

Perbandingan Perilaku Gempabumi Susulan Pidie Jaya (7 Desember 2016) dan Ambon (26 September 2019)***Comparison of Aftershocks Behavior of Pidie Jaya (December 7, 2016) and Ambon (September 26, 2019)***

Samsul Anwar, Faiza Maulia, Nany Salwa

Jurusan Statistika, FMIPA Universitas Syiah Kuala
Jln. Syech Abdurrauf, Kopelma Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesiae-mail: samsul.anwar@unsyiah.ac.id

Naskah diterima 1 Desember 2020, selesai direvisi 20 Juli 2022, dan disetujui 10 Agustus 2022

ABSTRAK

Aceh dan Maluku merupakan dua wilayah yang terletak pada pertemuan lempeng tektonik dunia sehingga banyak mengalami kejadian gempabumi. Gempabumi utama pada umumnya diikuti oleh gempabumi susulan dengan kekuatan dan intensitas yang berbeda-beda. Gempabumi Pidie Jaya (Provinsi Aceh) pada tanggal 7 Desember 2016 memiliki kesamaan karakter dengan gempabumi Ambon (Provinsi Maluku) pada tanggal 26 September 2019. Kedua gempabumi tersebut memiliki magnitudo 6,5 dengan kedalaman yang dangkal (< 60 km). Meskipun kedua gempabumi utama tersebut memiliki karakter yang sama, tetapi kerusakan dan korban jiwa yang diakibatkan keduanya berbeda sehingga perlu dilakukan perbandingan perilaku gempabumi susulan di kedua wilayah. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perilaku gempabumi susulan pascagempabumi utama di Pidie Jaya tahun 2016 dan Ambon tahun 2019. Penelitian ini menggunakan tiga fungsi *lifetime analysis* dalam menganalisis perilaku gempabumi susulan, yaitu *probability density function* (PDF), reliabilitas, dan *hazard*. Data yang digunakan bersumber dari BMKG berupa selisih waktu terjadinya gempabumi susulan terhadap gempabumi utamanya. Melalui *graphical analysis*, diketahui bahwa data selisih waktu gempabumi susulan Pidie Jaya mengikuti distribusi lognormal, sedangkan data selisih waktu gempabumi susulan Ambon mengikuti distribusi weibull. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gempabumi susulan Pidie Jaya berpeluang besar untuk terjadi dengan intensitas yang tinggi pada 2 hari pertama setelah gempabumi utamanya, sedangkan gempabumi susulan Ambon cenderung terjadi dengan intensitas yang lebih merata selama periode pengamatan. Hasil pengujian *log rank test* membuktikan adanya perbedaan yang signifikan antara kurva reliabilitas gempabumi susulan di wilayah Pidie Jaya dan Ambon.

Kata kunci: Ambon, *lifetime Analysis*, perilaku gempabumi susulan, Pidie Jaya**ABSTRACT**

Aceh and Maluku are two areas located at the confluence of the world's tectonic plates so that it experience many earthquakes. Mainshocks are typically followed by aftershocks with different magnitudes and intensities. The Pidie Jaya (Aceh Province) earthquake on December 7, 2016, has similar character with the Ambon (Maluku Province) earthquake on September 26, 2019. Both earthquakes have magnitudes of 6.5 with a shallow depth (< 60 km). Although those earthquakes possessed a similar character, the damage and casualties caused were different, so it is necessary to compare the aftershocks behavior following the mainshock in those two regions. This study aims to compare the aftershocks behavior following the mainshock of Pidie Jaya in 2016 and Ambon in 2019. This study uses three lifetime analysis functions in analyzing the aftershocks behavior, namely the probability density function (PDF), reliability and hazard function. The data employed sourced from BMKG, namely the time difference between aftershocks and the mainshock. Through graphical analysis, it is known that the time difference data for Pidie Jaya aftershocks follows a lognormal distribution, while the time difference data for Ambon aftershocks follows a weibull distribution. The results showed that the Pidie Jaya aftershock had a high probability of occurring with high intensity in the first 2 days after the mainshock, while the Ambon aftershock tends to happen with more even intensity during the observed periods. The log rank test results prove there is a significant difference between the reliability curves of the aftershocks in the Pidie Jaya and Ambon regions.

Keywords: Ambon, *lifetime analysis*, aftershocks behavior, Pidie Jaya

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan empat lempeng tektonik dunia, yaitu Lempeng Pasifik, Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Laut Filipina. Subduksi lempeng Australia dan lempeng Eurasia terjadi di wilayah barat Indonesia, tepatnya di Pulau Sumatra (Natawidjaja, 2002) dan subduksi lempeng Pasifik terjadi di wilayah timur Indonesia, tepatnya di utara Pulau Papua dan timur Maluku (Pasau dan Tanauma, 2011). Banyak kejadian gempabumi dengan magnitudo besar yang terjadi di kedua wilayah tersebut, termasuk Aceh dan Maluku. Gempabumi besar di kedua wilayah tersebut dapat terjadi secara langsung maupun dengan didahului oleh gempabumi dengan kekuatan yang lebih kecil. Penelitian Anwar (2019) menunjukkan bahwa gempabumi besar di wilayah Pulau Sumatra dapat terjadi tanpa didahului oleh gempabumi yang lebih kecil. Contoh gempabumi besar yang paling fenomenal adalah gempabumi Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 dengan magnitudo 9,1. Gempabumi tersebut mengakibatkan terjadinya peningkatan aktivitas kegempaan di wilayah Pulau Sumatra (Handayani drr., 2012).

Gempabumi utama secara umum diikuti oleh sejumlah gempabumi susulan yang umumnya berkekuatan lebih kecil. Gempabumi utama pada umumnya hanya terjadi sekali, tetapi gempabumi susulannya dapat terjadi berulang kali dengan intensitas dan kekuatan yang terus menurun seiring pertambahan waktu (Supar-toyo, 2015; Putri drr., 2016). Meski beberapa ahli menyatakan bahwa gempabumi susulan merupakan pertanda baik karena menyebabkan adanya stabilisasi batuan, tetapi guncangan yang dihasilkan tetap berisiko terhadap kerusakan. Melalui data gempabumi susulan yang ada, dapat dilakukan kajian mengenai perilaku gempabumi susulan melalui analisis peluang terjadinya gempabumi susulan pasca gempabumi utama dan membandingkannya antara suatu wilayah dengan wilayah yang lain.

Jika dilakukan pengamatan secara khusus, terdapat persamaan pada gempabumi Pidie Jaya

(Provinsi Aceh) yang terjadi pada 7 Desember 2016 dengan gempa Ambon (Provinsi Maluku) yang terjadi pada 26 September 2019. Gempabumi Pidie Jaya terjadi dengan magnitudo 6,5 dan berpusat pada koordinat 5,25 LU dan 96,24 BT atau pada jarak 106 km arah tenggara Kota Banda Aceh yang merupakan ibu kota Provinsi Aceh. Begitu pula dengan gempabumi Ambon yang berpusat di Pulau Seram tepatnya pada koordinat 3,43 LS – 128,46 BT juga terjadi dengan magnitudo 6,5. Selain itu, kedua gempabumi tersebut juga terjadi pada kedalaman kurang dari 60 km sehingga diklasifikasikan sebagai gempabumi dangkal. Gempabumi utama yang terjadi di kedua wilayah tersebut diikuti oleh ratusan gempabumi susulan dengan kekuatan yang bervariasi.

Gempabumi yang melanda kawasan Pidie Jaya dan Ambon menyebabkan kerugian yang besar, antara lain rusaknya bangunan dan infrastruktur lainnya serta jatuhnya ratusan korban jiwa. Meskipun memiliki karakter yang sama yaitu bermagnitudo 6,5 dan tergolong ke dalam gempabumi dangkal, tetapi kerusakan dan korban jiwa yang ditimbulkan oleh kedua gempabumi tersebut cukup berbeda. Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017) melaporkan bahwa gempabumi Pidie Jaya telah menyebabkan 10.534 unit rumah rusak serta 105 ruko dan 55 masjid roboh. Gempabumi tersebut mengakibatkan 102 korban meninggal dan 724 orang luka-luka. Gempabumi Ambon telah menyebabkan kerusakan pada 1.178 unit rumah, 43 unit rumah ibadah, 46 unit bangunan pendidikan, 25 fasilitas kesehatan serta beberapa sarana dan prasarana lainnya dengan 29 korban meninggal dan 163 luka-luka (Kementerian PUPR, 2019). Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu kajian mengenai perbandingan kedua gempabumi tersebut.

