Analisis Waktu Berakhirnya Gempa Bumi Susulan Menggunakan Metode Mogi II dan Utsu (Studi Kasus Gempa Bumi Bantul 30 Juni 2023)

Analysis of the End Time of Aftershocks Using the Mogi II and Utsu Methods (Case Study of the June 30, 2023 Bantul Earthquake)

Erni Asanti [1], **Dwi Budi Susanti**[2], **Lusia Silfia Pulo Boli**[1]

[1]*Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman, Jl Dr. Soeparno 61, Grendeng, Purwokerto 53122*

[2]*Stasiun Geofisika Kelas I Sleman, Jl. Wates Km. 8, Jitengan, Balecatur, Gamping, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55295*

I N F O A R T I K E L

Naskah masuk : 20 Februari 2024
Naskah diperbaiki : 05 Mei 2024
Naskah diterima : 01 Juni 2024

Kata kunci:
Peluruhan gempa bumi susulan
Mogi
Utsu
koefisien Korelasi

Keywords:
Aftershock decay
Mogi
Utsu
correlation coefficient

A B S T R A K

Gempa bumi dengan magnitudo besar, seperti gempa bumi Bantul pada 30 Juni 2023, memiliki potensi menimbulkan gempa bumi susulan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan waktu yang diperlukan untuk mencapai kestabilan pelepasan energi gempa bumi, membandingkan peluruhan gempa bumi menggunakan metode Mogi II dan Utsu, serta menemukan metode yang paling akurat dalam memperkirakan berakhirnya gempa bumi susulan berdasarkan data observasi. Data yang digunakan adalah rekaman gempa bumi Bantul dari SeisComP4, yang kemudian dianalisis menggunakan persamaan masing-masing metode. Hasil analisis menunjukkan perbedaan waktu berakhirnya gempa bumi susulan (t) dan koefisien korelasi (r) di antara kedua metode. Metode Utsu menunjukkan waktu berakhirnya gempa bumi susulan pada 4 Agustus 2023, dengan koefisien korelasi mendekati -1 yang menunjukkan interpretasi kuat, sedangkan metode Mogi II memperkirakan berakhirnya gempa bumi susulan pada 29 Juli 2023. Metode Utsu lebih mendekati hasil observasi, yang menunjukkan gempa bumi susulan berakhir pada hari ke 32 pasca gempa bumi utama, yaitu pada 31 Juli 2023.

A B S T R A C T

An earthquake with a large magnitude, such as the Bantul earthquake on June 30, 2023, has the potential to trigger aftershocks. This study aims to determine the time required to reach the stability of energy release from the earthquake, compare the decay of aftershocks using the Mogi II and Utsu methods, and identify the most accurate method for predicting the end of aftershocks based on observational data. The data used are recordings of the Bantul earthquake from SeisComP4, which were then analyzed using the equations of each method. The analysis results show differences in the end time of aftershocks (t) and correlation coefficients (r) between the two methods. The Utsu method indicates the end of aftershocks on August 4, 2023, with a correlation coefficient close to -1, indicating strong interpretation, while the Mogi II method estimates the end of aftershocks on July 29, 2023. The Utsu method is closer to the observational results, which show that the aftershocks ended on the 32nd day after the main earthquake, on July 31, 2023.

© 2024 Jurnal Stasiun Geofisika Sleman

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang berada di jalur cincin api (*Ring of Fire*) dan terletak pada jalur pertemuan 3 lempeng tektonik, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Pasifik dan lempeng Eurasia [1, 2]. Pertemuan antar lempeng tersebut mengakibatkan terjadinya gempa bumi dikarenakan tumbukan atau pergeseran lempeng. Gaya interaksi antar lempeng tersebut senantiasa menekan dan menggeser berbagai patahan yang tersebar di wilayah Indonesia, baik di daratan maupun di lautan. Pergerakan relatif ketiga lempeng tersebut merupakan penggerak utama aktivitas gempa bumi di Indonesia. Oleh karena itu, Indonesia merupakan wilayah yang memiliki tingkat aktivitas gempa bumi yang tinggi [3].

