terjadi gempa bumi di Indonesia. Meskipun bukan merupakan wilayah yang paling rentan terjadinya gempa bumi, wilayah Pulau Sumatera juga menyimpan potensi untuk terjadinya gempa bumi dengan magnitudo (M) yang besar. Menurut Rifai dan Pudja (2010), sumber gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera dibagi menjadi dua, yaitu pada zona subduksi di sepanjang laut dan pada zona - zona sepanjang patahan sistem sesar Sumatera di daratan. Zona subduksi dan sesar aktif tersebut merupakan sumber gempa bumi yang aktif (Santoso dr., 2011). Ada beberapa gempa bumi besar yang terjadi di wilayah ini pada kurun waktu tahun 2000 - 2017, diantaranya gempa bumi di wilayah Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 (M = 9,1 - 9,3), 28 Maret 2005 (M = 8,6), 5 September 2010 (M = 7,2), 11 April 2012 (M = 8,6) dan 7 Desember 2016 (M = 6,5). Selanjutnya gempa bumi di wilayah Sumatera Utara pada tanggal 28 Maret 2005 (M = 8,7) dan 7 April 2010 (M = 7,2). Kemudian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat

pada tanggal 10 April 2005 (M = 6,7), 25 Februari 2008 (M = 6,5), 16 Agustus 2009 (M = 6,7), 30 September 2009 (M = 7,5), 7 April 2010 (M = 7,2), 25 Oktober 2010 (M = 7,7) dan 2 Maret 2016 (M = 7,8), serta gempa bumi di wilayah Bengkulu pada tanggal 12 September 2007 (M = 7,9) (Sadly dr., 2018). Hasil penelitian Santoso dr. (2011) menyimpulkan bahwa terdapat beberapa kota besar di Pulau Sumatera yang mempunyai bahaya gempa bumi yang tinggi antara lain: Banda Aceh, Padang, Bengkulu dan Bandar Lampung.

Hasil penelitian Zakaria dr. (2011) menyimpulkan bahwa sebagian besar gempa bumi yang merusak berukuran lebih dari 5,6 pada skala richter, sebagai gempa bumi dangkal dengan kedalaman kurang dari 30 Km. Hal ini sejalan dengan klasifikasi gempa bumi berdasarkan magnitudonya. Gempa bumi dengan magnitudo yang lebih besar dari 5,5 akan mengakibatkan kerusakan pada bangunan dan struktur lainnya (Pennington, 2006). Selain dipengaruhi oleh magnitudo dan jarak ke pusat gempa bumi, kerusakan bangunan dan infrastruktur lainnya juga dipengaruhi oleh kondisi geologi permukaan wilayah tersebut (Marjiyono, 2016). Klasifikasi skala magnitudo gempa bumi berdasarkan efek yang ditimbulkannya ditampilkan pada Tabel 1.

Gempa bumi dengan kekuatan yang besar dapat terjadi secara tiba-tiba tanpa didahului oleh terjadinya gempa bumi dengan kekuatan yang lebih kecil. Meskipun biasanya terdapat suatu pola atau siklus kegempaan sebelum terjadinya gempa bumi utama yang meliputi periode normal, periode anomali, periode *precursory gap* dan periode terjadinya gempa bumi utama (Singh dr., 2010). Gempa bumi Aceh tahun 2004 merupakan salah satu contoh gempa bumi berkekuatan besar yang terjadi tanpa didahului oleh gempa bumi dengan kekuatan yang lebih kecil. Gempa bumi tersebut

Tabel 1. Klasifikasi skala magnitudo gempa bumi (Pennington (2006)).

Magnitudo	Efek Gempa Bumi
$\leq 2,5$	Gempa bumi tidak terasa, tetapi dapat direkam oleh seismograf.
2,5 - 5,4	Gempa bumi dapat dirasakan, tetapi hanya menimbulkan kerusakan yang kecil.
5,5 - 6,0	Gempa bumi mengakibatkan sedikit kerusakan pada bangunan dan struktur lainnya.
6,1 - 6,9	Gempa bumi mengakibatkan banyak kerusakan di area yang padat penduduk.
7,0 - 7,9	Gempa bumi besar, mengakibatkan kerusakan yang serius.
$\geq 8,0$	Gempa bumi dahsyat, dapat merusak kawasan di dekat pusat gempa (episentrum) secara total.

terjadi pada tanggal 26 Desember pada pukul 7:58 WIB di lepas pantai barat bagian utara Pulau Sumatera dengan magnitudo 9,3 (Tobita drr., 2006). Sedangkan contoh gempa bumi berkekuatan besar yang didahului oleh gempa bumi yang lebih kecil adalah gempa bumi California bagian selatan pada tahun 2019. Gempa bumi pendahuluan terjadi pada tanggal 4 Juli dengan magnitudo 6,4 dan kurang dari 48 jam setelahnya terjadi gempa bumi utama yang lebih besar dengan magnitudo 7,1 (Wei-Haas, 2019; Woodyard, 2019).