Kerugian jiwa dan materil yang diakibatkan oleh gempabumi dapat diminimalisir dengan adanya upaya mitigasi bencana. Salah satu upaya mitigasi bencana gempabumi yang dapat dilakukan adalah mengkaji perilaku gempabumi susulan dengan menggunakan metode *lifetime*

analysis. *Lifetime analysis* merupakan metode statistik yang menganalisis interval waktu berfungsinya suatu sistem hingga mengalami suatu kejadian (kegagalan). *Lifetime analysis* secara umum terdiri dari dua buah pendekatan, yaitu pendekatan parametrik dan non parametrik. Pendekatan parametrik sangat bertumpu pada penentuan distribusi peluang yang paling cocok dengan data penelitian, sedangkan pendekatan non parametrik tidak bergantung pada distribusi peluang tersebut. Contoh penerapan *lifetime analysis* dengan pendekatan parametrik dalam kasus gempabumi dapat ditemukan pada penelitian Anwar (2022) mengenai perilaku gempabumi di wilayah Pulau Sumatera berdasarkan waktu antar kejadian gempabumi yang berurutan dengan magnitudo di atas 5. Dari 8 distribusi peluang yang diujikan, data durasi waktu antar kejadian gempabumi yang berurutan pada penelitian tersebut mengikuti distribusi *log normal*, *weibull*, eksponensial dan gamma. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa kejadian gempabumi berikutnya dengan magnitudo yang lebih besar atau sama dengan gempabumi sebelumnya tergantung pada durasi waktu antar dua kejadian gempabumi yang berurutan terutama untuk magnitudo di bawah 5,8. Penelitian lainnya terkait penerapan *lifetime analysis* dalam kasus gempabumi dilakukan oleh González drr. (2006) yang menggunakan 3 distribusi peluang yaitu distribusi gamma, log normal, and weibull serta dua model fisika dalam memprediksi peluang terjadinya gempabumi besar berikutnya di segmen patahan San Andreas, California. Penelitian tersebut salah satunya menyimpulkan bahwa gempabumi besar berikutnya diprediksi akan terjadi tidak lebih dari 53 tahun setelah gempabumi besar yang terakhir terjadi. Secara umum, *lifetime analysis* memiliki tiga fungsi utama yaitu *probability density function (PDF)*, fungsi reliabilitas, dan fungsi laju kegagalan atau fungsi *hazard*. Ketiga fungsi tersebut dapat digunakan untuk mempelajari perilaku gempabumi susulan yang diukur melalui peluang dan laju kejadian gempabumi susulan pada suatu periode tertentu setelah terjadinya gempa utama.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini dilakukan untuk mempelajari dan membandingkan perilaku gempabumi susulan yang terjadi pasca gempabumi utama di Pidie Jaya pada tahun 2016 dan Ambon pada tahun 2019 melalui tiga fungsi dalam *lifetime analysis*. Perilaku gempabumi susulan tersebut diukur melalui peluang dan laju kejadian gempabumi susulan pada periode tertentu pasca gempabumi utamanya yang dihitung dengan menggunakan pendekatan parametrik. Penentuan pola distribusi data akan dilakukan terhadap empat macam distribusi peluang, yaitu distribusi normal, distribusi lognormal, distribusi eksponensial, dan distribusi *weibull*.

METODE PENELITIAN

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah selisih waktu (jam) terjadinya gempabumi susulan terhadap gempabumi utama Pidie Jaya 7 Desember 2016 dan selisih waktu (jam) terjadinya gempabumi susulan terhadap gempa utama Ambon 26 September 2019. Gempabumi susulan yang diamati yaitu gempabumi dengan magnitudo $\geq 3,00$ yang terjadi dalam kurun waktu dua bulan setelah gempabumi utama dan dalam rentang area 500 km dari titik pusat gempabumi utama. Gempabumi dengan magnitudo kurang dari 3,00 yang berada pada skala intensitas I hingga II skala MMI (*Modified Mercally Intensity*) merupakan gempabumi kecil yang tidak dirasakan atau dirasakan hanya oleh beberapa orang dan tidak menimbulkan kerusakan sehingga tidak dianalisis. Data diperoleh dari aplikasi Pusat Database BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika). Kriteria variabel dan batas penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Data durasi waktu terjadinya gempabumi susulan dianalisis dengan menggunakan metode *Lifetime Analysis* dengan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel 2013* dan *R versi 3.2.2* dengan *package Survival*. Adapun tahapan analisis data yang dilakukan dapat dijelaskan secara singkat dalam 6 langkah. Pertama, melakukan eksplorasi data melalui *summary statistics* berupa nilai

Tabel 1. Variabel penelitian

Variabel	Satuan	Skala	Rentang Waktu Pengamatan	Jumlah Gempabumi Susulan
Selisih Waktu Gempabumi Susulan Terhadap Gempabumi Utama Pidie Jaya	Jam	Rasio	7 Desember 2016 s/d 7 Februari 2017	167
Selisih Waktu Gempabumi Susulan Terhadap Gempabumi Utama Ambon	Jam	Rasio	26 September 2019 s/d 26 November 2019	479

minimum, maksimum, rata-rata (*mean*), *quartile* 1 (Q1), dan *quartile* 3 (Q3) dari data penelitian. Kedua, melakukan estimasi distribusi peluang yang paling sesuai dengan data penelitian melalui *graphical analysis*. Empat distribusi peluang yang diujikan pada penelitian ini adalah distribusi normal, lognormal, eksponensial dan weibull. Ketiga, melakukan estimasi parameter dari distribusi peluang yang terpilih pada tahap 2 dengan pendekatan *rank regression* terhadap sumbu *X*. Keempat, menghitung nilai ketiga fungsi penting dalam *lifetime analysis* yaitu PDF, reliabilitas dan *hazard* pada waktu tertentu berdasarkan distribusi peluang terpilih untuk masing-masing wilayah penelitian (Pidie Jaya dan Ambon). Kelima, melakukan perbandingan perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon melalui ketiga fungsi penting dalam *lifetime analysis*. Terakhir, melakukan pengujian *log rank test* untuk melihat ada tidaknya perbedaan antara perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon melalui perbandingan kurva reliabilitas.

Ada tiga fungsi penting dalam *lifetime analysis* yang dapat digunakan untuk menjelaskan perilaku gempabumi susulan yaitu *probability density function*, fungsi reliabilitas dan fungsi *hazard*. *Probability density function* ($f(t)$) atau disingkat dengan PDF menjelaskan peluang terjadinya gempabumi susulan pada waktu tertentu (t) pasca gempabumi utama. Fungsi reliabilitas ($R(t)$) menjelaskan peluang tidak terjadinya gempabumi susulan setelah rentang waktu tertentu (t) pascagempa utama. Sedangkan fungsi *hazard* ($h(t)$) menjelaskan kelajuan seketika terjadinya gempabumi susulan pada waktu tertentu (t) pascagempa utama. Fungsi *hazard* juga didefinisikan sebagai jumlah kejadian gempabumi susulan persatuan waktu (jam).

Ketiga fungsi penting dari keempat distribusi peluang yang diujikan pada data penelitian ini yaitu distribusi normal, lognormal, eksponensial dan *weibull* dapat dituliskan dalam Persamaan 1 hingga Persamaan 12 (ReliaSoft, 2015). Fungsi PDF, reliabilitas, dan *hazard* dari distribusi normal masing-masing adalah sebagai berikut:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots\dots (3)$$

Di mana t adalah data penelitian, μ adalah rata-rata dari data penelitian, σ adalah standar deviasi dari data penelitian, dan $\Phi(\cdot)$ adalah *cumulative distribuion function* dari distribusi normal standar ($\mathcal{Z}$).

Fungsi PDF, reliabilitas, dan *hazard* dari distribusi lognormal masing-masing adalah sebagai berikut:

$$f(t') = \frac{1}{t'\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t'-\mu'}{\sigma'}\right)^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t'-\mu'}{\sigma'}\right) \dots\dots\dots (5)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots\dots (6)$$

Di mana t' adalah logaritma dari data penelitian, μ' adalah rata-rata nilai logaritma dari data penelitian, σ' adalah standar deviasi nilai

logartima dari data penelitian, dan $\Phi(\cdot)$ adalah *cumulative distribuion function* dari distribusi normal standar ($\mathcal{Z}$).

