



Analisis Probabilitas Gempa Bumi di Pulau Jawa Menggunakan Model Markov Chain

Ghulam Ahmad Rifa'i¹, Triyana Muliawati², Danni Gathot Harbowo³

^{1,2}Program Studi Matematika, Institut Teknologi Sumatera

¹ghulam.120160085@student.itera.ac.id

²triyana.muliawati@ma.itera.ac.id

³Program Studi Teknik Geologi, Institut Teknologi Sumatera

³danni.gathot@gl.itera.ac.id

Corresponding author email: triyana.muliawati@ma.itera.ac.id

Abstract: Java Island, one of Indonesia's most seismically active regions, is prone to frequent and potentially large-scale earthquakes due to the subduction zone along its southern part. This study aims to analyze the probability of earthquake occurrences on Java Island using a Markov Chain Model, focusing on the timing, magnitude, and depth of the earthquakes. In this research, the states in the Markov Chain model were determined using K-Means Clustering. The results indicate that there are 3 states for the timing of earthquakes, 5 states for the depth, and 5 states for the magnitude. The results show that the highest transition probability for the timing of earthquakes from "Mid-Year" to "Mid-Year" is 98.84%, for the depth from "Shallow" to "Shallow" is 57.04%, and for the magnitude from "Weak" to "Very Strong" is 73.68%. These findings provide insights for predicting earthquake occurrences, which could contribute to risk mitigation and reduce the impact of earthquakes on Java Island.

Keywords: Markov Chain, K-Means Clustering, probability, earthquake

Abstrak: Pulau Jawa merupakan salah satu pulau di Indonesia yang sering mengalami gempa bumi dan berpotensi terjadinya gempa bumi berskala besar karena terdapat zona subduksi di sepanjang selatan pulau tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis probabilitas terjadinya gempa bumi di Pulau Jawa berdasarkan model *Markov Chain*, dengan fokus pada parameter waktu terjadinya gempa bumi, kekuatan gempa bumi, dan kedalaman gempa bumi. Pada penelitian ini, ruang keadaan pada model *Markov Chain* diperoleh dengan menggunakan *K-Means Clustering*. Diperoleh 3 ruang keadaan untuk waktu terjadinya gempa bumi, 5 ruang keadaan untuk kedalaman gempa bumi, dan 5 ruang keadaan untuk kekuatan gempa bumi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa probabilitas transisi terbesar untuk waktu kejadian gempa bumi pada “Tengah Tahun” ke waktu kejadian “Tengah Tahun” sebesar 98.84%, untuk kedalaman gempa bumi di kedalaman “Dangkal” ke kedalaman “Dangkal” sebesar 57.04%, dan untuk kekuatan gempa bumi dengan kekuatan “Lemah” ke kekuatan “Sangat Kuat” sebesar 73.68%. Hasil ini dapat memberikan wawasan untuk memprediksi terjadinya gempa bumi, yang dapat berkontribusi pada mitigasi risiko dan pengurangan dampak gempa bumi di Pulau Jawa.

Kata kunci: Markov Chain, K-Means Clustering, probabilitas, gempa bumi

I. PENDAHULUAN

Indonesia, secara geografis, terletak di pertemuan empat lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Eurasia. Keberadaan Indonesia di pertemuan lempeng-lempeng besar ini, ditambah dengan beberapa lempeng kecil lainnya, membuat negara ini memiliki potensi tinggi untuk sering mengalami gempa bumi. Pertemuan lempeng-lempeng tersebut dapat memicu gempa bumi dengan berbagai tingkat getaran. Kekuatan getaran bumi yang disebabkan oleh gempa bumi sangat bervariasi, mulai dari yang sangat lemah hingga yang sangat kuat, mencakup rentang yang tidak terasa hingga guncangan yang sangat hebat [1]. Dampak gempa bumi bergantung pada jenis dan magnitudonya, termasuk kemungkinan korban jiwa, orang yang hilang, cedera, kerusakan rumah, serta kerusakan fasilitas umum dan jalan-jalan. Gempa bumi dengan skala besar atau kekuatan tinggi dapat menyebabkan kerusakan dan bahaya yang signifikan bagi kehidupan manusia. Oleh karena itu, diperlukan penelitian mengenai kegempaan di wilayah-wilayah Indonesia yang sering mengalami gempa bumi.



Pulau Jawa, salah satu pulau di Indonesia, memiliki risiko gempa bumi yang cukup tinggi karena adanya zona subduksi di sepanjang wilayah selatannya [2]. Zona subduksi adalah area di mana lempeng tektonik bumi, baik lempeng samudra maupun lempeng benua, bertemu atau saling bertumbukan. Di wilayah Pulau Jawa, lempeng yang saling berbenturan adalah Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Proses tumbukan ini juga memicu terbentuknya gunung api di sepanjang zona subduksi [3], yang sering disebut sebagai wilayah *volcanic arc*. Aktivitas gempa bumi di sekitar zona subduksi, seperti di Selat Sunda [4, 5], sering disebut sebagai gempa bumi *Megathrust*. Zona subduksi Selat Sunda, atau Zona *Megathrust*, terbagi menjadi tiga zona besar, yaitu Andaman *Megathrust*, Sumatra *Megathrust*, dan Jawa *Megathrust*. Zona subduksi Pulau Jawa yang terbagi menjadi beberapa segmen memiliki tingkat kejadian dan kekuatan gempa bumi yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan Sumatra [6]. Meskipun demikian, sejarah mencatat beberapa gempa bumi besar di Pulau Jawa. Pada tahun 1903 dan 1921, terjadi gempa bumi di Jawa Barat dengan magnitudo lebih dari 7.5 [7]. Gempa bumi besar kembali terjadi dalam dua dekade terakhir, yaitu pada 17 Juli 2006 dengan magnitudo 7.8 yang menyebabkan tsunami di Pangandaran [8]. Gempa bumi besar juga mengguncang Pulau Jawa di wilayah Intraslub Tasikmalaya pada 2 September 2009, dengan magnitudo mencapai 6.8 [9]. Pada 10 April 2021, terjadi gempa bumi di Malang dengan magnitudo 6.1, yang mengakibatkan kerusakan di daerah sekitarnya [10]. Selain catatan sejarah gempa bumi besar, penelitian terbaru menunjukkan adanya potensi gempa berskala besar yang bisa menyebabkan tsunami di Zona *Megathrust* di Pulau Jawa. Diperkirakan wilayah Jawa Barat berisiko mengalami gempa *Megathrust* dengan magnitudo mencapai 8.9, yang dapat memicu tsunami setinggi 34 meter di pantai barat bagian selatan Sumatra serta di pantai selatan Jawa dekat Semenanjung Ujung Kulon [11]. Selain itu pada kondisi tertentu, getaran yang dihasilkan oleh gempa bumi turut dapat menyebabkan longsor [12].