Gempa bumi berkekuatan besar tersebut berbeda dengan gempa bumi susulan yang umumnya bermagnitudo lebih kecil. Budiman (2009) menyebutkan bahwa gempa bumi susulan yang gempa bumi utamanya berpusat di lautan cenderung berakhir relatif lebih lama dari pada gempa bumi susulan yang gempa utamanya berpusat di daratan. Hal ini disebabkan karena massa segmen yang mengalami tumbukan yang berada di lautan relatif lebih besar jika dibandingkan dengan massa segmen yang berada di daratan, sehingga diperlukan waktu yang relatif lebih lama untuk mencapai titik keseimbangannya (Budiman, 2009). Dengan demikian, gempa bumi pendahuluan dengan magnitudo yang cukup besar jauh lebih sulit diprediksi dari pada gempa bumi susulan yang umumnya bermagnitudo lebih kecil.

Kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang besar tanpa didahului oleh terjadinya gempa bumi dengan magnitudo yang lebih kecil diistilahkan dengan gempa bumi dengan lompatan magnitudo. Perhitungan peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo tertentu dapat menjadi sebuah peringatan dini (*early warning*) bagi semua pihak terkait agar dapat mempersiapkan langkah strategis berkaitan dengan mitigasi bencana gempa bumi pada masa yang akan datang. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo di atas 5,5.

METODE PENELITIAN

Data gempa bumi diambil dari katalog BMKG (2018) tahun 2009 – 2017, dengan posisi lintang antara -9,66 dan 5,57 serta posisi bujur antara 94,08 dan 105,54 yang merupakan wilayah Sumatera bagian utara, lepas pantai barat wilayah Sumatera bagian utara, Sumatera bagian selatan dan Sumatera bagian barat daya, Indonesia. Data yang digunakan

adalah frekuensi terjadinya gempa bumi dengan magnitudo tertentu. Frekuensi kejadian gempa bumi yang dianalisis dalam penelitian ini adalah untuk $M \geq 5,5$ dengan selisih interval 0,1 sebagai kejadian utama, dan gempa bumi dengan kekuatan $5,0 \leq M < \text{batas bawah magnitudo kejadian utama}$ sebagai kejadian pembanding. Pemilihan batas bawah kejadian pembanding dengan magnitudo 5,0 dikarenakan gempa bumi dengan magnitudo tersebut sudah termasuk ke dalam gempa bumi kategori moderat (Pennington, 2006). Kejadian utama tersebut disimbolkan dengan kejadian A dan kejadian pembanding disimbolkan dengan kejadian B. Analisis statistik yang digunakan adalah analisis probabilitas, yaitu peluang terjadinya kejadian A sebelum kejadian B terjadi. Sebagai contoh, peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo 5,5 sebelum terjadinya gempa bumi dengan kekuatan $5,0 \leq M < 5,5$; atau peluang terjadinya gempa bumi dengan $M = 6,2$ sebelum terjadinya gempa bumi dengan kekuatan $5,0 \leq M < 6,2$ dan lain sebagainya.

Pengolahan data menggunakan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel* dan *R versi 3.2.2*. Langkah –langkah analisis data yang dilakukan adalah pertama, menguji independensi data magnitudo gempa bumi yang terjadi melalui uji *Run test*. *Run test* adalah sebuah uji statistik nonparametrik yang dapat digunakan untuk memeriksa apakah sebuah dataset berasal dari proses yang random. Kedua, menghitung frekuensi kejadian gempa bumi utama (kejadian A) dan kejadian gempa bumi pembanding (kejadian B). Ketiga, menghitung peluang terjadinya gempa bumi utama (kejadian A) dan gempa bumi pembanding (kejadian B). Keempat, menghitung peluang terjadinya gempa bumi utama (kejadian A) sebelum terjadinya gempa bumi pembanding (kejadian B) dan terakhir melakukan analisis dan interpretasi dari hasil pada langkah 4.

Konsep dasar peluang. Menurut Roussas (2002), peluang sebagai fungsi probabilitas kejadian F yang dinyatakan dalam $P(F)$ adalah sebuah fungsi yang memenuhi 3 hal sebagai berikut:

P bernilai *non-negative*, yaitu $P(F) \geq 0$, untuk setiap kejadian F.

P bersifat *normed*, yaitu $P(S)=1$, dimana S adalah seluruh kejadian dalam ruang sampel.

P bersifat σ -additive, dimana untuk setiap pasangan kejadian F_j yang saling bebas maka $P(\sum_j F_j) = \sum_j P(F_j)$, untuk $j=1,2,3,\dots$.