Fungsi *PDF*, reliabilitas, dan *hazard* dari distribusi eksponensial masing-masing adalah sebagai berikut:

$$f(t) = \theta e^{-\theta t} \dots\dots\dots (7)$$

$$R(t) = e^{-\theta t} \dots\dots\dots (8)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots\dots (9)$$

Di mana t adalah data penelitian, dan θ adalah parameter skala (*scale*).

Fungsi *PDF*, reliabilitas, dan *hazard* dari distribusi weibull masing-masing adalah sebagai berikut:

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1} e^{-(t/\eta)^\beta}}{\eta^\beta} \dots\dots\dots (10)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt = e^{-(t/\eta)^\beta} \dots\dots\dots (11)$$

$$h(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \dots\dots\dots (12)$$

Di mana t adalah data penelitian, β adalah parameter bentuk (*shape*), dan η adalah parameter skala (*scale*).

Graphical analysis adalah sebuah metode yang digunakan untuk menentukan kecocokan distribusi data dengan distribusi peluang teoritis yang diujikan melalui *probability plotting*. Setiap distribusi peluang memiliki koordinat yang berbeda-beda dalam *graphical analysis*. Berikut adalah titik koordinat dalam penyusunan *probability plotting* untuk keempat distribusi peluang yang diujikan yaitu distribusi normal (Persamaan 13), lognormal (Persamaan 14), eksponensial (Persamaan 15) dan weibull (Persamaan 16) (Zacks, 1992).

$$x_{(i)} \text{ dengan } Z_{i,n} = \Phi^{-1}\left(\frac{i-3/8}{n+1/4}\right), i=1, \dots, n \dots\dots\dots (13)$$

$$y_{(i)} = \ln x_{(i)} \text{ dengan } Z_{i,n} = \Phi^{-1}\left(\frac{i-3/8}{n+1/4}\right), i=1, \dots, n \dots\dots\dots (14)$$

$$x_{(i)} = \ln x_{(i)} \text{ dengan } E_{i,n} = -\ln\left(1 - \frac{i}{n+1}\right), i=1, \dots, n \dots\dots\dots (15)$$

$$y_{(i)} = \ln x_{(i)} \text{ dengan } u_{i,n} = \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{i}{n+1}\right)\right), i=1, \dots, n \dots\dots\dots (16)$$

Di mana i menunjukkan urutan data (1, 2, 3, ..., n), x menunjukkan data penelitian dan $\Phi^{-1}(\cdot)$ menunjukkan nilai $\mathcal{Z}$ tabel atau *z-score*. Distribusi peluang teoritis yang paling sesuai dengan distribusi data adalah distribusi yang memiliki nilai koefisien determinasi (*adjusted R²*) terbesar.

Parameter dari sebuah distribusi peluang dapat diestimasi dengan metode *rank regression* terhadap sumbu X . *Rank regression* terhadap sumbu X menggunakan prinsip *least square* dalam penentuan nilai parameternya dengan model umum $x = \hat{a} + \hat{b}y$. Dalam *rank regression* terhadap sumbu X , secara umum nilai x adalah waktu kegagalan (t_i) dan y adalah *median rank* ($F(t_i)$). Dalam penelitian ini, *median rank* diestimasi dengan formula *Benard's Approximation* sebagai berikut (ReliaSoft, 2015):

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \dots\dots\dots (17)$$

Di mana N adalah jumlah unit data penelitian, dan i adalah urutan data penelitian (1, 2, 3, ..., n). Estimasi parameter model umum *rank regression* terhadap sumbu X ($\hat{a}$ dan $\hat{b}$) dapat ditentukan melalui Persamaan 18 dan 19 (ReliaSoft, 2015).

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \bar{x} - \hat{b}\bar{y} \dots\dots\dots (18)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N}} \dots\dots\dots (19)$$

Lebih rinci, koordinat titik, parameter dan estimator untuk keempat distribusi peluang yang diujikan pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 2 (ReliaSoft, 2015).

Di mana i adalah urutan data penelitian (1, 2, 3, ..., n), t adalah data penelitian, t' adalah logaritma dari data penelitian, $F(t_i)$ adalah median rank dan $\Phi^{-1}[F(t_i)]$ adalah nilai z -score atau z tabel dari median rank.

Penentuan ada tidaknya perbedaan antara perilaku gempa susulan Pidie Jaya dan gempa susulan Ambon yang dilihat melalui kurva fungsi reliabilitas dapat dilakukan dengan menggunakan uji *log rank*. Menurut Kleinbaum dan Klein (2012), formula untuk menentukan statistik uji *log rank* untuk dua kelompok data diberikan oleh Persamaan 20.

$$\text{statistik uji} = \frac{(\sum_{i=1}^n (m_{ji} - e_{ji}))^2}{\sum_j \frac{n_{1j} n_{2j} (m_{1j} + m_{2j})(n_{1j} + n_{2j} - m_{1j} - m_{2j})}{(n_{1j} + n_{2j})^2 (n_{1j} + n_{2j} - 1)}} \quad (20)$$

Keterangan:

n_{ji} : Jumlah subjek yang berisiko dari kelompok ke- j ($j= 1,2$) pada waktu kegagalan ke- i

m_{ji} : Jumlah subjek yang mengalami kejadian dari kelompok ke- j ($j= 1,2$) pada waktu kegagalan ke- i .

e_{ji} : Nilai ekspektasi dari kelompok ke- j ($j= 1,2$) pada waktu kegagalan ke- i

Hipotesis nol pada uji *log rank* menyatakan tidak adanya perbedaan yang signifikan antara dua kurva reliabilitas yang dibandingkan. Hipotesis nol ditolak apabila nilai statistik uji *log rank* lebih besar daripada nilai tabel *chi-square* atau nilai *p-value* lebih kecil daripada tingkat signifikansi 0,05.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis deskriptif melalui *summary statistics* digunakan untuk memberikan informasi awal mengenai distribusi, pemusatan dan kecenderungan data. Nilai statistik deskriptif data selisih waktu gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon ditampilkan pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3, diketahui bahwa gempabumi susulan di Pidie Jaya terjadi sebanyak 167 kali dalam jangka waktu dua bulan pasca gempabumi utamanya dan gempabumi susulan di wilayah Ambon terjadi sebanyak 479 kali dalam jangka waktu yang sama pasca gempabumi utamanya. Rata-rata waktu terjadinya gempabumi susulan di Pidie Jaya adalah 304,04 jam (13 hari) setelah gempabumi utama. Sekitar 25% gempabumi susulan terjadi dalam 5,88 jam dan 75% gempabumi susulan terjadi dalam 462,31 jam (19 hari). Hal ini mengindikasikan bahwa banyak gempabumi susulan terjadi pada periode awal pasca gempabumi utama Pidie Jaya dengan durasi waktu antar gempabumi susulan

Tabel 2. Estimator parameter distribusi peluang berdasarkan *rank regression* terhadap sumbu x

Distribusi	Koordinat Titik (x, y)	Parameter	Estimator
Normal	$(t_i, \Phi^{-1}[F(t_i)])$	Mean (μ)	$\hat{\mu} = \hat{a}$
		Standar deviasi (σ)	$\hat{\sigma} = \hat{b}$
Lognormal	$(t_i', \Phi^{-1}[F(t_i')])$	Mean (μ')	$\mu' = \frac{\hat{a}}{\hat{b}} \sigma'$
		Standar deviasi (σ')	$\sigma' = \hat{b}$
Ekspensial	$(t_i, \ln[1 - F(t_i)])$	Parameter Skala (θ)	$\theta = -\hat{b}$
Weibull	$(\ln(t_i), \ln\{-\ln[1 - F(t_i)]\})$	Parameter Bentuk (β)	$\hat{\beta} = 1/\hat{b}$
		Parameter Skala (η)	$\hat{\eta} = \exp\left(\frac{\hat{a}}{\hat{b}} \cdot \frac{1}{\hat{\beta}}\right)$