Mengacu pada sejarah dan potensi gempa besar di Pulau Jawa, penelitian ini sangat penting untuk memahami kemungkinan terjadinya aktivitas gempa bumi selanjutnya di daerah tersebut. Parameter yang diperhatikan dalam penelitian ini meliputi waktu terjadinya gempa (hari dalam setahun), kedalaman (*depth*) gempa, dan kekuatan (*magnitude*) gempa. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *Markov Chain* dapat digunakan untuk menentukan peluang transisi pada amplitudo maksimum dan durasi aktivitas seismik pada data aktivitas Krakatau, pada penelitian tersebut ruang keadaan diperoleh dengan mengelompokkan masing-masing variabel menjadi beberapa kelompok dengan menggunakan *K-Means Clustering* [13]. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan digunakan *K-Means Clustering* untuk mengelompokkan ketiga parameter menjadi beberapa kelompok yang akan berfungsi sebagai ruang keadaan. Menentukan ruang keadaan sangat krusial karena akan digunakan dalam pembuatan Model *Markov Chain*, yang mencakup probabilitas transisi antar state, sehingga dapat diketahui peluang terjadinya aktivitas gempa bumi berikutnya di Pulau Jawa.

Pulau Jawa adalah wilayah pesisir di Indonesia yang sangat rentan terhadap gempa bumi, karena letaknya di zona subduksi di bagian selatan. Zona ini, yang juga dikenal sebagai Zona *Megathrust*, terjadi akibat pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, yang memicu aktivitas vulkanik dan gempa. Zona subduksi ini mencakup Andaman, Sumatra, dan Jawa. Sejarah mencatat sejumlah besar gempa bumi besar yang telah melanda Pulau Jawa, menimbulkan kerusakan signifikan di area sekitarnya. Penelitian terbaru menunjukkan adanya potensi gempa besar yang dapat memicu tsunami di Zona *Megathrust*. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk memahami potensi probabilitas terjadinya gempa bumi di Pulau Jawa, agar dapat lebih waspada menghadapi kemungkinan terjadinya gempa di masa depan.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Jenis dan Sumber Data

Terdapat berbagai jenis data yang digunakan dalam penelitian ini, salah satunya adalah data sekunder. Data sekunder ini berasal dari informasi yang tidak dikumpulkan langsung oleh peneliti, melainkan diambil dari sumber-sumber lain seperti individu atau dokumen [14]. Pada penelitian ini data yang digunakan diperoleh dari website resmi *United States Geological Survey* (USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) sebanyak 7117 data dengan batasan data yang diambil mulai dari 1 Januari 1990 hingga 31 Juli 2023 dengan koordinat titik latitude $[-12.139, -4.842]$ dan longitude $[103.491, 118.96]$.

2.2. Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan berbagai variabel yang didapat berdasarkan data aktivitas gempa bumi di Pulau Jawa. Variabel-variabel tersebut antara lain sebagai berikut.

1. x_1 : hari dalam tahun (waktu terjadinya gempa bumi)

Hari dalam tahun merupakan variabel yang berasal dari waktu terjadinya gempa bumi. Tanggal terjadinya gempa bumi diubah kedalam bentuk hari ke- t dalam tahun.

2. x_2 : *depth*

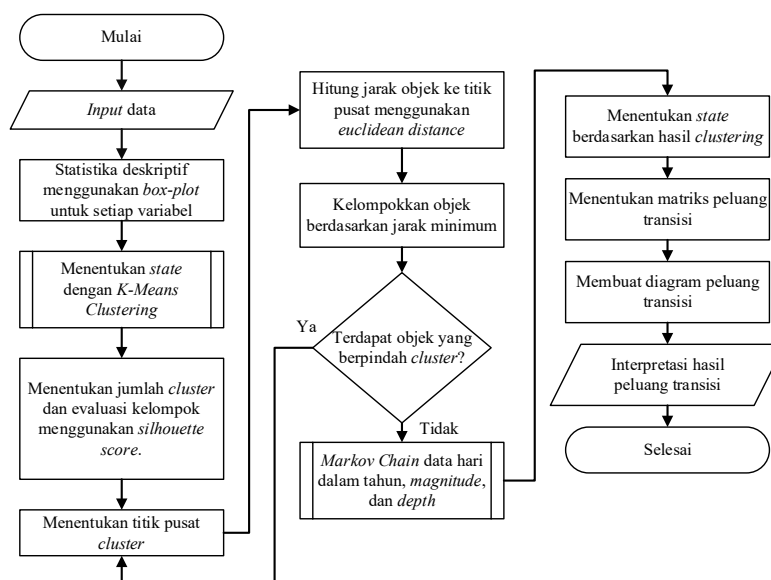
Depth merupakan variabel yang memberi informasi berupa titik kedalaman terjadinya gempa bumi.

3. x_3 : *magnitude*

Magnitude adalah ukuran besarnya kekuatan gempa bumi dari sumber terjadinya gempa.

2.3. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan beberapa langkah terstruktur untuk mendapatkan hasil dari masalah yang dianalisis. Langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan mengenai diagram alir pada Gambar 1.