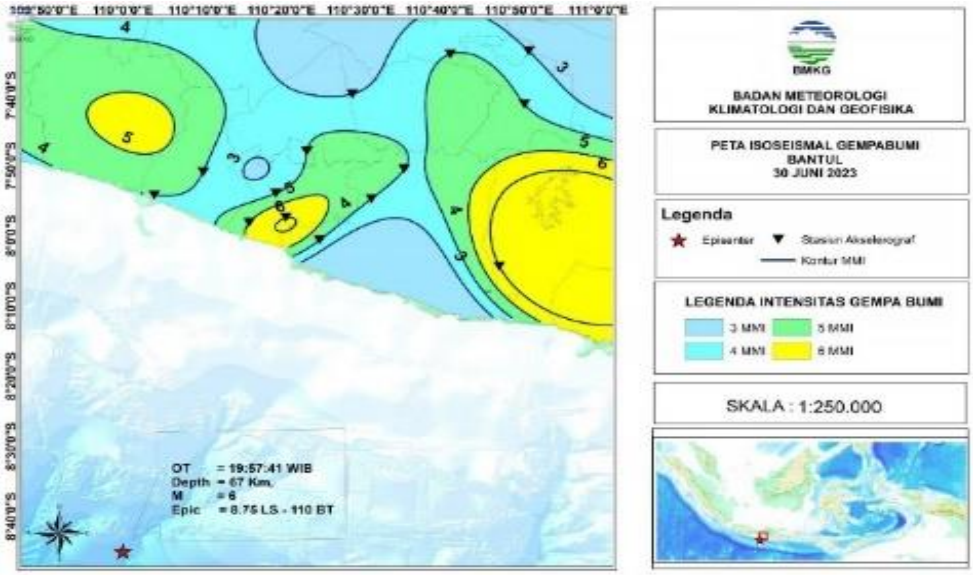
Gempa bumi merupakan peristiwa fisis pelepasan energi gelombang seismik akibat dari adanya pergerakan lempeng – lempeng bumi atau dapat juga terjadi karena proses vulkanik yang terjadi secara tiba – tiba yang tidak dapat dicegah oleh manusia. Kerusakan yang ditimbulkan pasca terjadinya gempa bumi biasanya berupa kerusakan baik secara fisik maupun moril yang dapat menyebabkan kerugian besar terhadap pemerintah maupun masyarakat yang tinggal di sekitar wilayah terjadinya gempa bumi [4]. Ketika lempeng sudah melebihi batas elastisitas, maka

akan terjadi deformasi atau patahan pada batuan yang diikuti dengan pelepasan energi secara tiba -tiba. Proses tersebut mengakibatkan getaran – getaran ke seluruh arah yang disebut dengan gelombang gempa bumi (*seismic waves*). Hal tersebut mengakibatkan daerah di sekitar tumbukan lempeng akan mengalami gempa bumi. Gempa bumi dengan kekuatan magnitudo yang cukup besar akan memicu terjadinya tsunami. Pergeseran lempeng bumi akan mengakibatkan gempa bumi yang disertai pelepasan sejumlah energi yang besar. Pergerakan lempeng bumi dibagi menjadi tiga. [5].

Salah satu wilayah Indonesia yang memiliki aktivitas gempa bumi cukup tinggi adalah Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). DIY merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi gempa bumi tinggi karena berada di atas lempeng subduksi sehingga memunculkan sesar lokal bernama sesar Opak dan secara geografis mempunyai gunung Merapi. Berdasarkan data yang didapat, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) merekam sekitar 2.202 kali gempa bumi yang melanda DIY sepanjang tahun 2023. Gempa bumi yang terjadi pada tanggal 30 Juni 2023 merupakan salah satu yang cukup besar magnitudonya, yaitu 6.4. Gempa bumi dengan magnitudo yang cukup besar tersebut berpotensi memiliki gempa bumi susulan.

Tatanan tektonik daerah penelitian. Yogyakarta memiliki potensi gempa bumi tinggi karena berada di atas lempeng subduksi yang memunculkan gunung api Merapi yang berada di sebelah utara dan mengisi cekungan Yogyakarta dengan endapan vulkaniknya serta patahan yang terletak diantara Cekungan Yogyakarta dan Pegunungan Selatan bernama Sesar Opak. Yogyakarta merupakan cekungan atau depresi dengan Gunung Merapi di bagian utara, bagian timur dibatasi oleh Pegunungan Selatan dan bagian barat dibatasi oleh Pegunungan Kulon Progo serta bagian selatannya dibatasi oleh Samudera [6].