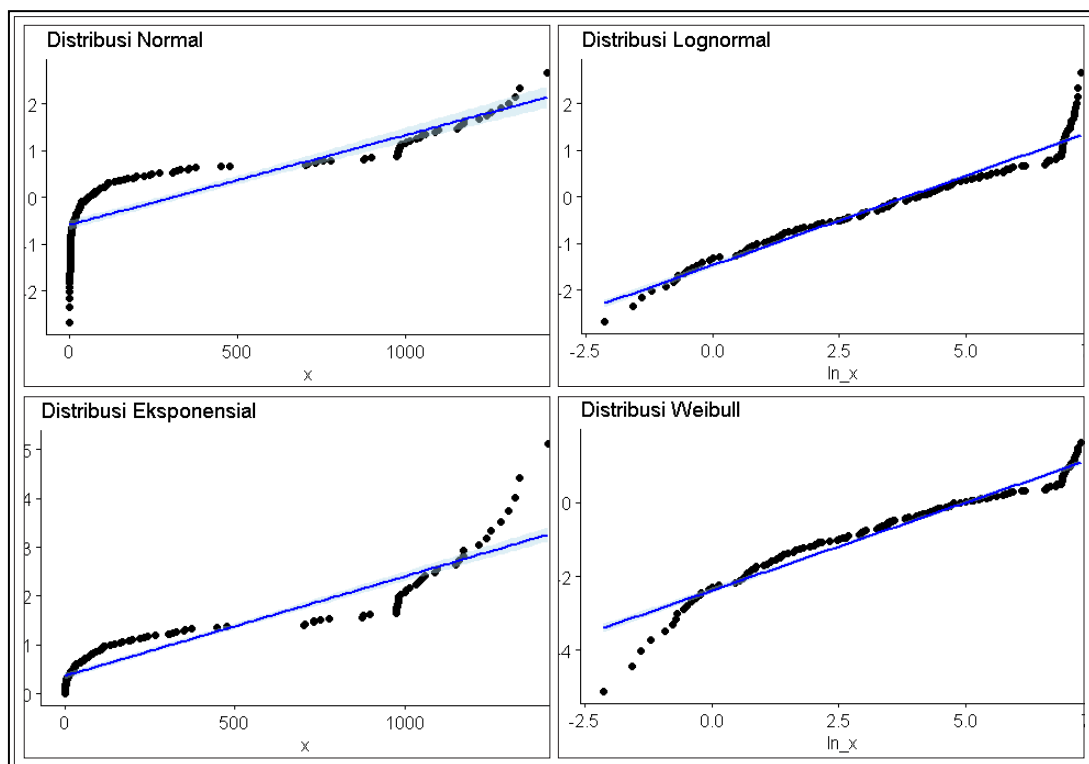
Tabel 3 Statistik deskriptif data penelitian

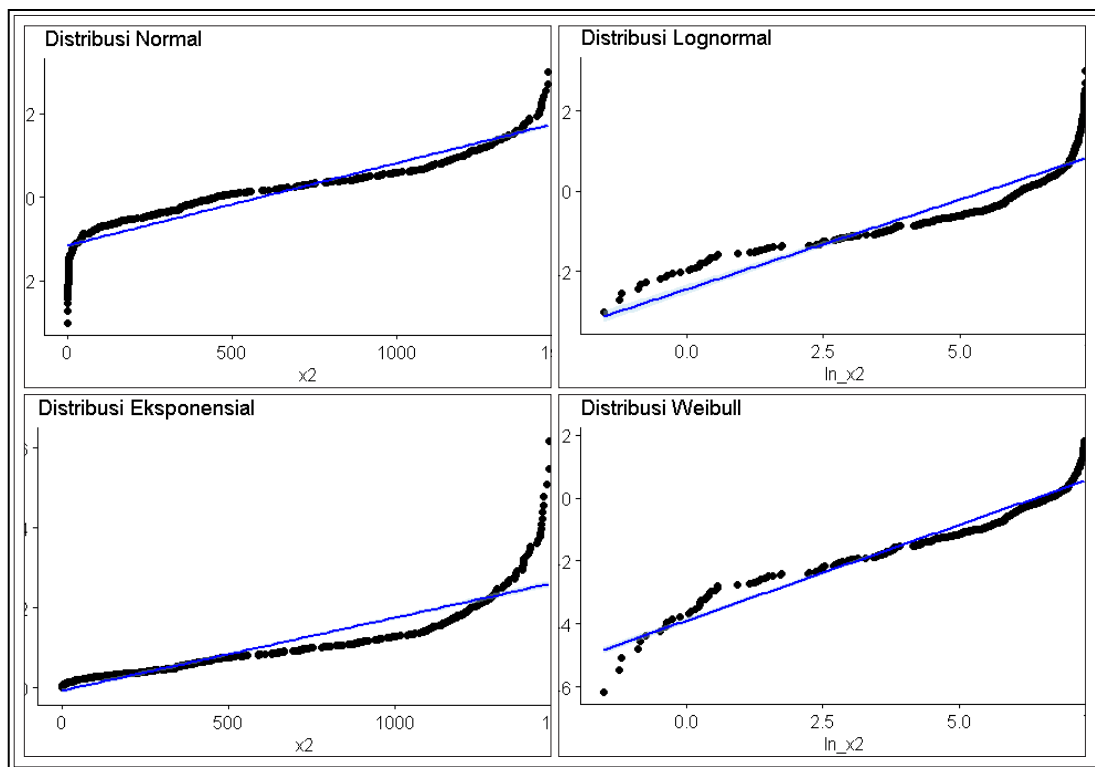
Statistik	Selisih waktu Gempabumi Susulan Terhadap Gempa Utama Pidie Jaya (jam)	Selisih Waktu Gempabumi Susulan Terhadap Gempa Utama Ambon (jam)
N	167	479
Min	0,12	0,22
Maks	1419,55	1461,49
Mean	304,04	583,59
Q_1	5,88	116,50
Q_3	462,31	1075,59

yang sangat dekat. Nilai minimum sebesar 0,12 jam menunjukkan bahwa setelah terjadinya gempabumi utama, gempabumi susulan yang pertama terjadi 7 menit kemudian. Selanjutnya, rata-rata waktu terjadinya gempabumi susulan setelah gempabumi utama Ambon adalah sebesar 583,59 jam (25 hari). Sekitar 25% gempabumi susulan terjadi dalam waktu 116,5 jam (5 hari) dan 75% gempabumi susulan terjadi dalam waktu 1.075,59 jam (45 hari). Berdasarkan nilai minimumnya, gempabumi susulan pertama terjadi 13 menit setelah gempabumi utama mengguncang.

Penentuan distribusi peluang dalam penelitian ini dilakukan melalui *graphical analysis*. Gambar 1 dan 2 masing-masing menampilkan *graphical analysis* keempat distribusi peluang yang diujikan terhadap data selisih waktu gempabumi susulan terhadap gempabumi utama Pidie Jaya dan Ambon.

Sumbu X dan Y pada Gambar 1 dan 2 untuk masing-masing distribusi peluang terlihat berbeda-beda mengikuti koordinat titik masing-masing distribusi peluang pada Tabel 2. Koefisien determinasi (*Adjusted R²*) dari *graphical analysis* keempat distribusi peluang terhadap data selisih

Gambar 1. *Graphical analysis* selisih waktu gempabumi susulan terhadap gempabumi utama Pidie Jaya.

Gambar 2. *Graphical analysis* selisih waktu gempabumi susulan terhadap gempabumi utama Ambon.

waktu terjadinya gempabumi susulan di Pidie Jaya dan Ambon terhadap masing-masing gempabumi utamanya ditampilkan pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4, diketahui bahwa distribusi peluang data gempabumi susulan Pidie Jaya yang memiliki nilai *adjusted R²* paling besar adalah distribusi lognormal, yaitu sebesar 0,9472 atau 94,72%. Sedangkan untuk gempabumi susulan di wilayah Ambon, diketahui bahwa distribusi *weibull* merupakan distribusi peluang yang memiliki nilai *Adjusted R²* terbesar yaitu 0,9334 atau 93,34%. Dengan demikian, analisis perilaku gempabumi susulan melalui tiga fungsi *lifetime analysis* akan dilakukan dengan menggunakan distribusi lognormal untuk wilayah Pidie Jaya dan dengan distribusi *weibull* untuk wilayah Ambon.

Distribusi lognormal dan *weibull* masing-masing memiliki dua buah parameter, yaitu μ' dan σ' untuk distribusi normal, dan β dan η untuk distribusi *weibull*. Nilai parameter distribusi peluang untuk kedua data diestimasi dengan menggunakan *rank regression* terhadap X dengan koordinat titik dan estimator pada Tabel 2. Hasil estimasi parameter dari kedua distribusi terpilih ditampilkan pada Tabel 5.

