

ANALISIS PELURUHAN GEMPA BUMI SUSULAN DI AMBON TAHUN 2019 DENGAN PENDEKATAN STATISTIK MENGGUNAKAN SOFTWARE PELURUHAN V2.0

¹⁾ Vivi Nur Islamiati, ²⁾Supardiyono, ³⁾Yusuf Hadi Perdana, ⁴⁾Akbar Rian Setyahagi

¹⁾ Mahasiswa Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: viviislamiati16030224022@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Dosen Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: supardiyono@unesa.ac.id

³⁾ Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Jakarta, email: yusufhadiperdana@gmail.com

⁴⁾ Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Nganjuk, email: akbar.setyahagi@bmgk.go.id

Abstrak

Telah dilakukan penelitian peluruhan gempa bumi susulan di Ambon, 25 September 2019 (M_w 6,6) dengan pendekatan metode statistik menggunakan *software* Peluruhan v2.0. Kasus ini memiliki produktivitas gempa susulan yang cukup tinggi dibandingkan dengan gempa bumi Banten dan Lombok. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik peluruhan gempa susulan menggunakan metode Mogi I, Mogi II, Omori, dan Utsu serta menentukan metode statistik yang lebih mendekati data *real* dari BMKG untuk mengetahui waktu peluruhan gempa susulan. Analisis peluruhan gempa susulan tersebut digunakan sebagai upaya mitigasi bencana kepada masyarakat berupa informasi prakiraan gempa susulan akan berakhir. Prosedur yang dilakukan yaitu dengan mengambil data pada laman Repogempa kemudian menganalisisnya dengan pendekatan metode statistik menggunakan *software* Peluruhan v2.0. Data yang diperoleh dari *software* kemudian dibandingkan dengan rekaman data *real time* berakhirnya gempa susulan milik BMKG sehingga diperoleh hasil prakiraan peluruhan gempa susulan paling *reliable*. Hasil yang didapatkan adalah keempat metode statistik menunjukkan hasil peluruhan gempa bumi susulan yang berbeda akibat perbedaan rentang waktu pada masing-masing persamaan metode statistik. Metode yang menghasilkan analisis waktu peluruhan gempa susulan paling mendekati rekaman data *real time* berakhirnya gempa susulan BMKG adalah metode Mogi II yang menunjukkan bahwa peluruhan gempa susulan berakhir Tanggal 20 April 2020 pada hari ke 208 *pasca* gempa bumi utama dengan koefisien korelasi sebesar -0,81. Tanda negatif menunjukkan bahwa korelasi antara variabel x (waktu terjadinya gempa) dan y (frekuensi gempa susulan yang terjadi) yang telah dilinierisasi adalah berbanding terbalik. Perbandingan nilai koefisien korelasi antar metode statistik tidak berpengaruh dalam penentuan kesesuaian hasil analisis waktu peluruhan gempa bumi susulan.

Kata Kunci: peluruhan gempa bumi susulan, Mogi, Omori, Utsu, regresi linier, korelasi.

Abstract

Aftershock decay research in Ambon, September 25, 2019 (M_w 6.6) has been carried out with a statistical method approach using the Peluruhan v2.0 software. This case has a quite high aftershock productivity compared to the Banten and Lombok earthquakes. These study aims are to analyze the characteristics of aftershock decay using the Mogi I, Mogi II, Omori, and Utsu methods; and determine a method that is closer to real data from BMKG and determine the time of aftershock decay. Analysis of the aftershock decay used as an effort to mitigate disasters to society by information about the forecast aftershocks. The procedure was done by taking data on the Repogempa page and analyzing it with a statistical method approach using Peluruhan v2.0 software. Data from the software is compared with real-time data recording of the end of the aftershock by BMKG so that the most reliable aftershock decay forecast results are known. The results of this study are each method show different aftershock decay results due to different time ranges in each statistical method equation. Methods that have aftershock decay time closest to the real-time data recording of the end of the aftershock BMKG is the Mogi II method that shows the aftershock decay ended on April 20, 2020, on the 208th day after the main earthquake with a correlation coefficient of -0.81. The negative sign indicates that the correlation between variable x (time of earthquake) and y (frequency of aftershocks that occur) that has linearized is inversely proportional. A comparison of correlation coefficient values between statistical methods does not affect in determining the analysis of the aftershock decay time.

Keywords: aftershock decay, Mogi, Omori, Utsu, linier regression, correlations

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah yang memiliki aktivitas kegempaan (seismisitas) tinggi yang ditandai dengan terjadinya 40.000 kali gempa bumi bermagnitudo M_w 1,4-8,5 selama Tahun 2009-2016 (Tim PuSGeN, 2017). Seismisitas yang tinggi ini disebabkan karena

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar dan satu lempeng tektonik kecil, yaitu lempeng tektonik Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik serta lempeng kecil Filipina (Sunarjo dkk, 2012).

Interaksi antara tiga lempeng besar yaitu lempeng Eurasia di sebelah barat, lempeng Indo-Australia di sebelah selatan, lempeng Pasifik di sebelah timur dan

lempeng mikro Mindanao di bagian utara menyebabkan Maluku menjadi wilayah dengan kondisi tektonik yang kompleks (Tim PuSGeN, 2017). Salah satu wilayah yang memiliki kondisi tektonik cukup kompleks di Maluku dan sekitarnya adalah Busur Banda dengan kelengkungan 180°. Jannah, dkk (2016) menyatakan bahwa kelengkungan tersebut terbentuk akibat dari hasil konvergensi lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik dengan beberapa lempeng mikro.

Susunan tektonik Busur Banda mencakup wilayah Buru, Ambon, Seram, Laut Banda dan beberapa wilayah lain (Hill K.C, 2012). Jannah, dkk (2016) juga menyatakan pada bagian selatan Busur Banda terdapat palung Timor dan di sebelah utara terdapat palung Seram. Kedua palung tersebut melingkar membentuk setengah lingkaran mulai dari selatan Pulau Timor sampai Tanimbar, dan kemudian berbelok ke atas di sebelah timur pulau Seram dan Buru. Pada tanggal 26 September 2019 pukul 06:46 WIB gempa bumi bermagnitudo M_w 6,6 terjadi di Ambon dan mengakibatkan adanya korban jiwa serta kerusakan infrastruktur. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) stasiun Ambon pada 14 Oktober 2019 pukul 09.00 WIT mencatat bahwa telah terjadi gempa susulan sebanyak 1.516 kali di Ambon sejak tanggal terjadinya gempa bumi utama (Sianipar dkk, 2019). Gempa bumi susulan (*aftershock*) merupakan hasil sisa pelepasan energi dari gempa bumi utama (*mainshock*) yang terjadi di wilayah yang sama dengan lokasi gempa bumi utama namun besar magnitudonya bernilai lebih kecil (Putri dkk, 2016; Mogi, 1967).