Pada tanggal 30 Juni 2023, Yogyakarta dilanda gempa bumi berkekuatan M 6.4 di wilayah Bantul. Letak gempa bumi tersebut berada di 102 km Barat Daya Bantul. Jika dilihat dari kedalaman hiposenter dan lokasi episenternya, gempa bumi ini terjadi disebabkan karena adanya aktivitas pergerakan lempeng subduksi *(intraslab).* Hal tersebut menunjukan bahwa gempa bumi ini memiliki mekanisme pergerakan naik *(thrust fault)*.



Gambar 1. Peta Isoseismal gempa bumi Bantul –Yogyakarta 30 Juni 2023.

Gempa bumi dengan magnitudo yang cukup besar tersebut sangat berpotensi memiliki gempa bumi susulan. Pada umumnya, gempa bumi yang terjadi diikuti oleh aktifitas gempa bumi susulan (*aftershock*) yang membentuk pola tertentu. Gempa bumi susulan merupakan gempa bumi yang muncul setelah gempa bumi utama. Gempa bumi susulan terjadi di wilayah yang sama dengan gempa bumi utama namun dengan kekuatan magnitudo yang lebih kecil dibanding gempa bumi utama dan muncul dengan pola yang mengikuti hukum omori [3].

Penentuan waktu berakhirnya gempa bumi susulan dapat dilakukan menggunakan beberapa metode [7]. Metode Mogi II merumuskan hubungan antara frekuensi dan waktu dalam eksponensial. Persamaan dari Mogi II sebagai berikut untuk gempa bumi susulan yang terjadi kurang dari 100 hari

$$n(t) = a.e^{-bt} \quad (1)$$

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

$$\ln n(t) = \ln a - bt \quad (2)$$

Dengan n(t) adalah jumlah gempa bumi susulan n yang diukur dalam selang waktu t, gempa bumi susulan dinyatakan berakhir jika jumlah gempa bumi atau n(t) = 1. t adalah waktu kejadian gempa bumi susulan. a dan b adalah konstanta dimana nilai a menunjukan intersep, dan b menunjukan gradien.

Utsu (1957) menghitung gempa bumi susulan yang terjadi dengan interval kurang dari 100 hari. Utsu (1957) mengemukakan jika tingkat aktivitas gempa bumi susulan dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$n(t) = \frac{a}{(t+c)^b} \quad (3)$$

dengan n(t) adalah jumlah gempa bumi susulan n yang diukur dalam selang waktu t, gempa bumi susulan dinyatakan berakhir jika jumlah gempa bumi atau n(t) = 1. t adalah waktu kejadian gempa bumi susulan, a,b dan c adalah konstanta dimana nilai a menunjukan intersep, dan b menunjukan gradien dan nilai c yang digunakan adalah 0.01.

Persamaan tersebut kemudian diliniearisasikan untuk mempermudah perhitungan dan analisa menjadi bentuk logaritma sebagai berikut :

$$\log n(t) = \log a - b \log(t + 0.01) \quad (4)$$

Koefisien korelasi digunakan untuk meninjau seberapa kuat hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Tanda positif dan tanda negatif pada indeks korelasi antara variabel x dan y menunjukkan arah korelasi. Koefisien korelasi dirumuskan sebagai berikut.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2 (n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \quad (5)$$

Dimana $-1 \leq r \leq 1$, dan n = jumlah data

Indeks kekuatan hubungan antara kedua variabel dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Indeks kekuatan hubungan antara kedua variabel berdasarkan nilai rxy hasil uji korelasinya [6].

Nilai rxy	Interpretasi	Nilai rxy	Interpretasi
0.00 – 0.19	Sangat rendah	0.00 – (-0.19)	Sangat rendah
0.20 – 0.39	Rendah	(-0.20) – (-0.39)	Rendah
0.60 – 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

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan membandingkan metode peluruhan untuk memperkirakan berakhirnya gempa bumi susulan. Data yang diambil dalam penelitian ini merupakan data gempa bumi susulan dari gempa bumi Bantul pada tanggal 30 Juni 2023 pukul 19:57:41 WIB dengan magnitudo 6.4, kedalaman 67 km yang diperoleh dari data gempa bumi hasil SeisComp4 Stasiun Geofisika Kelas 1 Sleman, Yogyakarta. Data tersebut kemudian dikelompokkan masing – masing berdasarkan interval waktu per 24 jam sebagaimana pada Tabel 2, dimana t adalah interval dalam 24 jam, n(t) adalah frekuensi gempa bumi susulan per 24 jam, dan n adalah banyaknya data. Selanjutnya data diolah dengan perhitungan regresi linear untuk menghitung nilai waktu perluruhan dan nilai koefisien korelasi dengan metode Mogi II dan Utsu. Pengolahan data juga dibantu dengan software Peluruhan v2.0 dengan mengolah data gempa bumi dari data SeisComp4 ke dalam Ms. Excel. Setelah itu, mengubah data *origin time* menjadi .txt melalui Notepad dengan format yyyy-mm-dd HH:MM:SS dan kemudian menginputnya ke dalam *software* Peluruhan v2.0.