Nilai fungsi *PDF*, reliabilitas, dan *hazard* dapat digunakan untuk menjelaskan perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon dalam bentuk peluang dan laju terjadinya gempabumi susulan pada periode tertentu. Nilai ketiga fungsi dalam *lifetime analysis* tersebut dihitung berdasarkan distribusi peluang terpilih yang

Tabel 4. Koefisien determinasi (*adjusted R²*) dari *graphical analysis* keempat distribusi peluang

Wilayah	Distribusi Peluang			
	Normal	Lognormal	Eksponensial	Weibull
Pidie Jaya	0,7041	0,9472	0,8708	0,9451
Ambon	0,9004	0,8048	0,8108	0,9334

Tabel 5. Nilai parameter distribusi peluang data selisih waktu terjadinya gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon

Wilayah	Distribusi Terpilih	Parameter
Pidie Jaya	Lognormal	$\sigma' = 2,4637$ $\mu' = 3,8108$
Ambon	Weibull	$\hat{\beta} = 0,6583$ $\hat{\eta} = 566,0537$

telah dianalisis sebelumnya yaitu distribusi lognormal untuk data gempabumi susulan di wilayah Pidie Jaya dan distribusi weibull untuk data gempabumi susulan di wilayah Ambon. Nilai fungsi PDF, reliabilitas dan *hazard* untuk gempabumi susulan Pidie Jaya masing-masing dihitung dengan menggunakan Persamaan 4, 5 dan 6 dengan nilai parameter yang bersesuaian pada Tabel 5. Sedangkan nilai dari ketiga fungsi *lifetime analysis* untuk gempabumi susulan Ambon dihitung masing-masing dengan Persamaan 10 hingga 12 dengan nilai parameter yang bersesuaian pada Tabel 5. Hasil perhitungan ketiga fungsi tersebut pada waktu pengamatan tertentu ditampilkan pada Tabel 6. Waktu pengamatan yang dipilih pada penelitian ini adalah pada 23 jam pertama, 1 hingga 7 hari pertama, 2 dan 3 minggu pertama, serta 1 dan 2 bulan setelah terjadinya gempabumi utama pada masing-masing wilayah.

Perbandingan perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon dapat dilakukan dengan melihat perbandingan nilai ketiga fungsi *lifetime analysis* pada waktu-waktu tertentu yaitu pada 23 jam pertama, 1 hingga 7 hari pertama, 2 dan 3 minggu pertama, serta 1 dan 2 bulan setelah terjadinya gempabumi utama pada kedua wilayah. Data pada Tabel 6 selanjutnya divisualisasikan untuk mempermudah perbandingan perilaku gempabumi susulan pada kedua wilayah dan ditampilkan pada Gambar 3.

PDF menggambarkan peluang terjadinya gempabumi susulan pada waktu tertentu setelah gempabumi utamanya terjadi. Pada Gambar 3(a), dapat dilihat bahwa peluang terjadinya gempabumi susulan Pidie Jaya (kurva berwarna merah) menurun secara drastis mulai dari waktu

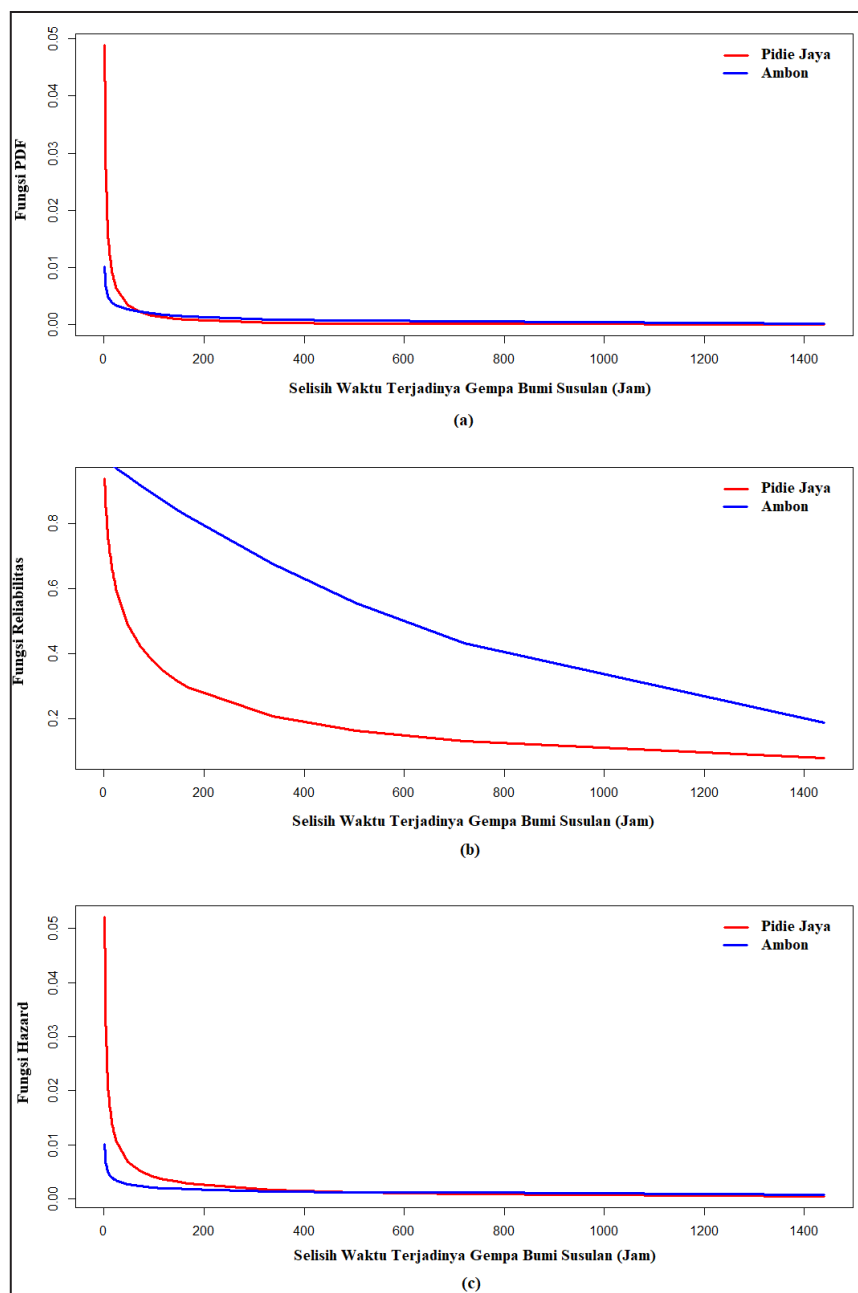
terjadinya gempabumi utama ($t \approx 0$ jam) hingga sekitar $t = 48$ jam atau 2 hari setelah gempabumi utama. Di sisi lain, nilai PDF untuk wilayah Ambon (kurva berwarna biru) juga menurun, tetapi dengan penurunan yang lebih lambat mulai dari waktu terjadinya gempabumi utama ($t \approx 0$ jam) hingga sekitar $t = 72$ jam (3 hari) berikutnya. Meskipun sama-sama mengalami penurunan nilai fungsi PDF diawal waktu pasca gempabumi utamanya, akan tetapi wilayah Pidie Jaya memiliki nilai PDF yang jauh lebih besar dari pada wilayah Ambon. Hal ini menunjukkan bahwa pada waktu awal setelah terjadinya gempabumi utama, potensi terjadinya gempabumi susulan di wilayah Pidie Jaya jauh lebih besar dari pada wilayah Ambon. Berdasarkan Gambar 3(a), terlihat bahwa peluang terjadinya gempabumi susulan pada 48 jam pertama pasca gempabumi utama di Pidie Jaya lebih tinggi dibandingkan di Ambon, tetapi laju penurunan nilai fungsi PDF Pidie Jaya yang lebih cepat menyebabkan terjadinya perpotongan antara kedua kurva pada sekitar 72 jam (3 hari) pasca gempabumi utamanya. Selanjutnya hingga pengamatan berakhir (2 bulan), wilayah Ambon telah memiliki peluang yang lebih besar akan terjadinya gempabumi susulan dibandingkan dengan wilayah Pidie Jaya. Secara umum dapat dikatakan bahwa peluang kejadian gempabumi susulan di wilayah Ambon cenderung lebih stabil sepanjang waktu pengamatan jika jika dibandingkan dengan wilayah Pidie Jaya. Hal ini dikarenakan jumlah kejadian gempabumi susulan Ambon yang lebih banyak cenderung tersebar lebih merata disepanjang waktu pengamatan jika dibandingkan dengan gempabumi susulan Pidie Jaya yang juga berjumlah lebih sedikit.