Peluang sebuah kejadian F adalah perbandingan antara jumlah kejadian F yang disimbolkan dengan $n(F)$ terhadap jumlah seluruh kejadian di dalam sebuah ruang sampel yang disimbolkan dengan $n(S)$, atau secara matematis dapat ditulis sebagai (1).

$$P(F) = \frac{n(F)}{n(S)} \dots\dots\dots(1)$$

Uji independensi data. Menurut Bradley (1968), *Run test* dapat digunakan untuk memeriksa apakah sebuah dataset berasal dari proses yang random. Nilai data yang berada di atas nilai median diberi kode positif dan nilai yang berada di bawah nilai median diberi kode negatif. Sebuah run didefinisikan sebagai rangkaian dari nilai positif atau negatif yang berurutan. Secara matematis, *Run test* diformulasikan sebagai (2).

$$Z = \frac{R - \bar{R}}{s_R} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana R adalah jumlah observasi dari *run*, $\bar{R} = \frac{2n_1n_2}{n_1+n_2} + 1$ adalah nilai ekspektasi dari jumlah *run* dan $s_R^2 = \frac{2n_1n_2(2n_1n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1+n_2)^2(n_1+n_2-1)}$ adalah varians dari jumlah *run*. Sedangkan n_1 dan n_2 menunjukkan jumlah nilai yang positif dan negatif dalam rangkaian data tersebut. Dataset dikatakan berasal dari sebuah proses yang random apabila nilai p -value dari *run test* $> 0,05$. Dataset yang berasal dari proses yang random dapat diartikan sebagai data yang independen satu dengan yang lainnya.

Peluang kejadian A sebelum kejadian B . Diberikan kejadian A dan B yang independen atau saling bebas ($P(A \cap B) = P(A)P(B)$). Untuk $i=1,2,3,\dots$, didefinisikan kejadian A_i dan B_i sebagai berikut:

A_i = kejadian A terjadi pada percobaan ke $-i$, dan B_i = kejadian B terjadi pada percobaan ke $-i$. Maka peluang terjadinya kejadian A sebelum kejadian B terjadi dapat dihitung dengan menggunakan (3).

$P(A \text{ terjadi sebelum } B \text{ terjadi}) =$

$$P[A_1 + (A_1^c \cap B_1^c \cap A_2) + (A_1^c \cap B_1^c \cap A_2^c \cap B_2^c \cap A_3) + \dots + (A_1^c \cap B_1^c \cap \dots \cap A_n^c \cap B_n^c \cap A_{n+1}) + \dots] \dots\dots(3)$$

Setelah dilakukan penyederhanaan formula matematis dalam beberapa langkah, maka diperoleh hasil akhir yang diberikan oleh (4).

$P(A \text{ terjadi sebelum } B \text{ terjadi})$

$$= P(A) \frac{1}{1 - P(A^c \cap B^c)} = P(A) \frac{1}{P(A) + P(B)} = \frac{P(A)}{P(A) + P(B)} \dots\dots(4)$$

Dengan demikian, peluang kejadian A terjadi sebelum terjadinya kejadian B adalah proporsi peluang kejadian A terhadap penjumlahan peluang A dan peluang B (Roussas, 2002).

Nilai ekspektasi rata-rata sampel. $X_1, \dots, X_n$ adalah variabel random yang berdistribusi independen dan identik (*i.i.d*) dan mempunyai fungsi distribusi F dan nilai ekspektasi μ . Maka nilai ekspektasi dari nilai rata-rata sampel ($\bar{X}$) adalah sama dengan nilai rata-rata populasinya (μ) seperti yang dijabarkan dalam (5).

$$\begin{aligned} E(\bar{X}) &= E\left[\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}\right] = \frac{1}{n} E[\sum_{i=1}^n X_i] \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E[X_i] = \frac{1}{n} n\mu = \mu \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa nilai ekspektasi dari rata-rata sampel adalah nilai rata-rata dari distribusi populasinya. Sehingga ketika nilai rata-rata distribusi sebuah populasi tidak diketahui, maka nilai rata-rata sampel bisa digunakan untuk mengestimasi nilai rata-rata distribusinya (μ) (Ross, 2010).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama periode tahun 2009 – 2017, telah terjadi gempa bumi sebanyak 46.335 kali di wilayah Indonesia dengan magnitudo mulai dari 1,0 sampai dengan 7,9 dengan kedalaman mulai dari 1 Km sampai dengan 1.000 Km. Tabel 2 memuat frekuensi kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia dan Pulau Sumatera pada tahun 2009 sampai dengan tahun 2017.

Tabel 2 menunjukkan bahwa secara nasional jumlah gempa bumi paling banyak terjadi pada tahun 2012 dengan jumlah sebanyak 6.624 kali dan paling sedikit terjadi pada tahun 2013 yaitu sebanyak 4.130 kali. Dari 46.335 gempa bumi

Tabel 2. Frekuensi kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia dan Pulau Sumatera tahun 2009 – 2017
(BMKG (2018)).