1. Mulai;
2. *Input data* hari dalam tahun, *depth*, dan *magnitude*;
3. Statistika deskriptif dengan membuat *box-plot* untuk setiap variabel;



4. Menentukan *state* dengan menggunakan *K-Means Clustering*;

- Menentukan jumlah *cluster* pada masing-masing variabel;
Jumlah cluster pada penelitian ini disesuaikan dengan analisis statistika deskriptif dan klasifikasi gempa bumi berdasarkan kedalaman dan kekuatannya. Pada Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan klasifikasi gempa bumi berdasarkan kedalaman dan kekuatannya [15].

Tabel 1. Klasifikasi gempa bumi berdasarkan kedalaman

Kategori	Kedalaman
Gempa Dangkal (<i>Shallow</i>)	<70 km
Gempa Menengah (<i>Intermediate</i>)	70 – 300 km
Gempa Dalam (<i>Deep</i>)	>300 km

Tabel 2. Klasifikasi gempa bumi berdasarkan kekuatan

Kategori	Magnitudo Level
Gempa Bumi Mikro	< 1.0 – 2.9
Gempa Bumi Lemah	3.0 – 3.9
Gempa Bumi Sedang	4.0 – 4.9
Gempa Bumi Kuat	5.0 – 5.9
Gempa Bumi Sangat Kuat	6.0 – 6.9
Gempa Bumi Besar	7.0 – 7.9
Gempa Bumi Sangat Besar	≥8.0

Jumlah cluster yang telah ditentukan akan dievaluasi seberapa baik kelompok tersebut menggunakan *silhouette score* berdasarkan interpretasi pada Tabel 3. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung *silhouette score*.

$$s(i) = \frac{b(i)-a(i)}{\max\{b(i),a(i)\}} \quad (1)$$

$$a(i) = \frac{1}{|A|-1} \sum_{A,j \neq i} d(i,j) \quad (2)$$

$$b(i) = \min_{A \neq c} d(i,c) \quad (3)$$

$$d(i,c) = \frac{1}{|A|} \sum_{j \in c} d(i,j) \quad (4)$$

dengan $s(i)$ adalah *silhouette score* objek ke- i , $a(i)$ adalah rata-rata jarak antara objek ke- i dan objek dalam kelompok yang sama, j merepresentasikan titik data lain di cluster A , $b(i)$ adalah rata-rata jarak antara objek ke- i dan objek dalam kelompok tetangga terdekat yang berbeda, $d(i,j)$ adalah jarak antara objek ke- i dan ke- j , dan $d(i,c)$ adalah jarak rata-rata antara objek ke- i dengan seluruh objek di *cluster* c .

Tabel 3. Interpretasi *silhouette score*

<i>Silhouette score</i>	Interpretasi
0.71 – 1.00	Kelompok data terpisah dengan sangat baik
0.51 – 0.70	Kelompok data terpisah dengan cukup baik
0.26 – 0.50	Pembagian antar kelompok data kurang baik
≤ 0.25	Tidak terdapat pembagian yang signifikan antar kelompok data.

- Menentukan titik pusat *cluster* atau *centroid* untuk masing-masing variabel;
- Menghitung jarak tiap objek ke titik pusat *cluster*. Pada penelitian ini jarak dihitung menggunakan persamaan *euclidean distance* seperti pada Persamaan 5.

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

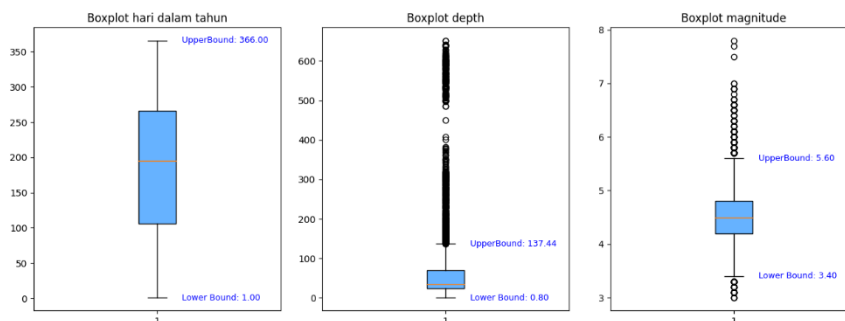
dengan d adalah *euclidean distance*, x_i adalah objek x ke- i , y_i adalah pusat y ke- i , dan n adalah banyaknya objek.

- Kelompokkan objek ke dalam kelompok berdasarkan jarak minimum;
 - Setelah melakukan pengelompokkan sebanyak 2 iterasi, jika tidak terdapat objek yang berpindah kelompok, maka iterasi dapat dihentikan. Jika hasil pengelompokkan masih menemukan adanya objek yang berpindah kelompok, maka iterasi tetap berlanjut.
5. *Markov Chain* untuk masing-masing variabel;
 - Menentukan *state* berdasarkan hasil *Clustering*;
 - Menentukan matriks peluang transisi untuk masing-masing variabel;
 - Membuat visualisasi diagram peluang transisi untuk masing-masing variabel;
 6. Interpretasi hasil berdasarkan model *Markov Chain* yang terbentuk;
 7. Selesai.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Statistika Deskriptif

Statistika deskriptif digunakan untuk mengetahui karakteristik dan gambaran umum mengenai data yang akan digunakan. *Box-plot* dapat digunakan untuk memvisualisasikan karakteristik seperti *mean*, *median*, nilai maksimum, nilai minimum, dan *outliers* dari data. Suatu data dapat disebut sebuah *outlier* jika data berada di luar *upper bound* atau *lower bound*. Pada penelitian ini data *ouliers* dan data *nonouliers* akan dilakukan pengelompokkan secara terpisah.



Gambar 2. Box-plot untuk masing-masing variabel

Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa variabel hari dalam tahun tidak memiliki data *outliers*, sedangkan data *depth* dan *magnitude* terdapat data *ouliers*. Berikut pada Tabel 4 merupakan resume numerik dari setiap variabel berdasarkan *box-plot*.

