

Solusi Numerik Teorema Probabilitas Total Gempa Menggunakan Komputasi Sekuensial dengan (VBA)

Reza Agung Gumelar *, Sutawanir Darwis

Prodi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Bandung, Indonesia.

rezaagung1933@gmail.com, sutawanir.darwis@unisba.ac.id

Abstract. Earthquakes are natural phenomena mentioned in the Qur'an as signs of Allah's power and have significant impacts on human life. One of the regions vulnerable to earthquakes is Pelabuhanratu, which has a history of high seismic activity and complex geological conditions. Therefore, seismic hazard analysis is essential to identify potential threats and mitigate possible impacts. This study aims to apply a numerical solution using the sequential earthquake point method to solve the Teorema Probabilitas Total by Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). This method allows for the observation of the significance of each earthquake point in its contribution to the total seismic hazard. Using Visual Basic for Applications (VBA), this study developed a program to automate PSHA calculations more efficiently and accurately. The results show that in Pelabuhanratu, the Peak Ground Acceleration (PGA) value of 0.22g occurs 0.00022 times per year, with the eighth curve representing the entire dataset. The one-dimensional sequential approach proves to be an efficient and accurate numerical solution for PSHA calculations using the Hazard integral model. The implementation of this method is expected to improve the accuracy of seismic hazard analysis and assist in more effective disaster mitigation planning.

Keywords: *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), Sequential Computation, Visual Basic for Applications (VBA), Earthquake.*

Abstrak. Gempa bumi merupakan fenomena alam yang disebutkan dalam Al-Qur'an sebagai tanda kekuasaan Allah SWT serta memiliki dampak yang signifikan terhadap kehidupan manusia. Salah satu wilayah yang rentan terhadap bencana gempa bumi adalah Pelabuhanratu, yang memiliki sejarah aktivitas seismik yang tinggi dan kondisi geologi yang kompleks. Oleh karena itu, analisis bahaya gempa sangat penting untuk mengidentifikasi potensi ancaman dan memitigasi dampak yang mungkin terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan solusi numerik dengan metode sekuensial titik gempa dalam penyelesaian Teorema Probabilitas Total dengan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Metode ini memungkinkan pengamatan signifikansi setiap titik gempa dalam kontribusinya terhadap bahaya seismik total. Dengan menggunakan Visual Basic for Applications (VBA), penelitian ini mengembangkan program untuk mengotomatisasi perhitungan PSHA secara lebih efisien dan akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada gempa Pelabuhanratu, nilai Peak Ground Acceleration (PGA) sebesar 0.22g terjadi sebanyak 0.00022 kali dalam setahun, dengan kurva ke-8 yang telah mewakili nilai seluruh data. Pendekatan sekuensial satu dimensi terbukti sebagai solusi numerik yang efisien dan akurat dalam perhitungan PSHA dengan model Integral Hazard. Implementasi metode ini diharapkan dapat meningkatkan ketepatan analisis bahaya gempa dan membantu dalam perencanaan mitigasi bencana yang lebih efektif.

Kata Kunci: *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), Komputasi Sekuensial, Visual Basic for Application (VBA), Gempa Bumi.*

A. Pendahuluan

Gempa bumi, sebagai fenomena alam yang dahsyat, merupakan bagian dari tanda-tanda kekuasaan Allah SWT yang disebutkan dalam Al-Qur'an. Al-Qur'an menggambarkan gempa bumi dalam berbagai konteks, mulai dari peringatan hingga azab bagi kaum yang mendustakan rasul-Nya. Sebagaimana yang dijelaskan dalam QS. Al-Zalzalah ayat 1-2 yaitu:

إِذَا زُلْزِلَتِ الْأَرْضُ زِلْزَالَةً وَأَخْرَجَتِ الْأَرْضُ أَثْقَالَهَا

Artinya:

“apabila bumi digoncangkan dengan guncangan (yang dahsyat), dan bumi telah mengeluarkan beban-beban berat (yang dikandung)nya”.