Wilayah	Tahun								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Indonesia	3.676	5.999	4.451	6.624	4.130	4.668	5.073	5.625	6.089
Sumatera	827	1.363	944	1.085	814	751	696	699	791
Persentase gempa bumi Sumatera terhadap Indonesia	22,50	22,72	21,21	16,38	19,71	16,09	13,72	12,43	12,99

Gambar 1 Distribusi gempa bumi dengan $M \geq 5,0$ di wilayah Pulau Sumatera tahun 2009 – 2017.

dengan magnitudo ≥ 1 yang terjadi di Indonesia sejak tahun 2009 hingga 2017, sebanyak 7.970 diantaranya terjadi di wilayah Pulau Sumatera atau sebanyak 17,20%. Dimana jumlah gempa bumi yang terbanyak terjadi pada tahun 2010 sebanyak 1.363 kali (22,72%) dan yang paling sedikit terjadi pada tahun 2015 sebanyak 696 kali (13,27%). Madlazim (2013) menyebutkan bahwa kecenderungan terjadinya kejadian gempa bumi semakin meningkat di wilayah Pulau Sumatera selama 49 tahun terakhir. Salah satu faktor yang mempengaruhi kesimpulan tersebut adalah semakin pesatnya perkembangan teknologi dan informasi dalam beberapa dekade terakhir serta bertambahnya jumlah stasiun seismograf di seluruh dunia sehingga informasi mengenai kejadian gempa bumi menjadi lebih detail dan akurat dibandingkan dengan sebelumnya. Gempa bumi Aceh tahun 2004 juga semakin mempertajam peningkatan jumlah kejadian gempa bumi tersebut (Handayani drr, 2012). Handayani (2010) menyebutkan bahwa jumlah kejadian gempa bumi pertahun sejak tahun 2004 lebih kurang dua kali lebih banyak dibandingkan dengan kejadian pada tahun sebelumnya. Penelitian Lusiani drr. (2019) pada tahun 2018 menunjukkan bahwa wilayah Aceh sebagai pusat gempa bumi pada tahun 2004 memiliki tingkat seismisitas yang tinggi. Lebih lanjut, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa Aceh Singkil merupakan wilayah yang memiliki tingkat resiko yang paling besar untuk terjadinya gempa bumi dengan $M \geq 7,0$. Sebaran lokasi terjadinya gempa bumi dengan $M \geq 5,0$ di wilayah Pulau Sumatera pada tahun 2009 – 2017 ditampilkan pada Gambar 1.

Magnitudo gempa bumi yang terjadi di wilayah

Pulau Sumatera terlebih dahulu dianalisis apakah berasal dari proses yang random atau tidak. Data yang berasal dari proses yang random dapat diartikan sebagai data yang independen antar satu dengan yang lainnya. Dengan kata lain, data tersebut bersifat saling bebas atau tidak saling mempengaruhi antar satu data dengan data yang lainnya. Pengujian proses random tersebut dilakukan dengan menggunakan uji non parametrik *Run test*. Tabel 3 memuat hasil pengujian independensi magnitudo gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Sumatera dengan $M \geq 5,0$ untuk rentang tahun 2009 – 2017 dengan menggunakan *Run test* yang diberikan oleh (2).

Berdasarkan Tabel 3, diketahui bahwa gempa bumi dengan $M \geq 5,0$ yang terjadi di wilayah Pulau Sumatera dalam rentang tahun 2009 sampai dengan 2017 adalah berasal dari proses yang random karena memiliki nilai p-value dari uji run test yang lebih besar dari 0,05. Dengan kata lain, secara umum magnitudo gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Sumatera adalah *independen* (saling bebas) antara satu kejadian gempa bumi dengan kejadian gempa bumi yang lainnya. Dengan demikian, besarnya magnitudo gempa bumi yang satu cenderung tidak mempengaruhi besarnya magnitudo gempa bumi yang lainnya di wilayah Pulau Sumatera. Hal ini didukung oleh penelitian Handayani (2010) yang menyimpulkan bahwa data kegempaan dalam kurun waktu tahun 1973 hingga 2009 tidak memperlihatkan adanya pola waktu dan lokasi yang teratur dari kejadian gempa bumi di Indonesia.

Peluang kejadian gempa bumi yang dianalisis adalah untuk gempa bumi dengan kategori

Tabel 3. Uji independensi magnitudo gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Sumatera.

Tahun	<i>Run Test</i>					
	<i>Z</i>	Jumlah <i>run</i>	n_1	n_2	n	<i>p-value</i>
2009	-1,1765	39	42	45	87	0,239
2010	0,6272	36	32	33	65	0,531
2011	-0,1181	28	24	32	56	0,906
2012	-1,1929	20	23	23	46	0,233
2013	-1,0046	14	14	18	32	0,315
2014	0,8581	18	13	17	30	0,391
2015	-1,0150	11	12	13	25	0,310
2016	0,6330	17	13	16	29	0,527
2017	-0,5427	14	18	12	30	0,587

Tabel 4. Frekuensi kejadian gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera tahun 2009 – 2017 (BMKG (2018)).

Jumlah Kejadian Gempa bumi	Tahun								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Sumatera ($M \geq 5,5$)	26	21	18	8	5	5	7	9	4
Sumatera ($M \geq 1,0$)	827	1.363	944	1.085	814	751	696	699	791
Persentase gempa bumi dengan $M \geq 5,5$ terhadap $M \geq 1,0$	3,14	1,54	1,91	0,74	0,61	0,67	1,01	1,29	0,51

merusak yaitu gempa bumi dengan $M \geq 5,5$. Tabel 4 menyajikan jumlah kejadian gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera dengan $M \geq 5,5$ untuk periode tahun 2009 – 2017.