Produktivitas gempa-gempa susulan dalam kasus gempa Ambon 2019 tergolong cukup tinggi dibandingkan dengan gempa susulan yang terjadi di Banten dan Lombok Tahun 2018. Data yang diperoleh dari laman Repogempa (<http://repogempa.bmkg.go.id/query.php>) menyatakan bahwa gempa susulan terjadi sebanyak 54 kali pada kasus gempa Banten 2018, sedangkan pada kasus gempa Lombok 2018, gempa susulan terjadi sebanyak 914 kali. Tingginya produktivitas gempa susulan Ambon menjadikan wilayah ini merupakan wilayah yang sesuai untuk dijadikan studi kasus dalam penelitian penentuan peluruhan gempa bumi susulan.

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB, 2018) menyatakan bahwa penentuan peluruhan gempa bumi susulan ini dapat digunakan sebagai upaya mitigasi bencana yang menginformasikan mengenai prakiraan berakhirnya waktu gempa bumi susulan di Ambon menggunakan perhitungan metode statistik yang hasil prakiraannya paling mendekati data *real* pantauan BMKG sehingga masyarakat tetap waspada dan sementara waktu tidak kembali ke wilayah bencana terjadinya gempa bumi. Metoda yang menghasilkan prakiraan waktu peluruhan gempa susulan paling mendekati data *real* pantauan BMKG dapat digunakan kembali untuk menganalisis prakiraan peluruhan gempa susulan jika terjadi gempa bumi baru di wilayah yang sama.

Vellicia, dkk (2019) menyatakan bahwa prakiraan waktu berakhirnya gempa bumi susulan (peluruhan gempa bumi susulan) dapat ditentukan dengan beberapa

pendekatan metode statistik, yaitu Mogi I, Mogi II, Omori dan Utsu.

Persamaan Model Omori

Omori (1894) menyatakan bahwa tingkat aktivitas gempa bumi susulan dalam hubungan antara frekuensi dan waktu dinyatakan sebagai persamaan fungsi eksponensial berikut.

$$n(t) = \frac{a}{t+b} \quad (1)$$

Omori (1894) kemudian menlinierisasikan Persamaan (1) untuk mempermudah perhitungan dan analisa menjadi persamaan sebagai berikut.

$$\frac{1}{n(t)} = \frac{b}{a} + \frac{1}{a} t \quad (2)$$

keterangan :

$n(t)$ = jumlah gempa susulan n yang diukur dalam selang waktu t , gempa susulan dinyatakan berakhir jika jumlah gempa atau $n(t) = 1$.

t = waktu kejadian gempa susulan

a dan b = konstanta dimana nilai a menunjukkan intersep, b menunjukkan gradien.

Persamaan Model Mogi I

Mogi (1962) menyatakan bahwa frekuensi kejadian gempa bumi yang lebih dari 100 hari dalam medium elastik di bawah beban konstan dapat dirumuskan dalam hubungan eksponensial persamaan Mogi I sebagai berikut.

$$n(t) = a \cdot t^{-b} \quad (3)$$

Mogi (1962) kemudian menlinierisasikan Persamaan (3) untuk mempermudah perhitungan dan analisa menjadi bentuk logaritma sebagai berikut.

$$\log n(t) = \log a - b \log t \quad (4)$$

keterangan :

$n(t)$ = jumlah gempa susulan n yang diukur dalam selang waktu t , gempa susulan dinyatakan berakhir jika jumlah gempa atau $n(t) = 1$.

t = waktu kejadian gempa susulan

a dan b = konstanta dimana nilai a menunjukkan intersep, b menunjukkan gradient.

Persamaan Model Mogi II

Mogi (1962) juga merumuskan hubungan antara frekuensi dan waktu dalam eksponensial persamaan Mogi II sebagai berikut untuk gempa bumi susulan yang terjadi kurang dari 100 hari.

$$n(t) = a \cdot e^{-bt} \quad (5)$$

Mogi (1962) kemudian menlinierisasikan Persamaan (5) untuk mempermudah perhitungan dan analisa ke dalam bentuk persamaan logaritma natural (ln) sebagai berikut.

$$\ln n(t) = \ln a - bt \quad (6)$$

keterangan :

$n(t)$ = jumlah gempa susulan n yang diukur dalam selang waktu t , gempa susulan

dinyatakan berakhir jika jumlah gempa atau $n(t) = 1$.

- t = waktu kejadian gempa susulan.
 a dan b = konstanta dimana nilai a menunjukkan intersep, b menunjukkan gradient.

Persamaan Model Utsu

Utsu (1957) juga menghitung gempa susulan yang terjadi dengan interval kurang dari 100 hari. Utsu (1957) menyatakan tingkat aktivitas gempa bumi susulan tersebut dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.

$$n(t) = \frac{a}{(t+c)^b} \quad (7)$$

keterangan :

- $n(t)$ = jumlah gempa susulan n yang diukur dalam selang waktu t , gempa susulan dinyatakan berakhir jika jumlah gempa atau $n(t) = 1$.
 t = waktu kejadian gempa susulan
 a, b dan c = konstanta dimana nilai a menunjukkan intersep, b menunjukkan gradient, dan umumnya nilai c yang digunakan adalah 0,01.

Utsu (1957) kemudian menlinierisasikan Persamaan (7) untuk mempermudah perhitungan dan analisa menjadi bentuk logaritma sebagai berikut

$$\log n(t) = \log a - b \log(t + 0,01) \quad (8)$$

Metode Kuadrat Terkecil (*Least Square*)

Keempat persamaan metode statistik yaitu metode Mogi I, Mogi II, Omori, dan Utsu menunjukkan adanya korelasi antara jumlah (frekuensi) gempa bumi susulan sebagai variabel terikat (y) dan waktu terjadinya gempa bumi susulan sebagai variabel bebas (x). Abadyo & Permadi (2005) menyatakan bahwa nilai *error* pada hubungan linier antara variabel bebas dan variabel terikat ini dapat diminimumkan menggunakan metode kuadrat terkecil (*Least Square*). Supriyanto (2007) menjelaskan bahwa hubungan linier tersebut dinyatakan dalam persamaan regresi linier sebagai berikut.

$$y = A + Bx \quad (9)$$

keterangan :

- y = variabel terikat.
 x = variabel bebas.
 A dan B = konstanta regresi linier.

Supriyanto (2007) juga menjelaskan bahwa rumus regresi kuadrat terkecil (*least square*) untuk menghitung nilai A dan B dari kumpulan data x dan y adalah sebagai berikut.

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m x_i y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (10)$$

$$B = \frac{m \sum_{i=1}^m x_i y_i - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (11)$$

keterangan :

- x_i = variabel bebas urutan ke i .
 y_i = variabel terikat urutan ke i .
 m = jumlah data.

Abadyo dan Permadi (2005) menyatakan untuk meninjau seberapa kuat hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat, digunakan koefisien korelasi yang dirumuskan sebagai berikut.

$$r_{xy} = \frac{m \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{(m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}} \quad (12)$$

Sugiyono (2007) menyatakan bahwa indeks kekuatan hubungan antara kedua variabel dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Indeks kekuatan hubungan antara kedua variabel penelitian berdasarkan nilai r_{xy} hasil uji korelasinya.