Tabel 4. Resume numerik untuk masing-masing variabel

Variabel	Nilai Minimum	Median	Mean	Nilai Maksimum	Outliers
Hari dalam tahun	1	195	187.13	366	0
<i>Depth</i>	0.8	35.0	67.87	652.2	742
<i>Magnitude</i>	3.0	4.5	4.52	7.8	195

3.2. Menentukan *State* dengan menggunakan *K-Means Clustering*

3.2.1. Menentukan Jumlah *Cluster*

- Hari dalam tahun

Pada variabel hari dalam tahun tidak terdapat data *outliers*, sehingga data akan dikelompokkan secara keseluruhan. Variabel hari dalam tahun akan dikelompokkan menjadi 3 *cluster* dengan *silhouette score*



sebesar 0.597. Berdasarkan Tabel 3, diperoleh kesimpulan bahwa kelompok data terpisah dengan cukup baik.

- *Depth*

Pada data *depth* ditemukan adanya data *outliers*, sehingga akan dilakukan pengelompokan secara terpisah antara data *outliers* dan data *nonoutliers*. Berdasarkan resume numerik dan *box-plot*, dapat diketahui bahwa data *nonoutliers* berada di rentang nilai 0.8 hingga 137.44. Berdasarkan Tabel 1, rentang nilai tersebut masuk dalam kategori gempa dangkal dan gempa menengah, namun ditemukan data dengan kedalaman yang sangat dangkal. Oleh karena itu, untuk data *nonoutliers depth* akan dikelompokkan menjadi 3 kelompok. Sedangkan untuk data *outliers*, jika dilihat berdasarkan resume numerik dan *box-plot*, diketahui bahwa nilainya berada di rentang 137.44 hingga 652.2. Berdasarkan Tabel 1, rentang tersebut masuk dalam kategori gempa menengah dan gempa dalam namun ditemukan adanya gempa dengan kedalaman yang sangat dalam, sehingga untuk data *outliers depth* akan dikelompokkan menjadi 2 kelompok. Data *nonoutlier* yang akan dikelompokkan menjadi 3 kelompok memiliki *silhouette score* sebesar 0.659, artinya kelompok data terpisah dengan cukup baik. Sedangkan data *outliers* yang akan dikelompokkan menjadi 2 kelompok memiliki *silhouette score* sebesar 0.804, artinya kelompok data terpisah dengan sangat baik.

- *Magnitude*

Pada data *magnitude* ditemukan terdapat data *outliers*, sehingga akan dilakukan pengelompokan secara terpisah antara data *outliers* dan data *nonoutliers*. Berdasarkan resume numerik dan *box-plot*, dapat diketahui bahwa data *nonoutliers* berada di rentang nilai 3.4 hingga 5.6. Berdasarkan Tabel 2, rentang nilai tersebut masuk dalam kategori gempa lemah, sedang, dan kuat. Oleh karena itu, untuk data *nonoutliers* akan dikelompokkan menjadi 2 kelompok. Sedangkan untuk data *outliers*, jika dilihat berdasarkan resume numerik dan *box-plot*, diketahui bahwa nilainya berada di rentang 3.0 hingga 3.4 dan 5.6 hingga 7.8. Berdasarkan Tabel 2, rentang tersebut masuk dalam kategori gempa kuat, sangat kuat, dan besar, sehingga untuk data *outliers* akan dikelompokkan menjadi 3 kelompok. Data *nonoutlier* yang akan dikelompokkan menjadi 2 kelompok memiliki *silhouette score* sebesar 0.5489, artinya kelompok data terpisah dengan cukup baik. Sedangkan data *outliers* yang akan dikelompokkan menjadi 2 kelompok memiliki *silhouette score* sebesar 0.759, artinya kelompok data terpisah dengan sangat baik.

3.2.2. Pengelompokan menggunakan *K-Means Clustering*

- Hari dalam tahun

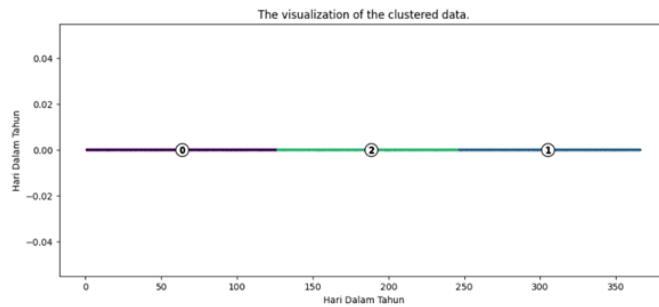
Centroid awal yang dipilih untuk mengelompokkan hari dalam tahun menjadi 3 kelompok yaitu data gempa bumi pada tanggal 25 Mei 2013 atau hari ke-145 sebagai C1, 19 Agustus 2018 atau hari ke-231 sebagai C2, dan 5 Desember 2014 atau hari ke-339 sebagai C3. Ketiga *centroid* awal tersebut akan digunakan untuk menghitung jarak setiap data terhadap *centroid cluster* dan mengelompokkan data berdasarkan jarak yang paling minimum.

Tabel 5. *Centroid* data hari dalam tahun

Iterasi	C1 (<i>Centroid</i> 1)	C2 (<i>Centroid</i> 2)	C3 (<i>Centroid</i> 3)
0	145	231	339
1	98.89	230.03	325.39
2	98.89	230.03	325.39



Berdasarkan Tabel 5, nilai centroid untuk iterasi 1 dan 2 bernilai sama, sehingga iterasi dihentikan pada iterasi 2. Berikut pada Gambar 3 merupakan visualisasi hasil pengelompokkan hari dalam tahun.