Tabel 6. Nilai PDF, reliabilitas, dan *hazard* gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon

Waktu Setelah Gempabumi Utama	PDF		Reliabilitas		Hazard	
	Pidie Jaya	Ambon	Pidie Jaya	Ambon	Pidie Jaya	Ambon
1 jam	0,0489	0,0101	0,9391	0,9988	0,0521	0,0101
2 jam	0,0363	0,0080	0,8972	0,9977	0,0405	0,0080
3 jam	0,0294	0,0069	0,8646	0,9965	0,0340	0,0070
4 jam	0,0249	0,0063	0,8375	0,9954	0,0298	0,0063
5 jam	0,0217	0,0058	0,8143	0,9942	0,0267	0,0059
6 jam	0,0193	0,0055	0,7938	0,9930	0,0243	0,0055
7 jam	0,0173	0,0052	0,7755	0,9919	0,0224	0,0052
8 jam	0,0158	0,0049	0,7590	0,9907	0,0208	0,0050
9 jam	0,0145	0,0047	0,7438	0,9896	0,0195	0,0048
10 jam	0,0134	0,0046	0,7299	0,9884	0,0184	0,0046
11 jam	0,0125	0,0044	0,7169	0,9873	0,0174	0,0045
12 jam	0,0117	0,0043	0,7048	0,9861	0,0166	0,0043
13 jam	0,0110	0,0042	0,6935	0,985	0,0158	0,0042
14 jam	0,0103	0,0041	0,6829	0,9839	0,0151	0,0041
15 jam	0,0098	0,0040	0,6728	0,9827	0,0145	0,0040
16 jam	0,0093	0,0039	0,6633	0,9816	0,0140	0,0039
17 jam	0,0088	0,0038	0,6543	0,9804	0,0135	0,0039
18 jam	0,0084	0,0037	0,6457	0,9793	0,0130	0,0038
19 jam	0,0080	0,0036	0,6375	0,9781	0,0126	0,0037
20 jam	0,0077	0,0036	0,6297	0,9770	0,0122	0,0036
21 jam	0,0073	0,0035	0,6222	0,9759	0,0118	0,0036
22 jam	0,0071	0,0034	0,6150	0,9747	0,0115	0,0035
23 jam	0,0068	0,0034	0,6081	0,9736	0,0112	0,0035
1 hari (24 jam)	0,0065	0,0033	0,6014	0,9725	0,0109	0,0034
2 hari (48 jam)	0,0034	0,0026	0,4902	0,9457	0,0069	0,0027
3 hari (72 jam)	0,0022	0,0022	0,4250	0,9197	0,0052	0,0024
4 hari (96 jam)	0,0016	0,0019	0,3799	0,8944	0,0042	0,0021
5 hari (120 jam)	0,0012	0,0017	0,3459	0,8698	0,0036	0,0020
6 hari (144 jam)	0,0010	0,0016	0,3190	0,8458	0,0032	0,0019
7 hari (168 jam)	0,0008	0,0014	0,2970	0,8226	0,0028	0,0018
2 minggu (336 jam)	0,0003	0,0009	0,2077	0,6766	0,0017	0,0014
3 minggu (504 jam)	0,0002	0,0007	0,1638	0,5565	0,0012	0,0012
1 bulan (720 jam)	0,0001	0,0005	0,1305	0,4329	0,0009	0,0012
2 bulan (1440 jam)	0,00004	0,0002	0,0800	0,1874	0,0005	0,0008

Dalam penelitian ini fungsi reliabilitas menyatakan peluang tidak terjadinya gempabumi susulan (masa aman) setelah waktu tertentu usai gempabumi utama terjadi. Berdasarkan

Gambar 3(b), diketahui bahwa nilai reliabilitas gempabumi susulan Pidie Jaya menurun secara eksponensial mulai dari waktu terjadinya gempabumi utama ($t \approx 0$ jam) hingga $t = 336$ jam (2



Gambar 3 Perbandingan perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon (a) berdasarkan fungsi PDF, (b) berdasarkan fungsi reliabilitas dan (c) berdasarkan fungsi *hazard*.

minggu) setelahnya. Nilai peluang reliabilitas yang menyatakan 50% gempabumi susulan sudah terjadi disebut sebagai median reliabilitas. Median reliabilitas menunjukkan posisi waktu ketika peluang reliabilitas tepat sebesar 0,5. Pada Gambar 3(b), peluang reliabilitas sebesar 0,5 berada pada waktu sekitar $t = 50$ jam (memasuki hari ketiga) setelah gempabumi utama. Dengan kata lain, dalam jangka waktu 3 hari

setelah gempabumi utama Pidie Jaya terjadi, 50% gempabumi susulan di wilayah tersebut sudah terjadi. Sementara itu, nilai reliabilitas gempabumi susulan Ambon terlihat menurun secara perlahan terhadap waktu. Hal itu menunjukkan bahwa setiap penambahan waktu, besarnya angka penurunan nilai reliabilitas yang terjadi tidak berbeda jauh. Nilai median reliabilitas berada pada waktu sekitar $t = 600$

jam (25 hari). Hal ini menunjukkan bahwa 50% gempabumi susulan sudah terjadi dalam jangka waktu 25 hari setelah gempabumi utama Ambon terjadi. Perbandingan kedua kurva reliabilitas pada Gambar 3(b) menunjukkan bahwa nilai reliabilitas gempabumi susulan Ambon berada jauh di atas Pidie Jaya pada semua waktu pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa peluang tidak terjadinya gempabumi susulan (masa aman) di wilayah Ambon lebih besar daripada wilayah Pidie Jaya pada semua waktu pengamatan tersebut. Selain itu, Gambar 3(b) juga menunjukkan bahwa secara umum nilai reliabilitas gempabumi susulan Ambon mengalami penurunan yang lebih lambat dari pada gempabumi susulan Pidie Jaya. Dengan demikian, gempabumi susulan Ambon cenderung terjadi dengan intensitas yang lebih merata sepanjang waktu pengamatan.

Fungsi *lifetime analysis* terakhir yang dibandingkan untuk melihat perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon adalah fungsi *hazard*. Fungsi *hazard* dalam penelitian ini menjelaskan laju kejadian gempabumi susulan pada waktu tertentu setelah gempabumi utama terjadi. Gambar 3(c) menunjukkan bahwa secara umum bentuk kurva fungsi *hazard* tidak berbeda jauh dengan bentuk kurva PDF pada Gambar 3(a). Nilai fungsi *hazard* gempabumi susulan Pidie Jaya menurun dengan sangat signifikan mulai dari waktu terjadinya gempabumi utama ($t \approx 0$ jam) hingga sekitar waktu $t = 168$ jam atau 7 hari setelahnya. Nilai fungsi *hazard* gempabumi susulan Ambon juga mengalami penurunan yang cukup signifikan mulai dari waktu terjadinya gempabumi utama ($t \approx 0$ jam) hingga sekitar $t = 96$ jam (4 hari) setelah gempabumi utamanya. Nilai fungsi *hazard* gempabumi susulan Pidie Jaya pada 24 jam pertama hingga akhir minggu ketiga terlihat lebih tinggi daripada Ambon. Hal ini menunjukkan bahwa Pidie Jaya memiliki

laju kejadian gempabumi susulan yang lebih tinggi selama periode tersebut dibandingkan dengan wilayah Ambon. Namun, memasuki jangka waktu 1 bulan setelah gempabumi utama terjadi hingga berakhirnya waktu pengamatan (2 bulan), laju kejadian gempabumi susulan di wilayah Ambon berbalik menjadi lebih tinggi daripada wilayah Pidie Jaya.