Tabel 4 menunjukkan bahwa meskipun jumlah gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera yang paling

banyak terjadi pada tahun 2010, namun secara persentase jumlah kejadian gempa bumi dengan $M \geq 5,5$ yang paling banyak terjadi pada tahun 2009 yaitu sebesar 3,14% atau sejumlah 26 dari 827 kejadian gempa bumi. Sedangkan persentase jumlah kejadian gempa bumi dengan $M \geq 5,5$ yang

Tabel 5. Intensitas kejadian gempa bumi menurut magnitudo yang dievaluasi (BMKG (2018)).

Magnitudo	Tahun								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
$5,0 \leq M \leq 5,4$	77	57	50	38	35	31	25	24	35
5,5	3	4	5	1	0	1	0	1	0
5,6	8	6	4	3	1	0	3	2	1
5,7	4	3	5	0	0	2	0	2	0
5,8	1	1	0	0	0	0	2	1	0
5,9	2	0	0	0	1	1	1	0	0
6,0	2	1	0	1	1	1	0	0	1
6,1	0	1	2	2	1	-	1	0	0
6,2	0	1	1	0	1	-	-	0	0
6,3	2	1	0	1	-	-	-	0	0
6,4	1	0	0	-	-	-	-	0	1
6,5	0	0	0	-	-	-	-	2	1
6,6	0	0	1	-	-	-	-	0	-
6,7	0	0	-	-	-	-	-	0	-
6,8	2	0	-	-	-	-	-	0	-
6,9	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,0	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,1	0	2	-	-	-	-	-	0	-
7,2	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,3	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,4	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,5	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,6	0	0	-	-	-	-	-	0	-
7,7	0	1	-	-	-	-	-	0	-
7,8	0	-	-	-	-	-	-	1	-
7,9	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	103	78	68	46	40	36	32	33	39

paling kecil terjadi pada tahun 2017 yaitu sebesar 0,51% atau sebanyak 4 dari 791 kejadian gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera yang terjadi pada tahun tersebut. Distribusi kejadian gempa bumi dengan $M \geq 5,0$ untuk setiap periode tahun ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan bahwa gempa bumi dengan magnitudo yang kecil cenderung memiliki frekuensi kejadian yang lebih banyak dibandingkan dengan gempa bumi dengan magnitudo yang lebih besar. Selain itu, diketahui bahwa nilai maksimum magnitudo gempa bumi yang terjadi untuk setiap tahunnya adalah berbeda - beda. Magnitudo gempa bumi terbesar pada tahun 2009 adalah sebesar 7,9. Nilai maksimum magnitudo gempa bumi tersebut kemudian cenderung mengalami penurunan pada tahun-tahun berikutnya hingga tahun 2014 dengan magnitudo maksimum sebesar 6,0. Selanjutnya terjadi sedikit peningkatan magnitudo maksimum pada tahun 2015 yaitu sebesar 6,1. Hal yang menarik terjadi pada tahun 2016, dimana nilai maksimum magnitudo gempa bumi yang terjadi pada tahun tersebut meningkat secara drastis dari tahun sebelumnya hingga mencapai magnitudo 7,8 yang kemudian turun kembali menjadi 6,5 pada tahun 2017. Dengan menggunakan data frekuensi kejadian gempa bumi pada Tabel 4 dan 5 tersebut, selanjutnya dapat dihitung nilai peluang terjadinya gempa bumi untuk setiap tahunnya berdasarkan magnitudo yang dievaluasi. Dimana peluang terjadinya gempa bumi untuk magnitudo tertentu adalah perbandingan antara jumlah kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang dievaluasi terhadap jumlah seluruh gempa bumi pada tahun yang bersangkutan (1), atau secara matematis dapat ditulis ulang sebagai (6).

$$P(M_i) = \frac{n(M_i)}{n(M)}, \text{ dimana } M = \sum_{i=1}^k M_i \dots\dots\dots (6)$$

Nilai peluang kejadian gempa bumi untuk seluruh magnitudo yang dievaluasi ditampilkan pada Tabel 6.

Berdasarkan Tabel 6, terlihat bahwa peluang terjadinya gempa bumi cenderung menjadi semakin kecil seiring bertambah besarnya magnitudo gempa bumi yang dievaluasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang lebih besar akan lebih jarang terjadi dari pada gempa bumi dengan magnitudo yang lebih kecil. Selanjutnya, dengan menggunakan teori peluang terjadinya kejadian *A* sebelum kejadian *B*, maka

dapat dihitung peluang terjadinya gempa bumi dengan $M \geq 5,5$ (kejadian *A*) sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo yang berada pada interval 5,0 – batas bawah magnitudo yang dievaluasi (kejadian *B*). Perhitungan peluang tersebut didasarkan pada (4) yang juga dapat ditulis ulang sebagai (7).

$$P(A_i \text{ terjadi sebelum } B \text{ terjadi}) = \frac{P(A_i)}{P(A_i) + P(B)} \dots\dots(7)$$

Dimana *i* adalah magnitudo ke-*i* yang dievaluasi (*i* = 5,5; 5,6; 5,7; 5,8; ...). Peluang terjadinya gempa bumi kejadian *A* sebelum terjadinya gempa bumi kejadian *B* yang disebut dengan kejadian gempa bumi dengan lompatan magnitudo di wilayah Pulau Sumatera pada tahun 2009 – 2017 ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Peluang terjadinya gempa bumi kejadian *A* sebelum terjadinya gempa bumi kejadian *B*.