Nilai r_{xy}	Interpretasi	Nilai r_{xy}	Interpretasi
0,00 - 0,19	Sangat rendah	0,00 - (-0,19)	Sangat rendah
0,20 - 0,39	Rendah	(-0,20) - (-0,39)	Rendah
0,40 - 0,59	Sedang	(-0,40) - (-0,59)	Sedang
0,60 - 0,79	Kuat	(-0,60) - (-0,79)	Kuat
0,80 - 1,00	Sangat kuat	(-0,80) - (-1,00)	Sangat kuat

Sugiyono (2007) menjelaskan bahwa tanda positif dan negatif pada indeks kekuatan korelasi antara kedua variabel (Lihat Tabel 1) menunjukkan arah korelasi. Tanda positif menunjukkan bahwa arah hubungan kedua variabel adalah berbanding lurus sedangkan tanda negatif menunjukkan bahwa arah hubungan kedua variabel adalah berbanding terbalik. Hubungan antara dua variabel disebut berbanding lurus jika nilai satu variabel meningkat, maka akan meningkatkan nilai variabel lain. Sebaliknya, hubungannya berbanding terbalik berlaku jika nilai satu variabel meningkat, maka akan menurunkan nilai variabel lainnya.

Rohmawati (2018) menyatakan bahwa setiap wilayah di Indonesia memiliki kecocokan metode analisis waktu peluruhan gempa bumi yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jenis batuan di setiap wilayah yang mempengaruhi lama waktu berakhirnya aktivitas (distribusi frekuensi) gempa bumi susulan. Putri, dkk (2016) menyatakan bahwa metode statistik untuk analisis peluruhan gempa bumi susulan yang sesuai di Segmen Aceh dan Segmen Sianok adalah Mogi II. Salsabil, dkk (2019) menyatakan bahwa metode statistik untuk analisis peluruhan gempa bumi susulan yang sesuai di Banten adalah metode Omori, Vellicia, dkk (2019) menyatakan bahwa metode statistik untuk analisis peluruhan gempa bumi susulan yang sesuai di Lombok adalah metode Mogi I dan Utsu, Zohrah & Reza (2007) menyatakan bahwa metode statistik untuk analisis peluruhan gempa bumi susulan yang sesuai di dataran tinggi Iran adalah metode Omori. Dari kelima penelitian terdahulu yang telah disebutkan di atas, belum dilakukan penelitian yang menganalisis metode manakah yang lebih sesuai (mendekati data *real* berakhirnya gempa bumi susulan berdasarkan pantauan BMKG) untuk gempa bumi Ambon dan sekitarnya pada Tahun 2019.

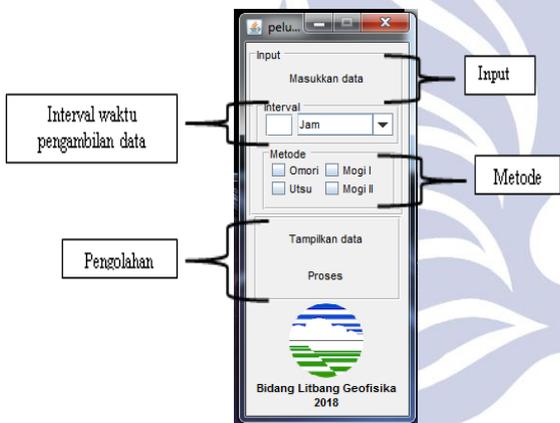
Berdasarkan "*Manual Peluruhan v2.0*" yang dipublikasikan di <http://puslitbang.bmkg.go.id/geofisika/>

[software/peluruhan_v2.0/manual%20Peluruhan%20v%202.pdf](#) oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (PUSLITBANG BMKG), penentuan metode manakah yang lebih sesuai untuk peluruhan gempa bumi susulan khususnya pada kasus gempa Ambon dapat dilakukan menggunakan bantuan *software* Peluruhan v2.0.

Software Peluruhan v2.0

Software Peluruhan v2.0 merupakan *software* yang dibuat oleh PUSLITBANG BMKG pada Tahun 2018. *Software* ini mulai digunakan pada awal Tahun 2019 untuk memprakirakan waktu berakhirnya gempa bumi susulan (peluruhan gempa bumi susulan) menggunakan metode Omori, Mogi I, Mogi II, dan Utsu. Belum ada publikasi ilmiah mengenai penelitian analisis peluruhan gempa bumi susulan menggunakan *software* tersebut. Dalam penelitian ini, peneliti sebagai mahasiswa S1 Fisika, Universitas Negeri Surabaya menjalin kerja sama penelitian dengan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) untuk menganalisis waktu peluruhan gempa bumi susulan di Ambon sehingga dapat mendapatkan izin untuk mengakses *software* tersebut.

Program peluruhan terdiri dari beberapa bagian yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Bagian-bagian dari program Peluruhan v2.0 Tahun 2018.

Berdasarkan gambar di atas, fungsi dari setiap bagian program Peluruhan v2.0 adalah sebagai berikut:

- Bagian input terdiri dari menu “masukkan data” yang berfungsi untuk memasukkan data *origin time* gempa bumi susulan yang telah disimpan dalam ekstensi .txt.
- Bagian interval waktu pengambilan data berfungsi untuk mengelompokkan data gempa berdasarkan interval waktu yang ditentukan. Interval waktu dalam bagian ini disajikan dalam dua format yaitu jam dan hari.
- Bagian metode berfungsi untuk memilih metode yang akan digunakan dalam penelitian untuk menganalisis data gempa susulan. Metode yang digunakan dalam *software* Peluruhan v2.0 terdiri atas empat metode yaitu Mogi I, Mogi II, Omori dan Utsu.
- Bagian pengolahan terdiri dari dua menu yaitu :

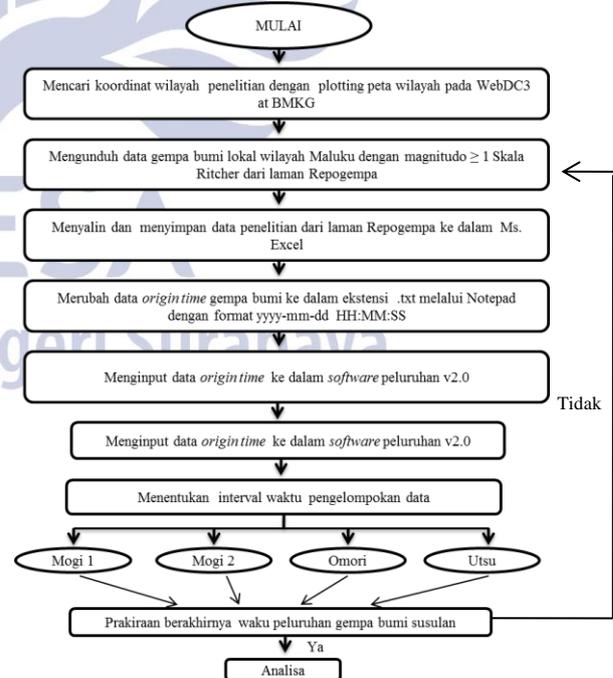
- Tampilkan data : untuk menampilkan data histogram frekuensi gempa peluruhan.
- Proses : untuk memproses data