3. Hasil Dan Pembahasan

Grafik peluruhan gempa bumi susulan menggunakan Metode Mogi II untuk gempa bumi Bantul 30 Juni 2023, ditunjukkan pada Gambar 2. Dari grafik grafik tersebut, untuk metode Mogi II mengalami penurunan frekuensi terhadap waktu, namun kurang signifikan. Koefisien korelasi (r) yang dihasilkan sekitar -0.6372 dengan waktu berakhirnya peluruhan sekitar 30 hari setelah gempa bumi utama terjadi.

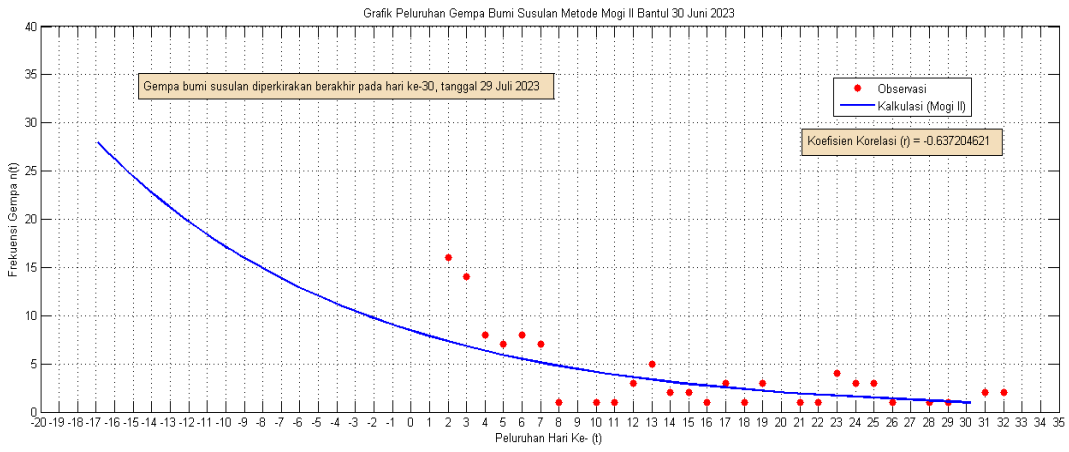
Tabel 2. Interval dan frekuensi gempa bumi susulan di Bantul per 24 Jam.

Interval (t) (hari)	Frekuensi gempa bumi n(t)
1	47
2	16
3	14
4	8
5	7
6	8
7	7
8	1
9	1
10	1
11	3
12	5
13	2
14	2
15	1
16	3
17	1
18	3
19	1
20	1
21	4
22	3
23	3
24	1
25	1
26	1
27	2
28	2