Selain dibandingkan secara visual melalui kurva PDF, reliabilitas dan *hazard*, perbandingan perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon juga dapat dilakukan melalui pengujian statistik. Uji *Log rank* dapat digunakan untuk menganalisis ada tidaknya perbedaan antara perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon melalui perbandingan kurva reliabilitasnya. Hasil pengujian *log rank* perbandingan kurva reliabilitas gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai statistik uji *log rank* adalah sebesar 54,2 dengan nilai tabel *chi-square* derajat bebas sebesar 1 adalah sebesar 3,84. Oleh karena nilai statistik uji lebih besar daripada nilai tabel *chi-square* dan juga memiliki *p-value* pengujian yang lebih kecil dari 0,05, maka hipotesis nol uji *log rank* pada penelitian ini dapat ditolak. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan kurva reliabilitas yang signifikan antara kejadian gempabumi susulan Pidie Jaya dan gempabumi susulan Ambon. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan antara perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya dan gempabumi susulan Ambon terutama melalui nilai fungsi reliabilitasnya.

Dari hasil analisa yang telah dilakukan terhadap nilai fungsi PDF, reliabilitas, dan *hazard* serta uji *log rank* tersebut, diketahui bahwa perilaku gempabumi susulan Pidie Jaya berbeda dengan perilaku gempabumi susulan Ambon. Berikut dua hal menarik dari hasil analisis mengenai

Tabel 7. Hasil pengujian *Log Rank* perbandingan kurva reliabilitas gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon

Variabel	Statistik uji	X ² tabel	p-value	Keputusan
Selisih Waktu Gempabumi Susulan terhadap Gempabumi Utama	54,2	3,84	<0,001	Tolak H ₀

perilaku gempabumi susulan di kedua wilayah tersebut. Pertama, gempabumi susulan Pidie Jaya berpeluang besar untuk terjadi selama 2 hari pertama setelah gempabumi utama dan kemudian menurun dengan cepat pada waktu berikutnya. Hal ini didukung oleh laporan kaji cepat Universitas Syiah Kuala yang dilakukan oleh Umar dr. (2016) terhadap gempabumi bermagnitudo 6,5 pada tanggal 7 Desember 2016 di wilayah Pidie Jaya tersebut. Laporan tersebut menyatakan bahwa frekuensi gempabumi susulan dengan magnitudo di atas 2,5 menunjukkan adanya pengurangan intensitas yang signifikan pada 2 hari pertama setelah gempabumi utamanya. Tim kaji cepat Universitas Syiah Kuala mencatat sebanyak 48 gempabumi susulan terjadi pada tanggal 7 Desember 2016 dan turun menjadi 17 kejadian gempabumi susulan pada hari berikutnya (8 Desember 2016). Jumlah gempabumi susulan setelah hari kedua semakin menurun dan hanya tercatat sebanyak 7 gempabumi susulan pada tanggal 11 Desember 2016. Selain itu, Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017) memperkirakan bahwa intensitas kejadian gempabumi susulan akan menurun drastis kurang lebih satu minggu setelah gempabumi utama Pidie Jaya terjadi. Meskipun demikian, gempabumi susulan masih akan terus terjadi setelah itu tetapi dengan intensitas dan kelajuan yang lebih rendah serta dengan interval waktu antar gempabumi susulan yang semakin jauh. Kejadian gempabumi termasuk gempabumi susulan juga berkaitan dengan tingkat seismisitas suatu wilayah. Secara umum, wilayah Provinsi Aceh memiliki tingkat seismisitas yang tinggi (Lusiani dr., 2018). Lebih lanjut, penelitian tersebut juga memperkirakan bahwa periode ulang terjadinya gempabumi di sekitar wilayah Pidie Jaya, Bireuen dan sebagian wilayah Aceh Utara dengan magnitudo 6 atau lebih adalah selama 20,6 tahun (Lusiani dr., 2018).

Kedua, meskipun jumlah gempabumi susulan Ambon jauh lebih banyak, tetapi intensitas kejadian gempabumi susulannya terlihat lebih merata disepanjang waktu pengamatan mulai dari hari pertama hingga 2 bulan setelah

gempabumi utamanya. Setengah dari jumlah gempabumi susulan Ambon terjadi dalam 600 jam atau 25 hari setelah gempabumi utamanya, sedangkan gempabumi susulan Pidie Jaya setengahnya sudah terjadi dalam jangka waktu yang jauh lebih singkat yaitu 50 jam (3 hari) setelah gempabumi utama. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Sianipar dr. (2019) yang mengungkapkan bahwa produktivitas gempabumi susulan dalam kasus gempabumi Ambon tahun 2019 tergolong cukup tinggi. Lebih lanjut, Sianipar dr. (2019) menyatakan bahwa fenomena ini disebabkan karena rendahnya nilai *stress drop* (perbedaan *stress* yang melintasi sesar sebelum dan sesudah gempabumi) yang dimiliki gempabumi utama di Ambon tersebut. Gempabumi dengan nilai *stress drop* yang rendah cenderung memproduksi gempabumi susulan yang lebih banyak (Wetzler dr., 2016). Selain itu, secara tektonik wilayah Ambon dan Maluku secara umum memiliki banyak patahan atau sesar yang merupakan sumber terjadinya gempabumi. Tingginya intensitas kejadian gempabumi termasuk gempabumi susulan di wilayah ini turut memengaruhi perkembangan peradaban penduduknya. Sebagai contoh, struktur bangunan di daerah rawan bencana gempabumi umumnya sudah didesain agar lebih tahan terhadap guncangan gempabumi. Selain itu, belajar dari pengalaman generasi-generasi sebelumnya, masyarakat yang tinggal di daerah rawan gempabumi pada umumnya lebih siap siaga dalam menghadapi ancaman bencana gempabumi yang mungkin terjadi. Penelitian Ririmasse (2014) mengemukakan bahwa bencana alam termasuk gempabumi telah menjadi fenomena yang melekat dan turut memengaruhi perkembangan peradaban budaya dan sejarah di Maluku. Menurut Natawidjaja (2015), memahami kejadian bencana alam pada masa lampau dan masyarakat yang terkena dampaknya merupakan salah satu aspek penting dalam pendidikan kebencanaan terutama yang berkaitan dengan upaya pengembangan kesiapsiagaan terhadap bencana serta kearifan lokal. Meskipun masih membutuhkan penelitian lebih lanjut, tetapi hal ini diduga menjadi salah

satu alasan minimnya korban jiwa yang ditimbulkan oleh bencana alam seperti gempabumi di wilayah Maluku. Penduduk di wilayah tersebut telah memiliki kesadaran diri yang tinggi dan kemampuan yang lebih baik dalam menghadapi ancaman bencana alam seperti gempabumi, berbeda halnya dengan penduduk di wilayah Pidie Jaya yang jarang mengalami bencana alam terutama gempabumi sehingga korban jiwa yang ditimbulkan menjadi lebih banyak.

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam upaya mitigasi bencana gempabumi di kedua wilayah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku gempabumi susulan di daerah Pidie Jaya menggambarkan adanya potensi yang besar untuk terjadi dalam waktu yang berdekatan dengan gempabumi utamanya. Sehingga masyarakat yang tinggal di daerah Pidie Jaya harus lebih waspada akan terjadinya gempabumi susulan dalam periode beberapa hari setelah gempabumi utama terjadi. Penduduk disarankan untuk mengungsi di lapangan terbuka dan menghindari untuk berada di dalam ruangan tertutup seperti rumah atau gedung dalam beberapa hari pertama setelah gempabumi utama terjadi. Hal ini perlu dilakukan untuk meminimalisir bertambahnya kerugian (korban jiwa maupun harta benda) yang diakibatkan oleh gempabumi susulan yang berpotensi besar terjadi dengan intensitas yang tinggi dalam jangka waktu tersebut. Selain itu, Pemerintah Daerah Kabupaten Pidie Jaya dan pihak terkait lainnya perlu segera memberikan respon yang cepat, misalnya dengan menyediakan tempat pengungsian yang representatif, logistik yang memadai, tenaga medis dan obat-obatan yang cukup serta keperluan lainnya dalam masa tanggap darurat bencana. Di sisi lain, perilaku gempabumi susulan di wilayah Ambon cenderung lebih terdistribusi secara merata dalam jarak waktu yang relatif lama dari gempabumi utamanya. Intensitas kejadian gempabumi susulan diperkirakan tidak akan terlalu signifikan pada hari-hari pertama setelah gempabumi utama terjadi, sehingga masyarakat dapat kembali ke rumah masing-masing jika gempabumi

utama tidak mengakibatkan kerusakan yang serius pada struktur bangunan rumah tersebut. Meskipun demikian, penduduk di daerah Ambon perlu menyadari bahwa gempabumi susulan sangat mungkin terjadi pada waktu yang relatif lama setelah terjadinya gempabumi utama di daerah tersebut. Intensitas kejadian gempabumi susulan yang lebih merata di sepanjang waktu tersebut membuat masyarakat di daerah Ambon dan Maluku harus lebih siap dalam menghadapi bencana gempabumi susulan pada saat beraktivitas sehari-hari. Oleh karena itu, Pemerintah Kota Ambon perlu secara konsisten melakukan upaya edukasi sejak dini kepada seluruh lapisan masyarakat terutama generasi muda yang ada di sana terkait dengan pendidikan kebencanaan dan upaya mitigasi bencana gempabumi di daerah tersebut.