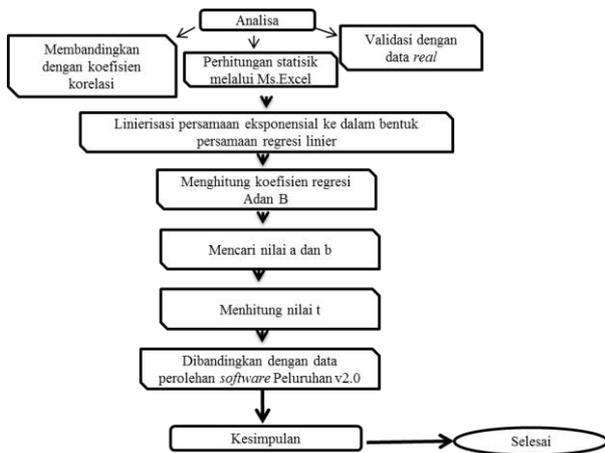
Dengan memperhatikan sistematika pendahuluan, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik peluruhan gempa bumi susulan di Ambon menggunakan metode Mogi I, Mogi II, Omori, dan Utsu. Kemudian peneliti juga menentukan metode yang lebih sesuai (mendekati rekaman data *real time* berakhirnya gempa susulan berdasarkan pantauan BMKG) untuk mengetahui waktu peluruhan gempa bumi susulan di Ambon.

METODE

Penelitian yang dilakukan adalah penelitian berbasis komputasi dengan pendekatan statistik menggunakan bantuan *software* Peluruhan v2.0. Penelitian berbasis komputasi merupakan penelitian yang dilakukan dengan mengolah data sesuai variabel yang dibutuhkan oleh program yang digunakan. Penelitian ini merupakan penelitian yang menggunakan data sekunder berupa data gempa bumi yang diperoleh dari aplikasi *repository* milik Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yaitu Repogempa. Data diperoleh dari kasus gempa bumi Ambon Tanggal 25 September –31 Desember Tahun 2019 berdasarkan zona waktu *Universal Time Coordinated* (UTC) dengan magnitudo $\geq M_w$ 1 sampai M_w 9,5 dan kedalaman ≤ 1000 km. Data yang diperoleh berupa *origin time*, *latitude type*, *longitude*, *depth*, *magnitude*, dan *region* yang berasal dari gempa Ambon dan sekitarnya dengan batasan wilayah sebesar 2.21-5.35°LS, 125.28-132.12°BT.

A. Rancangan Penelitian





Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

B. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan memanipulasi model atau metode statistik yang terdiri dari metode Mogi I, Mogi II, Omori dan Utsu. Interval waktu pengambilan data dikontrol setiap 5 hari. Jumlah data gempa bumi susulan yang digunakan dibatasi sebanyak 932 gempa bumi di Ambon dan sekitarnya Tahun 2019. Hasil yang diperoleh dari memanipulasi model atau metode statistik adalah waktu terjadinya gempa susulan masing-masing metode statistik saat nilai $n(t)=1$ (gempa susulan dianggap berakhir ketika nilai $n(t)=1$).

C. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian berupa data sekunder gempa bumi Ambon, 25 September Tahun 2019 (M_w 6,6) yang diakses melalui Repogempa BMKG pada laman <http://repogempa.bmkg.go.id/query.php>. Data diperoleh dengan memasukkan beberapa komponen *Origin format* yaitu *geographic rectangular area* (koordinat wilayah geografis), *date* (tanggal gempa bumi), *magnitude* (magnitude), dan *depth* (kedalaman gempa bumi). Koordinat wilayah geografis penelitian dapat ditentukan dengan cara mengplot peta wilayah yang akan diteliti dengan mengakes WebDC3 at BMKG pada laman <http://202.90.198.100/webdc3/>. Repogempa hanya mampu mengakses data gempa dengan interval waktu yang diinput maksimal sebanyak 20 hari sehingga pengambilan

data perlu dilakukan secara bertahap. Data yang didapatkan dari Repogempa berupa parameter gempa bumi yang terdiri dari *origin time*, *latitude type*, *longitude*, *depth*, *magnitude*, dan *region*.

D. Teknik Pengolahan Data

Data *origin time* gempa bumi yang telah dirubah menjadi ekstensi .dat atau .txt dengan format yyyy-mm-dd HH:MM:SS kemudian di *input* ke dalam *software* Peluruhan v2.0. Kemudian mengatur interval waktu pengelompokan data, dan memilih metode yang akan digunakan dalam penelitian. Data yang diolah akan menghasilkan waktu peluruhan gempa susulan, grafik hubungan antara frekuensi gempa susulan dengan waktu dari masing masing metode statistik serta besar nilai koefisien korelasi yang menyatakan seberapa kuat hubungan antara variable x dan y yang telah dilinierisasi.

Hasil waktu peluruhan gempa bumi susulan yang diperoleh dari *software* Peluruhan v2.0 akan dibandingkan akurasi dengan perhitungan statistik waktu peluruhan gempa susulan menggunakan Ms.Excel serta data *real* milik Repogempa BMKG. Perhitungan statistik waktu peluruhan gempa susulan yang diolah menggunakan Ms.Excel diperoleh dengan menghitung koefisien regresi linier A dan B, koefisien a dan b, serta nilai t masing-masing metode statistic yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

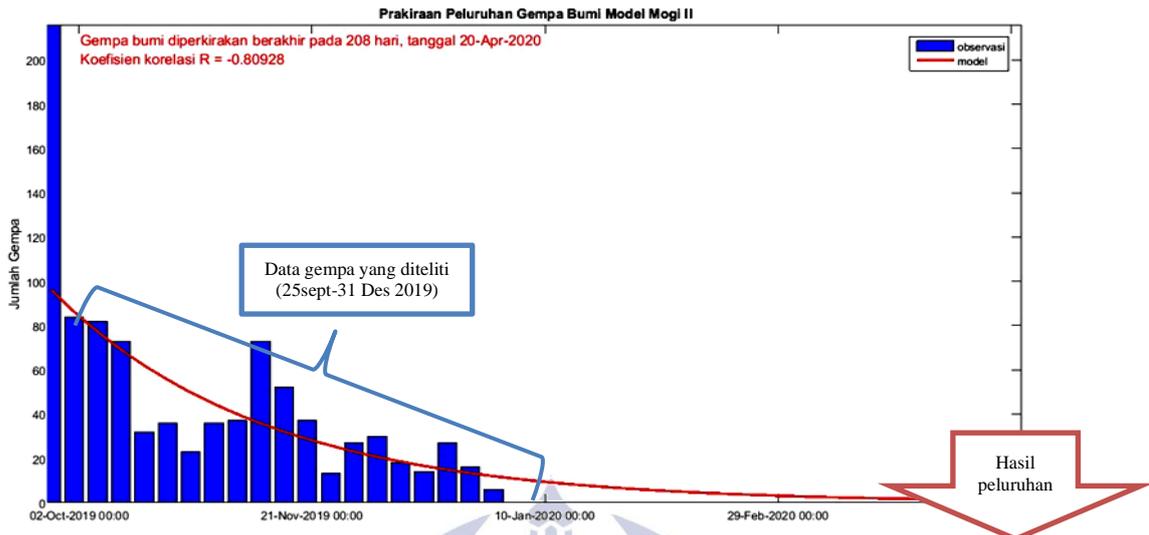
Hasil perbandingan karakteristik peluruhan gempa bumi susulan dari keempat metode statistik yang digunakan yaitu metode Mogi I, Mogi II, Omori, dan Utsu menghasilkan analisis metode yang paling sesuai untuk digunakan memprakirakan waktu peluruhan gempa bumi susulan Ambon 2019. Berikut hasil penelitian dan pembahasan terkait.