Sejalan dengan peluang kejadian gempa bumi pada Tabel 6, peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo yang dievaluasi sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo pembanding (gempa bumi dengan lompatan magnitudo) juga cenderung menjadi semakin kecil seiring bertambah besarnya magnitudo gempa bumi yang dievaluasi. Selanjutnya, untuk mengestimasi nilai rata-rata populasi dari distribusi peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo di wilayah Pulau Sumatera, maka digunakan (5) yaitu nilai ekspektasi dari rata-rata sampel ($E(X)$) peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo untuk tahun 2009 sampai dengan tahun 2017. Nilai ekspektasi dari rata - rata sampel tersebut digunakan sebagai nilai estimasi dari peluang kejadian gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada interval tertentu di wilayah Pulau Sumatera. Hasil perhitungan nilai $E(X)$ ditampilkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa secara umum peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo cenderung menjadi semakin kecil seiring bertambah besarnya lompatan magnitudo yang dievaluasi. Kasus khusus terjadi pada gempa bumi dengan magnitudo 5,5; dimana peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo 5,5 sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo antara 5,0 hingga 5,4 adalah sebesar 0,03232. Selanjutnya, peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo 5,6 sebelum terjadinya

Tabel 6. Peluang kejadian gempa bumi berdasarkan magnitudo yang dievaluasi.

Magni- tudo	Tahun								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
5,5	0,003628	0,002935	0,005297	0,000922	0,000000	0,001332	0,000000	0,001431	0,000000
5,6	0,009674	0,004402	0,004237	0,002765	0,001229	0,000000	0,004310	0,002861	0,001264
5,7	0,004837	0,002201	0,005297	0,000000	0,000000	0,002663	0,000000	0,002861	0,000000
5,8	0,001209	0,000734	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,002874	0,001431	0,000000
5,9	0,002418	0,000000	0,000000	0,000000	0,001229	0,001332	0,001437	0,000000	0,000000
6,0	0,002418	0,000734	0,000000	0,000922	0,001229	0,001332	0,000000	0,000000	0,001264
6,1	0,000000	0,000734	0,002119	0,001843	0,001229	-	0,001437	0,000000	0,000000
6,2	0,000000	0,000734	0,001059	0,000000	0,001229	-	-	0,000000	0,000000
6,3	0,002418	0,000734	0,000000	0,000922	-	-	-	0,000000	0,000000
6,4	0,001209	0,000000	0,000000	-	-	-	-	0,000000	0,001264
6,5	0,000000	0,000000	0,000000	-	-	-	-	0,002861	0,001264
6,6	0,000000	0,000000	0,001059	-	-	-	-	0,000000	-
6,7	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
6,8	0,002418	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
6,9	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,0	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,1	0,000000	0,001467	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,2	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,3	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,4	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,5	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,6	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,7	0,000000	0,000734	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,8	0,000000	-	-	-	-	-	-	0,001431	-
7,9	0,001209	-	-	-	-	-	-	-	-

Gambar 2 Nilai ekspektasi peluang kejadian gempa bumi dengan lompatan magnitudo di wilayah Pulau Sumatera.

Tabel 7. Peluang terjadinya gempa bumi kejadian A sebelum terjadinya gempa bumi kejadian B.

Magnitudo	Tahun								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
5,5	0,037500	0,065574	0,090909	0,025641	0,000000	0,031250	0,000000	0,040000	0,000000
5,6	0,090909	0,089552	0,067797	0,071429	0,027778	0,000000	0,107143	0,074074	0,027778
5,7	0,043478	0,042857	0,078125	0,000000	0,000000	0,058824	0,000000	0,068966	0,000000
5,8	0,010753	0,014085	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,066667	0,033333	0,000000
5,9	0,021053	0,000000	0,000000	0,000000	0,027027	0,028571	0,032258	0,000000	0,000000
6,0	0,020619	0,013889	0,000000	0,023256	0,026316	0,027778	0,000000	0,000000	0,027027
6,1	0,000000	0,013699	0,030303	0,044444	0,025641	-	0,031250	0,000000	0,000000
6,2	0,000000	0,013514	0,014925	0,000000	0,025000	-	-	0,000000	0,000000
6,3	0,020202	0,013333	0,000000	0,021739	-	-	-	0,000000	0,000000
6,4	0,010000	0,000000	0,000000	-	-	-	-	0,000000	0,026316
6,5	0,000000	0,000000	0,000000	-	-	-	-	0,062500	0,025641
6,6	0,000000	0,000000	0,014706	-	-	-	-	0,000000	-
6,7	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
6,8	0,019608	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
6,9	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,0	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,1	0,000000	0,025974	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,2	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,3	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,4	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,5	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,6	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,7	0,000000	0,012821	-	-	-	-	-	0,000000	-
7,8	0,000000	-	-	-	-	-	-	0,030303	-
7,9	0,009709	-	-	-	-	-	-	-	-