Beberapa keterbatasan penelitian yang dapat dikemukakan diantaranya terkait dengan distribusi peluang teoritis yang digunakan. Penelitian ini hanya menggunakan empat macam distribusi peluang yang paling sering diaplikasikan dalam *lifetime analysis*. Secara teoritis, terdapat beberapa distribusi peluang lainnya yang dapat digunakan seperti distribusi gamma, logistik dan lainnya. Keterbatasan lainnya berkaitan dengan data yang digunakan. Penelitian ini membatasi waktu pengamatan gempabumi susulan dalam jangka dua bulan setelah gempabumi utama terjadi. Gempabumi susulan masih berpotensi terjadi dalam jangka waktu yang lebih lama meskipun dengan intensitas dan kekuatan yang cenderung semakin mengecil.

KESIMPULAN

Analisis perbandingan perilaku gempabumi susulan dengan metode *lifetime analysis* sangat bergantung pada distribusi peluang yang cocok dengan data penelitian. Data selisih waktu terjadinya gempabumi susulan terhadap gempabumi utama Pidie Jaya mengikuti distribusi lognormal dan data selisih waktu gempabumi susulan terhadap gempabumi utama Ambon mengikuti distribusi weibull. Berdasarkan nilai

fungsi *lifetime analysis*, gempabumi susulan Pidie Jaya berpeluang besar untuk terjadi dengan intensitas yang tinggi pada 2 hari pertama pasca kejadian gempabumi utama, sedangkan gempabumi susulan Ambon cenderung lebih merata sepanjang waktu pengamatan. Berdasarkan nilai median reliabilitasnya, 50% gempabumi susulan Pidie Jaya terjadi dalam waktu 3 hari pasca gempabumi utamanya, sedangkan 50% gempa susulan Ambon terjadi dalam waktu 25 hari pasca gempabumi utama. Perbedaan tersebut didukung oleh hasil pengujian *log rank* yang membuktikan adanya perbedaan kurva reliabilitas yang signifikan antara kejadian gempabumi susulan Pidie Jaya dan Ambon. Dengan demikian, meskipun kedua wilayah mengalami gempabumi utama dengan karakteristik (magnitudo dan kedalaman) yang sama, tetapi perilaku gempabumi susulan keduanya berbeda. Pemerintah Kabupaten Pidie Jaya perlu segera memberikan respon yang cepat misalnya dengan menyediakan tempat pengungsian, logistik dan obat-obatan segera setelah gempabumi utama terjadi. Masyarakat disarankan untuk segera melakukan pengungsian ke lapangan terbuka mengingat kejadian gempabumi susulan dalam beberapa hari pertama sangat mungkin terjadi dengan intensitas yang tinggi. Di sisi lain, Pemerintah Kota Ambon perlu secara konsisten melakukan upaya edukasi sedini mungkin mengenai pendidikan kebencanaan dan mitigasi bencana gempabumi kepada seluruh masyarakat terutama generasi muda karena gempabumi susulan di daerah tersebut berpotensi terjadi dalam jarak waktu yang relatif lama setelah gempabumi utama terjadi. Masyarakat perlu selalu waspada dalam menjalani aktivitas sehari-hari mengingat gempabumi susulan di wilayah tersebut terdistribusi secara merata dalam periode waktu yang relatif lama sejak gempabumi utama terjadi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) atas akses

data historis kejadian gempabumi di wilayah Pidie Jaya (7 Desember 2016) dan Ambon (26 September 2019).

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, S. 2019. Mengukur Peluang Kejadian Gempabumi dengan Lompatan Magnitudo di Wilayah Pulau Sumatera. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 10(3), 159–170. DOI: 0.34126/JLBG.V10I3.263.
- Anwar, S. 2022. Earthquake behavior in Sumatra territory based on time and distance between consecutive large event. In *The 13th of Aceh International Workshop and Expo on Sustainable Tsunami Disaster Recovery (The 13th AIWEST-DR 2021)* (Vol. 340, p. 01010). Banda Aceh: EDP Sciences. DOI: 10.1051/E3SCONF/202234001010.
- González, Á., Gómez, J. B., & Pacheco, A. F. 2006. Updating seismic hazard at Parkfield. *Journal of Seismology*, 10(2), 131–135. DOI: 10.1007/s10950-005-9005-8
- Handayani, L., Permana, H., & Gaffar, E. Z. 2012. Segmentasi tektonik aktif pada Lempeang Mikro Sumatra Bagian Utara (Aceh) ditinjau dari sebaran episenter gempabumi. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 3(2), 71–77.
- Kementerian PUPR. 2019. *Laporan Tanggap Darurat Bencana Gempabumi Ambon Provinsi Maluku*. Ambon. Retrieved from https://eppid.pu.go.id/assets/common/pdf/info_publik-20191001110447.pdf
- Kleinbaum, D. G., & Klein, M. 2012. *Survival analysis : a self-learning text* (3rd ed.). Springer Science Business Media, Inc, New York.
- Lusiani, E., Anwar, S., & Nugraha, M. F. 2018. Penentuan Tingkat Seismisitas Wilayah Propinsi Aceh Dengan Metode Gutenberg Richter (Nilai A dan Nilai B). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 19(2), 71–79.
- Natawidjaja, D. H. 2002. *Neotectonics of the Sumatran Fault and Paleogeodesy of the Sumatran Subduction Zone*. Doctoral dis-

- sertation. California Institute of Technology Pasadena, California, USA.
- Natawidjaja, D. H. 2015. Siklus Mega-Tsunami di Wilayah Aceh-Andaman dalam Konteks Sejarah. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, 25(1), 49–62. DOI: 10.14203/risetgeotam2015.v25.107
- Pasau, G., & Tanauma, A. (2011). Pemodelan Sumber Gempa di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempabumi. *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(2), 202–209.
- Putri, E., Pujiastuti, D., & Kurniawati, I. 2016. Analisis Karakteristik Prakiraan Berakhirnya Gempa Susulan pada Segmen Aceh dan Segmen Sianok (Studi Kasus Gempa 2 Juli 2013 dan 11 September 2014). *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 73–77.
- ReliaSoft. 2015. *Life Data Analysis Reference*. Arizona, ReliaSoft Corporation.
- Ririmasse, M. 2014. Bencana Masa Lalu di Kepulauan Maluku: Pengetahuan dan Pengembangan Bagi Studi Arkeologi. *AMERTA, Jurnal Penelitian dan Pengembangan Arkeologi*, 32(2), 93–109. DOI: 10.24832/AMT.V32I2.168
- Sianipar, D., Daryono, Halauwet, Y., & Karnawati, D. 2019. Studi Sumber Gempa Ambon 26 September 2019 Mw 6,5. *Jurnal Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, 1(2), 1–20.
- Supartoyo, S. 2015. Gempabumi Laut Maluku Tanggal 15 November 2014. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 6(1), 45–58.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *Kajian Gempa Pidie Jaya Provinsi Aceh Indonesia 7 Desember 2016 (M6.5)*. Pusat Penelitian dan pengembangan Perumahan dan Pemukiman Kementerian PUPR, Bandung.
- Umar, M., Irwandi, Munadi, K., Meilianda, E., Idris, Y., Rusydy, I., Fachrurrazi. 2016. *Kaji Cepat Universitas Syiah Kuala Terhadap Gempabumi 6,5 Mw Tanggal 7 Desember 2016 di Sekitar Pidie Jaya-Aceh*. Meureudu.
- Wetzler, N., Brodsky, E. E., & Lay, T. 2016. Regional and Stress Drop Effects on Aftershock Productivity of Large Megathrust Earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 43(23), 12–20. DOI: 10.1002/2016GL071104
- Zacks, S. 1992. *Introduction to Reliability Analysis: Probability Models and Statistical Methods*. New York: Springer-Verlag.