Karakteristik Peluruhan Gempa Bumi Susulan di Ambon berdasarkan Keempat Metode Statistik

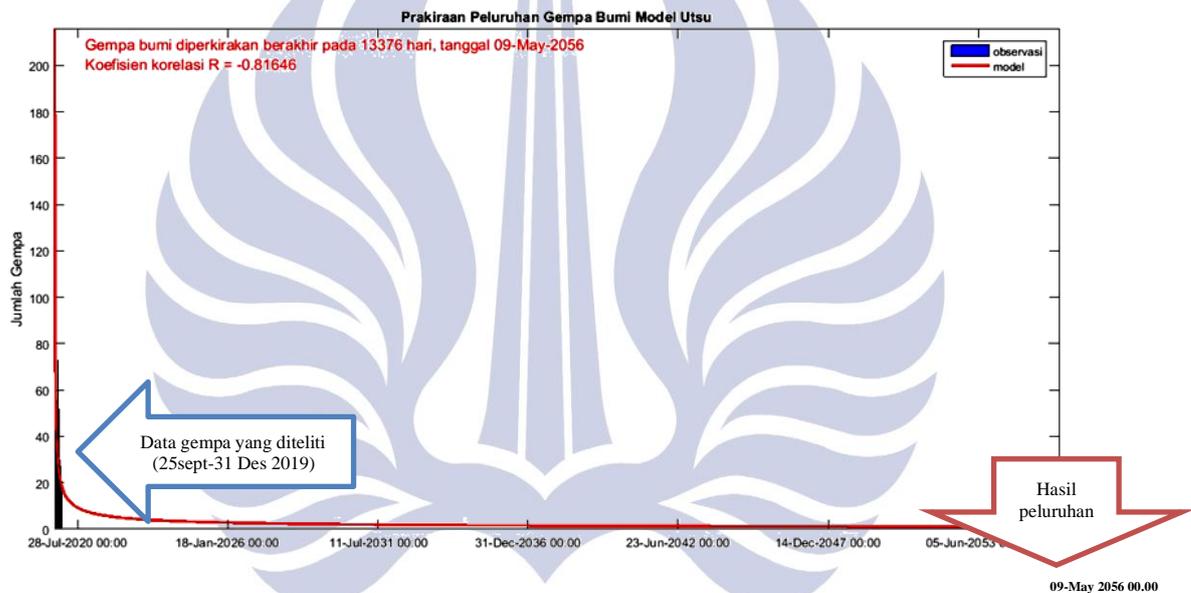
Hasil pengolahan data penelitian yang telah diinput ke dalam *software* Peluruhan v2.0 dengan interval waktu pengolahan data per 5 hari menghasilkan grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan keempat metode statistik sebagai berikut (Lihat Gambar 3-6).



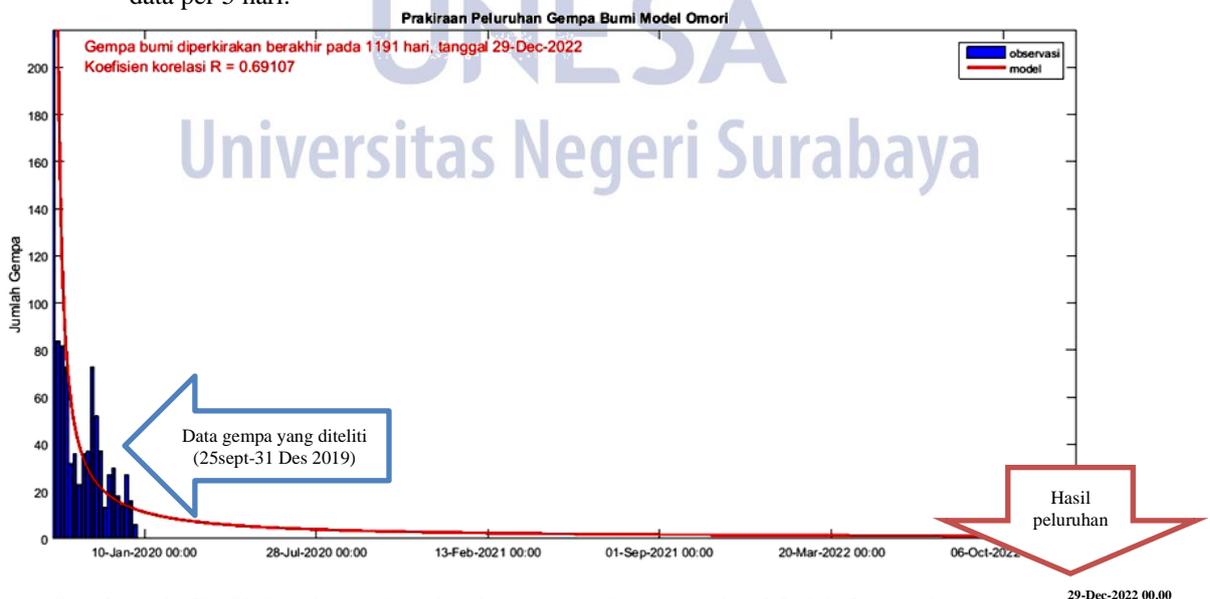
Gambar 3. Grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Model Mogi I dengan interval waktu pengolahan data per 5 hari. Garis kurva berwarna merah menunjukkan kurva pemodelan karakteristik peluruhan gempa bumi susulan.



Gambar 4. Grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Model Mogi II dengan interval waktu pengolahan data per 5 hari.



Gambar 5. Grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Model Utsu dengan interval waktu pengolahan data per 5 hari.

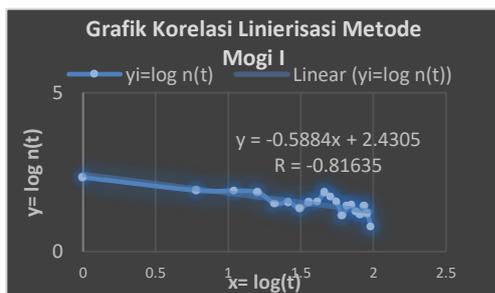


Gambar 6. Grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Model Omori dengan interval waktu pengolahan data per 5 hari.