gempa bumi dengan kekuatan 5,0 – 5,5 adalah sebesar 0,06183. Peluang tersebut kemudian menurun setengahnya menjadi 0,03247 apabila gempa bumi yang dianalisis berada pada $M = 5,7$ sebagai kejadian A sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo 5,0 – 5,6 sebagai kejadian B. Nilai peluang tersebut cenderung mengalami penurunan sampai pada peluang 0,0000 pada gempa bumi dengan lompatan magnitudo 6,7. Kemudian terjadi kenaikan peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada 6,8 dan 7,1 dengan peluang masing-masing sebesar 0,00654 dan 0,00866.

Selanjutnya, terdapat dua hal yang menarik dari grafik pada Gambar 2 tersebut. Pertama, peluang terjadi gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada interval 6,9 – 7,0 serta pada interval 7,2 –

7,6 bernilai mendekati nol. Hal ini terjadi karena selama tahun 2009 – 2017, tidak pernah terjadi gempa bumi dengan magnitudo yang berada pada interval tersebut. Sehingga peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada interval tersebut sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo masing-masing antara 5,0 – 6,8 dan 6,9 serta antara 5,0 – 7,1; 7,2; 7,3; 7,4 dan 7,5 adalah bernilai mendekati nol.

Kedua, terjadi peningkatan peluang kejadian gempa bumi dengan lompatan magnitudo yang besar terutama pada magnitudo 7,7; 7,8 dan 7,9 dengan peluang masing-masing sebesar 0,00427; 0,01515 dan 0,00971. Hal ini mengindikasikan bahwa gempa bumi dengan magnitudo di atas 7,6 dapat saja terjadi sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo antara 5,0 hingga 7,6; walaupun

dengan peluang yang cukup kecil. Oleh karena itu, kemungkinan terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo yang cukup besar patut diwaspadai dan disikapi secara bijak dan tepat oleh pihak-pihak terkait. Sebuah wilayah yang tidak memiliki riwayat intensitas kejadian gempa bumi yang tinggi, tetap memiliki kemungkinan atau peluang untuk mengalami gempa bumi dengan magnitudo yang besar. Gempa bumi dengan kekuatan besar tersebut dapat diakibatkan oleh terlepasnya akumulasi energi yang tertahan di suatu wilayah tertentu dalam jangka waktu yang cukup lama. Pada saat tertentu, kekuatan energi tersebut akan terlepas sekaligus tanpa melalui pelepasan energi secara parsial misalnya pada saat terjadinya patahan lempengan bumi di suatu wilayah seperti yang terjadi pada gempa bumi di Aceh (tahun 2004, 2005 dan 2012), Sumatera Utara (tahun 2005), Sumatera Barat (tahun 2009, 2010 dan 2016) dan Bengkulu (tahun 2007).

Analisis probabilitas sangat bergantung pada jumlah data yang tersedia. Semakin panjang periode data penelitian yang digunakan, maka akan semakin tinggi tingkat akurasi perhitungan probabilitasnya. Sehingga ketersediaan data kejadian gempa bumi merupakan salah satu isu penting dalam penelitian ini. Selain itu, batas bawah kekuatan gempa bumi kejadian pembandingan dibatasi pada magnitudo 5,0. Penggunaan batas bawah gempa bumi dengan magnitudo yang lebih kecil akan memberikan gambaran yang lebih umum (*general*) mengenai kejadian gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada interval yang lebih rendah.

KESIMPULAN

Selama kurun waktu 2009 - 2017, 17,20% kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia terjadi di sekitar Pulau Sumatera. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah Pulau Sumatera memiliki potensi kejadian gempa bumi yang cukup besar. Pengujian independensi gempa bumi dengan $M \geq 5,0$ menunjukkan bahwa magnitudo gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Sumatera bersifat saling bebas antara satu kejadian gempa bumi dengan kejadian yang lainnya. Peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada interval tertentu cenderung menjadi semakin kecil seiring bertambah besarnya lompatan magnitudo yang dianalisis terutama pada interval 5,6 hingga 6,7. Selama kurun waktu tahun 2009 – 2017, wilayah

Pulau Sumatera tidak pernah mengalami kejadian gempa bumi untuk magnitudo yang berada pada interval 6,9 – 7,0 serta 7,2 – 7,6; sehingga peluang terjadinya gempa bumi dengan lompatan magnitudo pada interval tersebut adalah mendekati nol. Selain itu, analisis probabilitas juga menunjukkan bahwa gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera dengan magnitudo di atas 7,6 dapat terjadi sebelum terjadinya gempa bumi dengan magnitudo antara 5,0 – 7,6; meskipun dengan peluang yang cukup kecil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) atas akses data historis kejadian gempa bumi di wilayah Pulau Sumatera tahun 2009 – 2017.