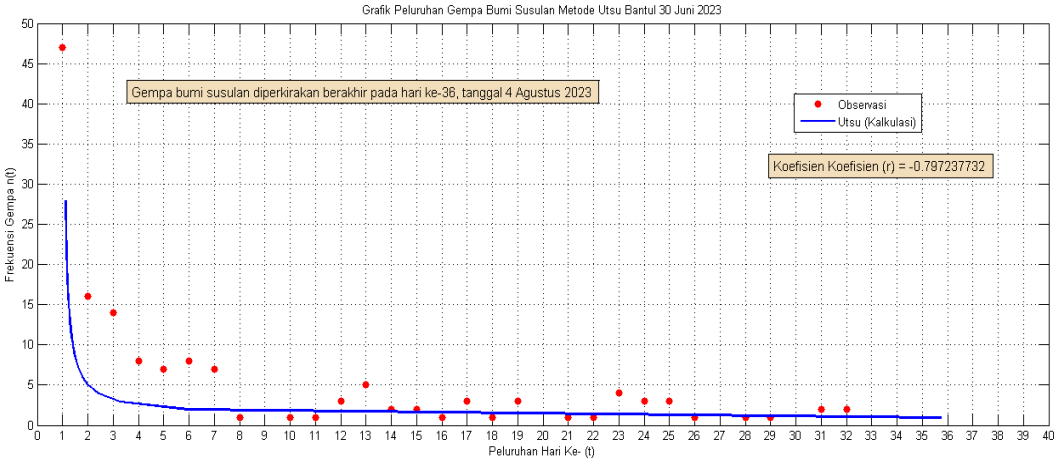
Selanjutnya grafik peluruhan gempa bumi susulan menggunakan Metode Utsu untuk gempa bumi Bantul 30 Juni 2023, ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan grafik tersebut, didapatkan hasil perbandingan antara nilai observasi dengan kalkulasi metode Utsu. Grafik tersebut menunjukan peluruhan dari gempa bumi Bantul 30 Juni 2023 untuk metode Utsu berdasarkan hasil kalkulasi yang mengalami penurunan frekuensi terhadap waktu secara signifikan. Hal tersebut mengindikasikan jika gempa bumi meluruh secara teratur. Koefisien korelasi (r) yang dihasilkan sekitar -0.7972 dengan waktu berakhirnya peluruhan yaitu 36 hari setelah gempa bumi utama terjadi. Berdasarkan hasil observasi, waktu peluruhan berakhir pada hari ke 32. Namun, berdasarkan hasil kalkulasi metode Utsu, grafik tersebut belum selesai waktu peluruhannya dan masih kontinu sampai hari ke 36.

Tabel perbandingan hasil dari masing – masing metode yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3. Waktu berakhirnya gempa bumi susulan pada metode Mogi II diperoleh nilai (t) sebesar 30 hari, sedangkan untuk metode Utsu diperoleh nilai (t) sebesar 36 hari. Hasil dari kedua metode tersebut berbeda karena persamaan statistik yang digunakan berbeda. Untuk metode Mogi II, digunakan persamaan bentuk eksponensial sedangkan untuk metode Utsu menggunakan persamaan bentuk logaritma.

Metode Utsu memiliki waktu berakhirnya gempa bumi pada hari ke 36 pasca gempa bumi utama terjadi atau sekitar tanggal 4 Agustus 2023. Hal tersebut dikarenakan nilai koefisien korelasi dari metode Utsu memiliki nilai yang lebih mendekati -1 dan termasuk koefisien korelasi interpretasi kuat. Hasil peluruhan metode Utsu tersebut mendekati hasil observasi yang menyatakan jika gempa bumi susulan berakhir pada hari ke – 32 pasca gempa bumi utama terjadi, yaitu pada tanggal 31 Juli 2023.



Gambar 2. Grafik peluruhan gempa bumi susulan metode Mogi II untuk gempa bumi Bantul 30 Juni 2023.



Gambar 3. Grafik peluruhan gempa bumi susulan metode Utsu untuk gempa bumi Bantul 30 Juni 2023.

Tabel 3. Waktu berakhirnya gempa susulan untuk metode Mogi II dan Utsu.

Metode	Waktu berakhir gempa bumi (t)	
	Kalkulasi	Observasi
Mogi II	30 hari	32 hari
Utsu	36 hari	32 hari

Nilai koefisien korelasi (r) dari metode Mogi II sebesar -0.6372, sedangkan untuk metode Utsu diperoleh hasil sebesar -0.7972 (Tabel 4). Peluruhan gempa bumi susulan dianggap menurun terhadap waktu jika nilai koefisien korelasinya bernilai negatif, sehingga nilai koefisien korelasi harus negatif karena hubungan gempa bumi dan waktu adalah berbanding terbalik. Semakin mendekati – 1, maka akan semakin kuat hubungannya.

Nilai koefisien korelasi dari metode Mogi II dan Utsu memiliki tanda negatif. Tanda negatif tersebut menjelaskan bahwa arah hubungan antara variabel bebas (x) dan variabel terikat (y) berbanding terbalik. Jika dilihat dari Tabel 1. Indeks kekuatan hubungan antara variabel x dan y berdasarkan nilai r_{xy} hasil uji korelasinya, dapat dikatakan jika metode Mogi II memiliki koefisien korelasi interpretasi kuat sebesar –0.6372. Hal tersebut sama seperti metode Utsu yang memiliki nilai koefisien korelasi interpretasi kuat sebesar -0.7972 namun dengan hasil pada metode Utsu yang lebih besar.