Gambar 3-6 menunjukkan bahwa hasil karakteristik peluruhan dari keempat metode statistik yang digunakan yaitu metode Mogi I, Mogi II, Omori, dan Utsu berbeda antar satu sama lain. Perbedaan ini disebabkan karena metode dan persamaan statistik yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini juga berbeda (Lihat Persamaan 1,3,5, dan 7). Berdasarkan bentuk keempat persamaan tersebut, maka dapat diketahui bahwa masing-masing persamaan memiliki rentang waktu yang menghasilkan kecepatan peluruhan gempa susulan yang berbeda beda. Omori (1894) mencatat bahwa laju gempa susulan meluruh dengan waktu sebesar t^{-1} setelah guncangan gempa utama terjadi. Mogi (1962) menyatakan laju gempa susulan yang terjadi lebih dari 100 hari dalam medium elastik di bawah beban konstan meluruh dengan waktu sebesar $\log t$, sedangkan laju gempa susulan yang terjadi kurang dari 100 hari meluruh dengan waktu sebesar t . Utsu (1957) menyatakan laju gempa susulan meluruh dengan waktu sebesar $\log(t+0.01)$ setelah gempa utama terjadi.

Hasil observasi peluruhan gempa bumi susulan Ambon 25 September-31 Desember 2019 menurut Universal Time Coordinated (UTC) menunjukkan bahwa distribusi aktivitas gempa bumi susulan cenderung menurun seiring berjalannya waktu (Lihat Gambar 3-6). Distribusi aktivitas gempa susulan ini menurun melewati batas waktu observasi penelitian (Tanggal 25 September-31 Desember 2019) hingga berhenti meluruh pada frekuensi $n(t) = 0$ sesuai dengan hasil perhitungan masing masing metodenya (Lihat Gambar 3-6). Penurunan jumlah frekuensi gempa bumi ini menunjukkan bahwa sisa energi yang dilepaskan setelah gempa bumi utama juga mengalami penurunan seiring berjalannya waktu akibat pergerakan pergeseran batuan yang mulai menemukan titik keseimbangannya (Salsabil dkk, 2019).

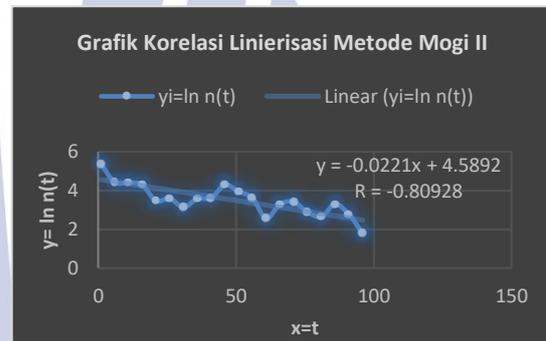
Gambar 3 (grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan model Mogi I) menyatakan bahwa gempa bumi susulan Maluku Tahun 2019 diperkirakan berakhir tanggal 18 September 2056 pada hari ke 13508 setelah gempa bumi utamanya terjadi. Koefisien korelasi hasil penelitian penentuan peluruhan gempa susulan pada Model Mogi I bernilai -0,81635. Sugiyono (2007) menjelaskan bahwa tanda negatif pada hasil nilai koefisien korelasi perhitungan statistik menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x dan y yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan 4 adalah berbanding terbalik (Lihat Gambar 7).



Gambar 7. Grafik korelasi hasil linierisasi metode Mogi I

Gambar 7 menyatakan bahwa koefisien korelasi yang dihitung oleh *software* Peluruhan v2.0 dalam penelitian penentuan peluruhan gempa susulan menggunakan metode Mogi I adalah korelasi antara fungsi logaritma dari waktu terjadinya gempa susulan dengan fungsi logaritma dari frekuensi gempa susulan yang terjadi. Interpretasi nilai koefisien korelasi sebesar -0,81635 menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x (waktu terjadinya gempa) dengan variabel y (frekuensi gempa bumi) yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan metode Mogi I sangat kuat (Lihat Tabel 1).

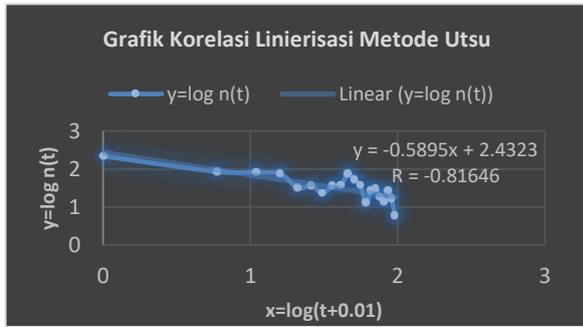
Gambar 4 (grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Model Mogi II) menyatakan bahwa gempa bumi susulan Maluku Tahun 2019 diperkirakan berakhir tanggal 20 April 2020 pada hari ke 208 setelah gempa bumi utamanya terjadi. Koefisien korelasi hasil penelitian penentuan peluruhan gempa susulan pada Model Mogi II bernilai -0,80928. Tanda negatif pada hasil nilai koefisien korelasi perhitungan statistik menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x dan y yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan 6 adalah berbanding terbalik (Lihat Gambar 8).



Gambar 8. Grafik korelasi hasil linierisasi metode Mogi II

Gambar 8 menyatakan bahwa korelasi yang dihitung oleh *software* Peluruhan v2.0 dalam penelitian penentuan peluruhan gempa susulan menggunakan metode Mogi II adalah korelasi antara waktu terjadinya gempa susulan dengan fungsi logaritma natural (\ln) dari frekuensi gempa susulan yang terjadi. Interpretasi nilai koefisien korelasi sebesar -0,80928 menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x (waktu terjadinya gempa) dengan variabel y (frekuensi gempa bumi) yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan metode Mogi II sangat kuat (Lihat Tabel 1).

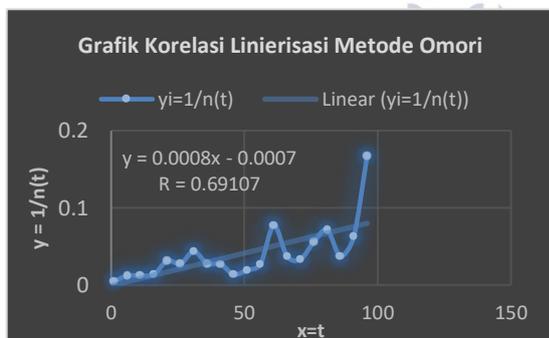
Gambar 5 (grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan model Utsu) menyatakan bahwa gempa bumi susulan Maluku Tahun 2019 diperkirakan berakhir tanggal 09 Mei 2056 pada hari ke 13375 setelah gempa bumi utamanya terjadi. Koefisien korelasi hasil penelitian penentuan peluruhan gempa susulan pada Model Utsu bernilai -0,81464. Tanda negatif pada hasil nilai koefisien korelasi perhitungan menunjukkan bahwa hubungan antara adalah hubungan antara variabel x dan y yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan 8 adalah berbanding terbalik (Lihat Gambar 9).