Gambar 3. Visualisasi hasil pengelompokkan hari dalam tahun

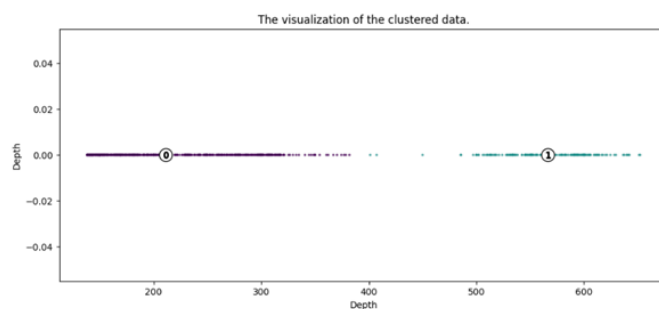
• *Depth*

Centroid awal yang dipilih untuk mengelompokkan data *outliers depth* menjadi 2 kelompok yaitu data gempa bumi pada tanggal 5 Mei 2004 dengan kedalaman 255.2 KM (C1) dan data tanggal 12 Desember 2010 dengan kedalaman 545 KM (C2). Selanjutnya kedua *centroid* awal tersebut akan digunakan untuk menghitung jarak setiap data terhadap *centroid cluster* dan mengelompokkan data berdasarkan jarak yang paling minimum.

Tabel 6. *Centroid data outliers depth*

Iterasi	C1 (<i>Centroid 1</i>)	C2 (<i>Centroid 2</i>)
0	255.2	545
1	211.02	566.48
2	211.02	566.48

Berdasarkan Tabel 6, nilai *centroid* untuk iterasi 1 dan 2 bernilai sama, sehingga iterasi dihentikan pada iterasi 2. Berikut pada Gambar 4 merupakan visualisasi hasil pengelompokkan data *outliers depth*.



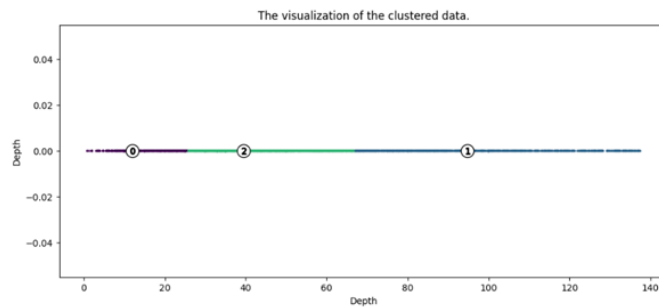
Gambar 4. Visualisasi hasil pengelompokkan data *outliers depth*

Data *nonoutliers* yang akan dikelompokkan menjadi 3 kelompok akan menggunakan 3 *centroid* awal, dipilih data gempa bumi pada tanggal 26 Juli 2023 dengan kedalaman 10 KM sebagai C3, data pada tanggal 06 Januari 2008 dengan kedalaman gempa 29.8 KM sebagai C4, dan data 25 November 2013 dengan kedalaman 71.3 KM sebagai C5. Berikut pada Tabel 7 merupakan *centroid data nonoutliers depth* dan Gambar 5 merupakan visualisasi hasil pengelompokkannya.



Tabel 7. Centroid data *nonoutliers depth*

Iterasi	C3 (Centroid 3)	C4 (Centroid 4)	C5 (Centroid 5)
0	10	29.8	71.3
1	10.59	34.72	82.50
2	10.59	34.72	82.50



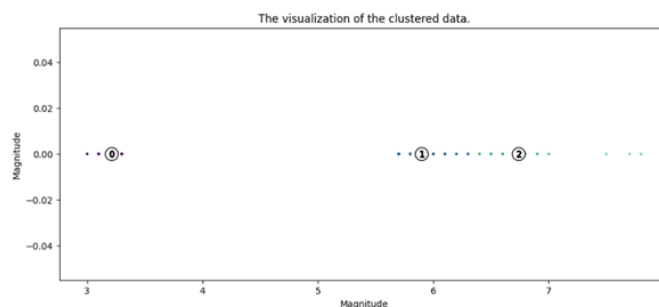
Gambar 5. Visualisasi hasil pengelompokan data *nonoutliers depth*

• *Magnitude*

Magnitude akan dilakukan pengelompokan secara terpisah antara data *outliers* dan data *nonoutliers*. *Centroid* awal yang dipilih untuk mengelompokkan data *outliers magnitude* menjadi 3 kelompok yaitu data gempa bumi pada tanggal 30 April 2013 dengan magnitudo 3 sebagai C1, data pada tanggal 10 Juni 2023 dengan magnitudo 5.8 sebagai C2, dan data 19 Oktober 2016 dengan magnitudo 6.6 sebagai C3. Ketiga *centroid* awal tersebut akan digunakan untuk menghitung jarak setiap data terhadap *centroid cluster* dan mengelompokkan data berdasarkan jarak yang paling minimum. Berikut pada Tabel 8 merupakan *centroid* data *outliers magnitude* dan Gambar 6 merupakan visualisasi hasil pengelompokkannya.

Tabel 8. Centroid data *outliers magnitude*

Iterasi	C1 (Centroid 1)	C2 (Centroid 2)	C3 (Centroid 3)
0	3	5.8	6.6
1	3.21	5.87	6.62
2	3.21	5.87	6.62

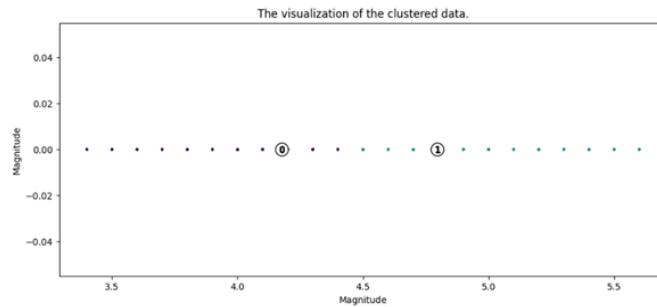


Gambar 6. Visualisasi hasil pengelompokkan data *outliers magnitude*

Data *nonoutliers* yang akan dikelompokkan menjadi 2 kelompok akan menggunakan 2 *centroid* awal, dipilih *centroid* untuk C4 adalah data pada tanggal 08 Juli 2023 dengan magnitudo 4.4 dan untuk C5 adalah data pada tanggal 13 Mei 1990 dengan magnitudo 4.5. Berikut pada Tabel 9 merupakan *centroid* data *nonoutliers magnitude* dan Gambar 7 merupakan visualisasi hasil pengelompokkannya.