DAFTAR PUSTAKA

- BMKG, 2018. Repository - Data Gempabumi Indonesia. <http://repogempa.bmkg.go.id/index.php>, diunduh 6 April 2018.
- Bradley, J. V., 1968. Distribution-Free Statistical Tests. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
- Budiman, A., 2009. Kajian Karakteristik Gempa Bumi Sumatera Barat. Jurnal Ilmu Fisika 1(2): 8 – 12.
- Galih, D. R., dan Hadayani, L., 2007. Pemetaan Pola Terjadinya Gempa Bumi di Indonesia dengan Metode Fraktal. Riset Geologi dan Pertambangan 17(2): 51 – 56.
- Handayani, L., 2010. Peningkatan aktivitas gempa bumi di Indonesia tahun 1973 - 2009. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi 1(2): 71 – 78.
- Handayani, L., Permana, H., dan Gaffar, E. Z., 2012. Segmentasi tektonik aktif pada Lempeng Mikro Sumatra Bagian Utara (Aceh) ditinjau dari sebaran episenter gempa bumi. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi 3(2): 71 – 77.
- Lusiani, E., Anwar, S., dan Nugraha, M. F., 2019. Penentuan Tingkat Seismisitas Wilayah Propinsi Aceh Dengan Metode Gutenberg Richter (Nilai A dan Nilai B). Jurnal Meteorologi dan Geofisika 19(2): 71 – 79. <https://doi.org/10.31172/jmg.v19i2.536>.
- Madlazim, M., 2013. Kajian Awal Tentang b Value Gempa Bumi di Sumatra Tahun 1964 - 2013.

- Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya 3(1): 41 – 46. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v3n1.p41-46>.
- Marjiyono, M., 2016. Potensi Penguatan Gelombang Gempabumi oleh Sedimen Permukaan Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi 7(3): 135 – 144.
- Natawidjaja, D. H., 2007. Gempabumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup Yang Aman Dari Bencana Alam. LIPI, Jakarta.
- Pennington, W., 2006. Earthquakes Magnitude Scale and Classes. <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/magnitude.html>, diunduh 3 Oktober 2018.
- Rifai, L. D., dan Pudja, I. P., 2010. Studi Awal Hubungan Gempa Laut dan Gempa Darat Sumatra dan Sekitarnya. Jurnal Meteorologi dan Geofisika 11(2): 147 – 153.
- Ross, S., 2010. A First Course in Probability (Eighth Edition). Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.
- Roussas, G. G., 2002. A Course in Mathematical Statistics (Second Edition). Elsevier (Singapore) Pte Ltd., Singapore.
- Sadly, M., Triyono, R., Prasetya, T., Anugrah, S. D., Budiarta, B., Setiyono, U., ... Simangunsong, G., 2018. Katalog Tsunami Indonesia Per-Wilayah Tahun 416 - 2017 (Edisi Pertama). Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, Indonesia.
- Santoso, E., Widiyantoro, S., dan Sukanta, I. N., 2011. Studi Hazard Seismik dan Hubungannya dengan Intensitas Seismik di Pulau Sumatera dan Sekitarnya. Jurnal Meteorologi dan Geofisika 12(2): 129 – 136.
- Singh, H. N., Paudyal, H., Shanker, D., Panthi, A., Kumar, A., dan Singh, V. P., 2010. Anomalous Seismicity and Earthquake Forecast in Western Nepal Himalaya and its Adjoining Indian region. Pure and Applied Geophysics 167(6–7): 667 – 684. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0072-6>.
- Tobita, T., Iai, S., Chairullah, B., dan Asper, W., 2006. Reconnaissance report of the 2004 Great Sumatra-Andaman, Indonesia, Earthquake: Damage to geotechnical works in Banda Aceh and Meulaboh. Journal of Natural Disaster Science 28(1): 35 – 41.
- Wei-Haas, M., 2019. The science behind California's two big earthquakes. National Geographic (Edisi Juli). <https://www.nationalgeographic.com/science/2019/07/science-behind-californias-two-big-earthquakes/>, diunduh 20 Nopember 2019.
- Woodyard, C., 2019. Trona, California, was trying to bounce back. Then an earthquake hit. Then a bigger one. USA Today (Edisi 7 Juli). <https://www.usatoday.com/story/news/nation/2019/07/07/trona-california-hit-hardest-double-earthquakes/1665592001/>, diunduh 20 Nopember 2019.
- Zakaria, Z., Ismawan, I., dan Haryanto, I., 2011. Identifikasi dan Mitigasi pada Zona Rawan Gempa Bumi di Jawa Barat. Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY 9(1): 35 – 41.