Gambar 9. Grafik korelasi hasil linierisasi metode Utsu

Gambar 9 menyatakan bahwa korelasi yang dihitung oleh software Peluruhan v2.0 dalam penelitian penentuan peluruhan gempa susulan menggunakan metode Utsu adalah korelasi antara waktu terjadinya gempa susulan yang dijumlahkan dengan konstanta c umumnya bernilai 0,01 dengan fungsi logaritma natural (ln) dari frekuensi gempa susulan yang terjadi. Interpretasi nilai koefisien korelasi sebesar -0,81646 menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x (waktu terjadinya gempa) dengan variabel y (frekuensi gempa bumi) yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan metode Utsu sangat kuat (Lihat Tabel 1).

Gambar 6 (grafik karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Model Omori) menyatakan bahwa gempa bumi susulan Maluku Tahun 2019 diperkirakan berakhir tanggal 29 Desember 2020 pada hari ke 1191 setelah gempa bumi utamanya terjadi. Koefisien korelasi hasil penelitian penentuan peluruhan gempa susulan pada Model Omori memiliki hasil lebih rendah dari pada metode lainnya yaitu bernilai 0,69107. Koefisien korelasi hasil penelitian peluruhan gempa susulan pada model ini bernilai positif yang menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x dan y yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan 2 adalah berbanding lurus atau searah (Lihat Gambar 10).



Gambar 10. Grafik korelasi hasil linierisasi metode Omori

Gambar 10 memiliki nilai koefisien korelasi yang arahnya positif disebabkan karena nilai $n(t)$ atau frekuensi gempa susulan yang terjadi dilinierisasi menjadi $\left(\frac{1}{n(t)}\right)$ sehingga mengakibatkan kurva frekuensi gempa susulan yang umumnya menurun dan berbanding terbalik terhadap waktu menjadi berbanding lurus. Gambar 10 juga menyatakan bahwa korelasi yang dihitung oleh

software Peluruhan v2.0 dalam penelitian penentuan peluruhan gempa susulan menggunakan metode Omori adalah korelasi antara waktu terjadinya gempa susulan dengan satu per frekuensi gempa susulan yang terjadi $\left(\frac{1}{n(t)}\right)$. Interpretasi nilai koefisien korelasi sebesar 0,69107 menunjukkan bahwa hubungan antara variabel x (waktu terjadinya gempa) dengan variabel y (frekuensi gempa bumi) yang sudah dilinierisasi sesuai persamaan metode Omori kuat (Lihat Tabel 1).

Keakuratan hasil pengolahan software Peluruhan v2.0 ini dibuktikan dengan dilakukannya perhitungan peluruhan gempa bumi susulan dengan keempat metode statistik secara manual menggunakan bantuan Ms. Excel. Persamaan (10) dan (11) regresi kuadrat terkecil (*least square*) digunakan untuk memperoleh hasil koefisien regresi linier A dan B. Hasil ini kemudian dimasukkan kembali ke dalam persamaan masing-masing metode yang telah dilinierisasi dengan memasukkan nilai $n(t) = 1$ sehingga diperoleh nilai t (waktu peluruhan gempa bumi susulan). Setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan-persamaan di atas, maka diperoleh hasil sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil perhitungan statistik peluruhan gempa bumi susulan keempat metode statistik menggunakan Ms. Excel.

Metode	A	B	a	b	t (hari)
Mogi I	2,430496	-0,588413	269,461	0,588413	13508,068
Mogi II	4,589160	-0,022058	98,411	0,022058	208,04935
Omori	0,000727	0,000840	1190,58	-0,86586	1191,455
Utsu	2,432311	-0,589460	270,589	0,589459	13376,397

Tabel 2 di atas menunjukkan bahwa hasil perhitungan Ms. Excel peluruhan gempa bumi susulan dari keempat metode statistik yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini bernilai sama dengan hasil perhitungan software Peluruhan v2.0. Hasil perhitungan manual menggunakan Ms. Excel menunjukkan bahwa gempa bumi susulan di Ambon Tahun 2019 menurut Model Mogi I dinyatakan berakhir pada hari ke 13508, Model Mogi II pada hari ke 208, Model Omori pada hari ke 1191, dan Model Utsu pada hari ke 13376 setelah gempa utamanya terjadi, sehingga hasil pengolahan data menggunakan software Peluruhan v2.0 terbukti akurat dengan teori perhitungan dari persamaan keempat metode statistik yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini.

Metode yang Sesuai untuk Peluruhan Gempa Bumi Susulan Ambon Tahun 2019

Karakteristik peluruhan gempa bumi susulan Ambon 2019 yang telah dihitung dengan perhitungan metode statistik menggunakan software peluruhan v2.0 menghasilkan perbandingan hasil waktu peluruhan

gempa bumi susulan dan koefisien korelasi keempat metode sebagai berikut.

Tabel 3. Perbandingan hasil prakiraan waktu peluruhan gempa bumi susulan di Maluku Tahun 2019

Metode	Koefisien korelasi	Hasil prakiraan peluruhan gempa susulan (hari)	Data <i>real time</i> pantauan BMKG Per 04 Mei 2020
Mogi I	-0,81635	13508	Gempa susulan Ambon dan sekitarnya terakhir berlangsung Tanggal 28 April 2020 pada hari ke 216 setelah gempa utamanya
Mogi II	-0,80928	208	
Omori	0,69107	1191	
Utsu	-0,81646	13376	

Tabel 3 menunjukkan bahwa masing-masing metode statistik yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini menghasilkan analisis waktu peluruhan gempa bumi susulan yang berbeda beda. Hasil perbandingan waktu peluruhan gempa susulan keempat metode dengan data *real time* milik BMKG sampai tanggal 4 Mei 2020 menunjukkan bahwa metode yang menghasilkan analisis waktu peluruhan gempa bumi mendekati data *real time* BMKG adalah metode Mogi II dengan koefisien korelasi “negatif sangat kuat” sebesar -0,80928. Metode Mogi II menyatakan bahwa gempa bumi susulan di Ambon Tahun 2019 diperkirakan berakhir pada hari ke 208 setelah gempa utama terjadi. Hasil ini mendekati hasil pantauan terakhir BMKG pada tanggal 4 Mei 2020 bahwa gempa susulan Maluku terakhir terjadi pada hari ke 216 tanggal 28 April 2020 (Lihat Gambar 11).