Tabel 9. Centroid data nonoutliers magnitude

Iterasi	C4 (Centroid 4)	C5 (Centroid 5)
0	4.4	4.5
1	4.18	4.80
2	4.18	4.80



Gambar 7. Visualisasi hasil pengelompokan data nonoutliers magnitude

3.3. Markov Chain untuk masing-masing variabel

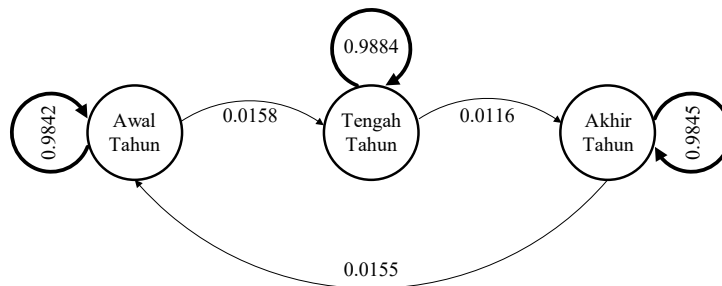
3.3.1. Hari dalam tahun

State yang diperoleh berdasarkan hasil pengelompokan menggunakan *K-Means Clustering* adalah sebagai berikut.

- *State-1*: Ruang keadaan dengan rentang waktu “Awal Tahun” yaitu pada hari ke $1 \leq x_1 \leq 127$.
- *State-2*: Ruang keadaan dengan rentang waktu “Tengah Tahun” yaitu pada hari ke $128 \leq x_1 \leq 248$.
- *State-3*: Ruang keadaan dengan rentang waktu “Akhir Tahun” yaitu pada hari ke $249 \leq x_1 \leq 366$.

Selanjutnya menentukan matriks peluang transisi antar *state* yang kemudian akan divisualisasikan ke dalam diagram peluang transisi.

$$P_H = \begin{bmatrix} 0.9842 & 0.0158 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.9884 & 0.0116 \\ 0.0155 & 0.0000 & 0.9845 \end{bmatrix}$$



Gambar 8. Diagram peluang transisi hari dalam tahun

Berdasarkan Gambar 8 diperoleh interpretasi hasil sebagai berikut.

- Jika hari ini terjadi gempa bumi di ruang keadaan “Awal Tahun”, maka peluang terjadinya gempa bumi besok dengan waktu kejadian pada “Awal Tahun” adalah 98.42%, dengan waktu kejadian pada “Tengah Tahun” adalah 1.58%, dan dengan waktu kejadian pada “Akhir Tahun” adalah 0%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi di ruang keadaan “Tengah Tahun”, maka peluang terjadinya gempa bumi besok dengan waktu kejadian pada “Awal Tahun” adalah 0%, dengan waktu kejadian pada “Tengah Tahun” adalah 98.84%, dan dengan waktu kejadian pada “Akhir Tahun” adalah 1.16%.



- Jika hari ini terjadi gempa bumi di ruang keadaan “Akhir Tahun”, maka peluang terjadinya gempa bumi besok dengan waktu kejadian pada “Awal Tahun” adalah 1.55%, dengan waktu kejadian pada “Tengah Tahun” adalah 0%, dan dengan waktu kejadian pada “Akhir Tahun” adalah 98.45%.

Selanjutnya menentukan matriks peluang transisi antar *state* yang kemudian akan divisualisasikan ke dalam diagram peluang transisi.

3.3.2. Depth

State yang diperoleh berdasarkan hasil pengelompokan menggunakan *K-Means Clustering* adalah sebagai berikut.

- *State-1*: Ruang keadaan dengan kedalaman “Sangat Dangkal” yaitu di kedalaman $0.8 \leq x_2 < 26$.
- *State-2*: Ruang keadaan dengan kedalaman “Dangkal” yaitu di kedalaman $26 \leq x_2 < 67.7$.
- *State-3*: Ruang keadaan dengan kedalaman “Menengah” yaitu di kedalaman $67.7 \leq x_2 < 138.1$.
- *State-4*: Ruang keadaan dengan kedalaman “Dalam” yaitu di kedalaman $138.1 \leq x_2 < 401.3$.
- *State-5*: Ruang keadaan dengan kedalaman “Sangat Dalam” yaitu di kedalaman $401.3 \leq x_2 < 653$.

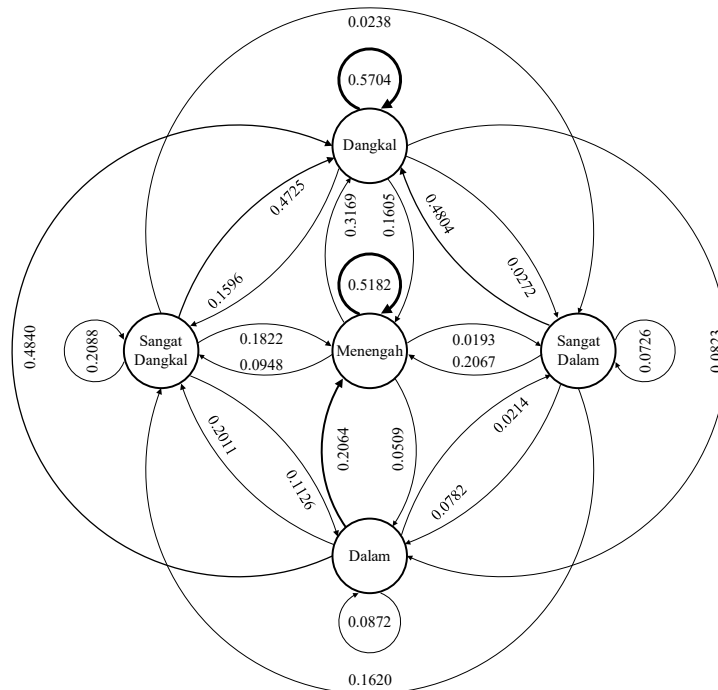
Selanjutnya menentukan matriks peluang transisi antar *state* yang kemudian akan divisualisasikan ke dalam diagram peluang transisi.

$$P_D = \begin{bmatrix} 0.2088 & 0.4725 & 0.1822 & 0.1126 & 0.0238 \\ 0.1596 & 0.5704 & 0.1605 & 0.0823 & 0.0272 \\ 0.0948 & 0.3169 & 0.5182 & 0.0509 & 0.0193 \\ 0.2011 & 0.4840 & 0.2064 & 0.0872 & 0.0214 \\ 0.1620 & 0.4804 & 0.2067 & 0.0782 & 0.0726 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Gambar 9 diperoleh interpretasi hasil sebagai berikut.

- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan kedalaman di ruang keadaan “Sangat Dangkal”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan kedalaman “Sangat Dangkal” adalah 20.88%, dengan kedalaman “Dangkal” adalah 47.25%, dengan kedalaman “Menengah” adalah 18.22%, dengan kedalaman “Dalam” adalah 11.26%, dan dengan kedalaman “Sangat Dalam” adalah 2.38%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan kedalaman di ruang keadaan “Dangkal”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan kedalaman “Sangat Dangkal” adalah 15.96%, dengan kedalaman “Dangkal” adalah 57.04%, dengan kedalaman “Menengah” adalah 16.05%, dengan kedalaman “Dalam” adalah 8.23%, dan dengan kedalaman “Sangat Dalam” adalah 2.72%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan kedalaman di ruang keadaan “Menengah”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan kedalaman “Sangat Dangkal” adalah 9.48%, dengan kedalaman “Dangkal” adalah 31.69%, dengan kedalaman “Menengah” adalah 51.82%, dengan kedalaman “Dalam” adalah 5.09%, dan dengan kedalaman “Sangat Dalam” adalah 1.93%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan kedalaman di ruang keadaan “Dalam”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan kedalaman “Sangat Dangkal” adalah 20.11%, dengan kedalaman “Dangkal” adalah 48.40%, dengan kedalaman “Menengah” adalah 20.64%, dengan kedalaman “Dalam” adalah 8.72%, dan dengan kedalaman “Sangat Dalam” adalah 2.14%.

- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan kedalaman di ruang keadaan “Sangat Dalam”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan kedalaman “Sangat Dangkal” adalah 16.20%, dengan kedalaman “Dangkal” adalah 48.04%, dengan kedalaman “Menengah” adalah 20.67%, dengan kedalaman “Dalam” adalah 7.82%, dan dengan kedalaman “Sangat Dalam” adalah 7.26%.



Gambar 9. Diagram peluang transisi *depth*

3.3.3. Magnitude

State yang diperoleh berdasarkan hasil pengelompokkan menggunakan *K-Means Clustering* adalah sebagai berikut.

- *State-1*: Ruang keadaan dengan magnitudo “Lemah” dengan rentang nilainya $3 \leq x_3 < 3.4$.
- *State-2*: Ruang keadaan dengan magnitudo “Sedang” dengan rentang nilainya $3.4 \leq x_3 < 4.5$.
- *State-3*: Ruang keadaan dengan magnitudo “Kuat” dengan rentang nilainya $4.5 \leq x_3 < 5.7$.
- *State-4*: Ruang keadaan dengan magnitudo “Sangat Kuat” dengan rentang nilainya $5.7 \leq x_3 < 6.4$.
- *State-5*: Ruang keadaan dengan magnitudo “Besar” dengan rentang nilainya $6.4 \leq x_3 < 7.9$.

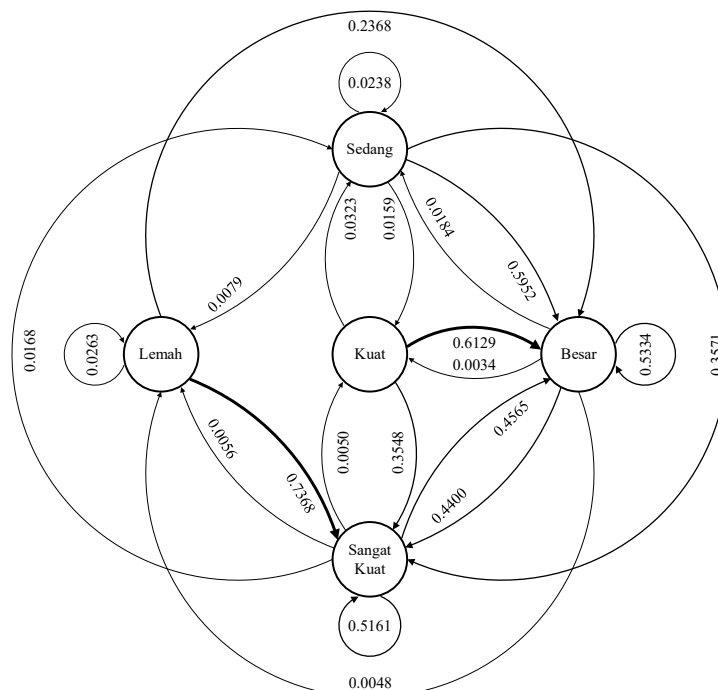
Selanjutnya menentukan matriks peluang transisi antar *state* yang kemudian akan divisualisasikan ke dalam diagram peluang transisi.

$$P_M = \begin{bmatrix} 0.0263 & 0.0000 & 0.0000 & 0.7368 & 0.2368 \\ 0.0079 & 0.0238 & 0.0159 & 0.3571 & 0.5952 \\ 0.0000 & 0.0323 & 0.0000 & 0.3548 & 0.6129 \\ 0.0056 & 0.0168 & 0.0050 & 0.5161 & 0.4565 \\ 0.0048 & 0.0184 & 0.0034 & 0.4400 & 0.5334 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Gambar 10 diperoleh interpretasi hasil sebagai berikut.

- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan magnitudo di ruang keadaan “Lemah”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo “Lemah” adalah 2.63%, dengan magnitudo “Sedang” adalah 0%, dengan magnitudo “Kuat” adalah 0%, dengan magnitudo “Sangat Kuat” adalah 73.68%, dan dengan magnitudo “Besar” adalah 23.68%.

- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan magnitudo di ruang keadaan “Sedang”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo “Lemah” adalah 0.79%, dengan magnitudo “Sedang” adalah 2.38%, dengan magnitudo “Kuat” adalah 1.59%, dengan magnitudo “Sangat Kuat” adalah 35.71%, dan dengan magnitudo “Besar” adalah 59.52%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan magnitudo di ruang keadaan “Kuat”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo “Lemah” adalah 0%, dengan magnitudo “Sedang” adalah 3.23%, dengan magnitudo “Kuat” adalah 0%, dengan magnitudo “Sangat Kuat” adalah 35.48%, dan dengan magnitudo “Besar” adalah 61.29%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan magnitudo di ruang keadaan “Sangat Kuat”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo “Lemah” adalah 0.56%, dengan magnitudo “Sedang” adalah 1.68%, dengan magnitudo “Kuat” adalah 0.50%, dengan magnitudo “Sangat Kuat” adalah 51.61%, dan dengan magnitudo “Besar” adalah 45.65%.
- Jika hari ini terjadi gempa bumi dengan magnitudo di ruang keadaan “Besar”, maka peluang terjadinya gempa bumi dengan magnitudo “Lemah” adalah 0.48%, dengan magnitudo “Sedang” adalah 1.84%, dengan magnitudo “Kuat” adalah 0.34%, dengan magnitudo “Sangat Kuat” adalah 44.00%, dan dengan magnitudo “Besar” adalah 53.34%.



Gambar 10. Diagram peluang transisi *magnitudo*

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa pada aktivitas gempa bumi di Pulau Jawa, analisis menggunakan model *Markov Chain* menunjukkan variasi dalam peluang transisi berdasarkan diagram transisi peluang. Berdasarkan waktu terjadinya gempa bumi atau hari dalam tahun, diketahui peluang transisi tertinggi adalah peralihan kejadian gempa bumi pada "Tengah Tahun" ke "Tengah Tahun" dengan persentase sebesar 98,84%. Berdasarkan *depth* atau kedalamannya, peluang transisi terbesar terjadi saat peralihan dari kejadian gempa bumi di kedalaman "Dangkal" ke kedalaman "Dangkal" yaitu sebesar 57,04%. Sementara itu, untuk *magnitudo* atau kekuatan gempa, peluang transisi



tertinggi ditemukan pada peralihan dari kejadian gempa bumi dengan kekuatan "Lemah" ke kekuatan "Sangat Kuat" dengan persentase sebesar 73,68%.

REFERENSI

1. F. Reviantika, C. N. Harahap and Y. A. Azhar, "Analisis Gempa Bumi Pada Pulau Jawa Menggunakan Clustering Algoritma K-Means," *Jurnal Dinamika Informatika* Volume 9, No 1, pp. 51-60, 2020.
2. F. Trisnisa, R. Metrikasari, R. Rabbanie, K. Sakdiyah and A. Choiruddin, "Model Inhomogeneous Spatial Cox Processes Untuk Pemetaan Risiko Gempabumi di Pulau Jawa," *INFERENSI* Vol. 2 (2), pp. 107-111, 2019.
3. T. Muliawati and D. G. Harbowo, "A Statistical review of the dates and patterns of volcanic activity of Lewotolo Volcano, East Nusa Tenggara, Indonesia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1245, no. 1, p. 012006, 2023.
4. D. G. Harbowo, "An assessment of the scientific value of Krakatoa, Indonesia from a geoheritage perspective," *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 11-25, 2023.
5. H. C. Natalia, D. G. Harbowo and R. Ikhrum, "Potensi Geodiversity di Sekitar Kawasan Anak Krakatau-Way Kambas, Provinsi Lampung, Sebagai Kandidat Geopark Indonesia," *Journal of Science and Applicative Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 47-57, 2021.
6. Tim Pusat Studi Gempa Nasional, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017.
7. Newcomb, K. R. and McCann, W. R., "Seismic history and seismotectonics of the Sunda Arc," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, p. 421, 1987.
8. Y. Fujii and K. Satake, "Source of the July 2006 West Java tsunami estimated from tide gauge records," *Geophysical Research Letters*, p. 33, 2006.
9. E. Gunawan, S. Widiyantoro, G. I. Marliyani, E. Sunarti, R. Ida and A. R. Gusman, "Fault source of the 2 September 2009 Mw 6.8 Tasikmalaya intraslab earthquake, Indonesia: Analysis from GPS data inversion, tsunami height simulation, and stress transfer," *Physics of the Earth and Planetary Interiors* Vol. 291, p. 54, 2019.
10. N. K. Praja, Supartoyo and A. Omang, "Gempa Bumi Merusak Jawa Timur Selatan 10 April 2021," *Jurnal Geominerba*, pp. 136-149, 2021.
11. P. Supendi, S. Widiyantoro, N. Rawlinson, T. Yatimantoro, A. Muhari, N. R. Hanifa, E. Gunawan, H. A. Shiddiqi, I. Imran, S. D. Anugrah, D. Daryono, B. S. Prayitno, S. P. Adi, D. Karnawati, L. Faizal and R. Damanik, "On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis of the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia," *Natural Hazards*, pp. 1315-1328, 2023.
12. L. K. Kristi, R. Setiawan, D. G. Harbowo, B. Alfarishi and D. Raditio, "Determine of Potential Evacuation Locations as Disaster Mitigation Against Landslides," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1209, no. 1, p. 012006, 2023.
13. D. G. Harbowo and T. Muliawati, "State transition matrix and Markov-chain diagram for frequent volcanic eruptions: Krakatoaa, Indonesia," *E3S Web of Conferences*, vol. 479, p. 02005, 2024.
14. F. Hikmawati, *Metodologi Penelitian*, Depok: PT rajaGrafindo Persada, 2020.
15. Sunarjo, M. T. Gunawan and S. Pribadi, *Gempa Bumi Edisi Populer 2nd Edition*, Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2012.