Tanda negatif pada nilai koefisien korelasi tersebut menunjukkan bahwa korelasi antara variabel x (waktu terjadinya gempa bumi) dan y (frekuensi gempa bumi susulan yang terjadi) yang telah dilinierisasi adalah berbanding terbalik. Nilai korelasi negatif menyatakan bahwa jika semakin besar waktu (t) maka frekuensi gempa bumi n(t) akan menurun. Nilai koefisien korelasi (r) dan peluruhan gempa bumi susulan (t) dari kedua metode tersebut memiliki nilai berbeda dan diketahui jika metode Utsu merupakan metode yang lebih sesuai untuk menentukan waktu berakhirnya gempa bumi susulan untuk wilayah Bantul 30 Juni 2023.

Tabel 4. Nilai koefisien korelasi (r) untuk metode Mogi II dan Utsu.

Metode	Koefisien Korelasi (r)
Mogi II	-0.6372
Utsu	-0.7972

Penentuan prakiraan waktu berakhirnya gempa bumi susulan ini bermanfaat untuk meminimalisir dampak bencana yang mungkin ditimbulkan dari gempa bumi susulan seperti kerugian berupa kerusakan bangunan dan fasilitas umum serta korban jiwa. Upaya mitigasi yang dapat dilakukan oleh masyarakat yang terdampak yaitu dengan tetap waspada terhadap gempa bumi susulan yang mungkin akan terjadi, memperbarui informasi mengenai gempa bumi dari sumber resmi seperti BMKG sehingga tidak terpancing isu berita palsu mengenai gempa bumi susulan, serta memasang aplikasi gempa bumi dari BMKG

4. Kesimpulan

Waktu berakhirnya gempa bumi susulan pada gempa bumi Bantul 30 Juni 2023 berdasarkan metode Mogi II yaitu sekitar 30 hari dan untuk metode Utsu sekitar 36 hari pasca

gempa bumi utama terjadi**.** Metode yang mendekati hasil observasi untuk menentukan waktu berakhirnya gempa bumi susulan untuk gempa bumi Bantul 30 Juni 2023 adalah metode Utsu. Hasil peluruhan tersebut mendekati hasil observasi yang menyatakan jika gempa bumi susulan berakhir pada hari ke 32 pasca gempa bumi utama terjadi, yaitu pada tanggal 31 Juli 2023.

Saran

Dalam penentuan waktu berakhirnya gempa bumi susulan, hasil yang didapatkan belum begitu tepat, sehingga diperlukan penelitian dengan menggunakan metode lain agar hasil yang diperoleh dapat dibandingkan dengan hasil yang telah diteliti. Selain itu, plot peta gempa bumi utama dan distribusi gempa bumi susulan untuk dapat dianalisis pola distribusi gempa bumi susulan dengan gempa bumi utama.

Daftar Pustaka

[1] Edelani, R., Barakbah, A. R., Harsono, T., Sudarsono, A., "Association analysis of earthquake distribution in Indonesia for spatial risk mapping," *International Electronics Symposium on Knowledge Creation and Intelligent Computing (IES-KCIC)*, 2017, 231–238.

[2] Fitryanik, F., Susanta, Pratama, C., Aditya, T., Khomaini, A. F., Abdillah, H. W. K., "Geovisual Analytics of Spatio-Temporal Earthquake Data in Indonesia," *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, Vol.2, No. 2, 185-194, 2019.

[3] Sari, A. W., Jasruddin, Ihsan, N., "Analisis Rekahan Gempa Bumi Dan Gempa Bumi Susulan Dengan Menggunakan Metode Omori" *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 8, 3, 263-268, 2012.

[4] Pasau, G., Bobanto, M. D., Pandara, D. P., " Model Percepatan Tanah Maksimum Di Kota Manado Menggunakan Metode Donovan dan McGuire" *Jurnal MIPA Unsrat*, Vol. 1, 52-55, 2018.

[5] Husein S., Srijono., "Geomorfologi Daerah Isitmewa Yogyakarta.," *Prosiding Simposium Geologi Yogyakarta*, Universitas Gadjah Mada, 2010, 1-6.

[6] Vivi, N. i., Supardiyono, Perdana, Y. H., Setyahagi, A. R., "Analisis Peluruhan Gempa Bumi Susulan Di Ambon Tahun 2019 Dengan Pendekatan Statistik Menggunakan Software Peluruhan V2.0" *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, 9, 2, 163-172, 2020.

[7] Sugiono. *Statistika Untuk Penelitian*. Bandung: ALFABETA, 2007.