Date	Time	Lat	Lon	Dep	M	MT	Region
2020/04/28	06:45:43.342	2.94 S	128.61 E	19	2.9	-	Ceram Sea
2020/04/27	14:04:57.657	5.33 S	131.48 E	28	4.4	-	Banda Sea
2020/04/27	09:13:27.053	3.56 S	125.33 E	10	3.6	-	Buru, Indonesia
2020/04/20	19:39:21.434	3.02 S	127.91 E	12	3.6	-	Seram, Indonesia
2020/04/20	01:05:29.522	2.97 S	128.01 E	10	2.6	-	Ceram Sea
2020/04/19	20:15:45.357	2.78 S	129.94 E	15	3.4	-	Seram, Indonesia
2020/04/18	19:33:41.428	2.92 S	128.58 E	10	2.4	-	Ceram Sea

Gambar 11. Hasil pantauan terakhir gempa susulan Ambon per 4 Mei 2020

Berdasarkan perbandingan hasil koefisien korelasinya, Metode Mogi II memiliki besar koefisien korelasi yang lebih kecil dibandingkan Metode Mogi I dan Utsu namun memiliki hasil analisis waktu peluruhan gempa susulan yang lebih mendekati data *real* BMKG sehingga menjadikan metode ini menjadi metode yang lebih sesuai untuk analisis peluruhan gempa bumi susulan di Ambon dan sekitarnya. Hasil data penelitian menunjukkan bahwa besar nilai koefisien korelasi setiap metode hanya menunjukkan seberapa kuat hubungan antar kedua variabel penelitian yang telah dilinierisasi dan tidak berpengaruh dalam penentuan kesesuaian hasil analisis waktu peluruhan gempa bumi susulan.

PENUTUP

A. Simpulan

Distribusi aktivitas gempa bumi susulan Ambon selama 96 hari (terhitung dari tanggal 25 September-31 Desember 2019 menurut Universal Time Coordinated (UTC)) memberikan hasil sebagai berikut: (1) Karakteristik peluruhan gempa susulan metode Mogi I berakhir pada hari ke 13508, metode Mogi II berakhir pada hari ke 208, metode Omori berakhir pada hari ke 1191, dan metode Utsu berakhir pada hari ke 13376 setelah gempa utama terjadi. Keempat metode menunjukkan hasil peluruhan gempa bumi susulan yang berbeda akibat perbedaan rentang waktu pada masing-masing persamaan metode statistik. (2) Metode yang menghasilkan analisis waktu peluruhan gempa bumi susulan mendekati data *real time* BMKG untuk kasus gempa bumi Ambon 2019 adalah metode Mogi II. (3) Perbandingan besar nilai koefisien korelasi antar metode statistik hanya menunjukkan seberapa kuat hubungan kedua variabel penelitian yang telah dilinierisasi dan tidak berpengaruh dalam penentuan kesesuaian hasil analisis waktu peluruhan gempa bumi susulan.

B. Saran

Kesulitan yang dialami peneliti selama melaksanakan penelitian ini terjadi saat melakukan perhitungan manual untuk membuktikan keakuratan hasil analisis *software* peluruhan v2.0. Peneliti kurang teliti dalam menentukan interval waktu pengambilan data secara manual serta penentuan nilai *t* dan *n(t)* data penelitian sehingga mengakibatkan hasil perhitungan Excel dan analisis *software* beberapa kali menunjukkan hasil yang berbeda. Dengan mempertimbangkan faktor kesulitan yang dialami peneliti, maka peneliti menyarankan dalam menentukan interval waktu pengambilan data dihitung 24 jam sejak waktu gempa utamanya terjadi bukan dihitung mulai pukul 00.00-23.59 UTC.

DAFTAR PUSTAKA

- Abadyo, & Permadi, Hendro. (2005). *Metoda Statistika Praktis*. Malang: Universitas Negeri Malang.
- Hill, Kevin C. 2012. *Tectonic and Regional Structure of Seram and the Banda Arc*. Indonesian Journal of Sedimentary Geology, No. 23, 03, pp. 05-15.
- Jannah, I. N., Anggono, T., T, Tony. Y. M. (2016). *Aplikasi Metode Double Difference dalam Relokasi Hiposenter untuk Menggambarkan Zona Transisi antara Busur Banda dan Busur Sunda*. Youngster Physics Journal, Vol.5, No.3, Hal.113–122.
- Manual Peluruhan v.2.0* diakses melalui <http://puslitbang.bmkg.go.id> pada tanggal 15 Desember 2019.
- Mogi, Kiyoo. (1962). *On the Time Distribution of Aftershock Accompanying the Recent Major Earthquakes in and near Japan*. Bulletin Earthquake Research Institute., Tokyo Univ., Vol. 40, pp.107-124.

- Mogi, Kiyoo. (1967). *Earthquakes and fractures*. Tectonophysics, Vol.5, No.1, Hal.35–55. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(67\)90043-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(67)90043-1).
- Omori, F. (1894). *On the Aftershock of Earthquakes*. Journal of Colloid Science., Tokyo Imperial University of Japan., Vol. 7, pp. 111-200.
- 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, Vol.5, No.1, Hal.73–77.
- Rohmawati, Tita. (2018). *Analisis waktu berakhirnya gempa bumi susulan dengan menggunakan metode Omori, Mogi I, Mogi II, & Utsu untuk kejadian gempa bumi di Indonesia tahun 2009-2017*. Bandung: Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati.
- Salsabil A. K., Ginting, R. A., A, Qadri., & A, Kamal. M. (2019). *Analisis Peluruhan Gempa Bumi Menggunakan Metode Omori, Mogi-Utsu I Dan Mogi-Utsu II (Studi Kasus Gempa Bumi Banten 23 Januari 2018)*. Prosiding Seminar Nasional Fisika (*E-journal*), Vol. VIII, SNF 2019-PA-7–14.
- Sianipar, Dimas., Halauwet, Yehezkiel., Daryono., & Karnawati, Dwikorita. (2019). *Studi sumber gempa Ambon 26 September 2019 Mw 6,5*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi, dan Geofisika.
- Sugiyono. (2007). *Statistika Untuk Penelitian*. Bandung: ALFABETA.
- Sunarjo, Gunawan, M. T., & Pribadi, S. (2012). *Gempabumi Edisi Populer*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Supriyanto. (2007). *Analisis Data Geofisika : Memahami Teori Inversi*. Depok: Departemen Fisika, Universitas Indonesia.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional Indonesia (PuSGeN). (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman; Badan Penelitian dan Pengembangan; Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Utsu, Tokuji. (1957). *Magnitude of Earthquake and Occurrence of their Aftershocks*. Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan, 2nd Series), Vol.10, No.1, pp. 35-45.
- Vellicia, A., Suarbawa, K. N., Darsono, R., Fisika, P. S., Udayana, U., & Jimbaran, K. B. (2019). *Penentuan Asumsi Waktu Berakhirnya Gempa Susulan Studi Kasus Gempabumi Lombok 5 Agustus 2018*. Kappa Journal Fisika Universitas Hamzanwadi, Vol. 3, No. 2, Hal. 99–104.
- Zohrah, Riyazi., & Reza, Ghaeitanchi Mohammad. (2007). *Rate Of Aftershocks Decay In Iranian Plateau*. Journal Of Earth, Summer 2007, Vol. 2, No. 2, Page(s). 35-45.