Surat Az-Zalzalah secara khusus menggambarkan dahsyatnya guncangan bumi pada hari kiamat, di mana bumi diguncangkan sehebat-hebatnya dan mengeluarkan isinya. Ayat-ayat ini memberikan pemahaman bahwa gempa bumi merupakan fenomena alam yang berada di bawah kendali Allah SWT, dan dapat berfungsi sebagai peringatan, ujian, maupun azab bagi manusia. Dari sudut pandang analisis bahaya, gempa bumi menimbulkan berbagai dampak merusak. Guncangan yang dihasilkan dapat merobohkan bangunan, jembatan, dan infrastruktur lainnya, menyebabkan korban jiwa dan kerugian ekonomi yang besar. Pelabuhanratu, dengan sejarah gempa bumi yang signifikan dan kondisi geologi yang kompleks, merupakan wilayah yang rentan terhadap bencana gempa bumi, hal ini dibuktikan berdasarkan data USGS wilayah Pelabuhanratu rentang waktu 1974 – 2024 dengan total kejadian gempa sebanyak 301 kejadian. Sehingga analisis bahaya gempa penting untuk dilakukan untuk mengidentifikasi potensi ancaman, memprediksi dampak yang mungkin terjadi, dan merencanakan upaya mitigasi dan kesiapsiagaan untuk mengurangi risiko bencana.

Analisis bahaya gempa merupakan langkah krusial dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi. Menurut Else (2017) secara umum analisis dengan menggunakan pendekatan probabilistik dianggap lebih rasional dibandingkan dengan analisis deterministik. Namun, perhitungan Integral Hazard dalam PSHA tidak dapat diselesaikan secara analitik (Makrup et al. 2015). Makrup et al. (2015) mengembangkan solusi numerik untuk menyelesaikan integral hazard melalui pengolahan titik gempa secara serentak, semua titik gempa diolah secara bersamaan. Dengan pengolahan serempak tidak dapat diamati pengaruh titik gempa dalam penentuan Seismic Hazard. Pengolahan serempak memberikan hasil tidak seperti yang diharapkan; diharapkan kurva Seismic Hazard monoton turun. Skripsi ini menerapkan solusi numerik dengan metode makrup yaitu metode sekuensial titik gempa untuk menyelesaikan integral Hazard berdasarkan urutan jarak titik gempa terhadap site (Pelabuhanratu) yang diteliti. Melalui proses sekuensial akan dapat diamati signifikansi efek penambahan titik gempa dalam plot integral Hazard. Plot Seismic Hazard diharapkan turun monoton. Komputasi Sekuensial dalam Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) melibatkan pemrosesan serangkaian perhitungan secara berurutan melalui proyeksi titik gempa terhadap koordinat Latitude (lintang). Melalui proyeksi terhadap koordinat lintang, permasalahan komputasi PSHA menjadi permasalahan satu dimensi. Hal ini mempermudah penelitian penyelesaian numerik secara sekuensial. Teorema probabilitas total digunakan dalam setiap langkah komputasi untuk memperbarui estimasi tingkat bahaya seismik berdasarkan informasi baru yang diperoleh dari analisis sumber gempa bumi dan skenario gempa bumi.

Seperti yang telah dijelaskan, integral hazard dalam PSHA umumnya tidak dapat diselesaikan secara analitik dan membutuhkan metode numerik. Salah satu pendekatan yang efektif untuk mengimplementasikan metode numerik ini adalah dengan menggunakan Visual Basic for Application (VBA) dalam perangkat lunak seperti Microsoft Excel. VBA menyediakan lingkungan pemrograman yang terintegrasi yang memungkinkan otomatisasi perhitungan kompleks dan visualisasi data. Dengan memanfaatkan kemampuan VBA, perhitungan PSHA yang kompleks dan iteratif dapat diselesaikan dengan lebih efisien dan akurat. Metode sekuensial yang diimplementasikan dengan VBA memungkinkan pengamatan yang lebih detail terhadap kontribusi setiap titik gempa terhadap hazard seismik total, sehingga memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kerawanan gempa di wilayah yang diteliti.

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan solusi numerik dengan metode makrup yang efisien dan akurat untuk integral Hazard dalam Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) menggunakan komputasi sekuensial, dengan harapan dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi perhitungan bahaya seismik. Skripsi ini diharapkan menghasilkan program komputer integral Hazard sekuensial berbasis Visual Basic for Application (VBA).

Law of Total Probability (LTP) dalam peluang bersyarat diberikan oleh persamaan (Taylor and Karlin, 1998)

$$P(X = x) = \sum_{y=0}^{\infty} P_{X|Y}(x|y) P_Y(Y = y) \quad \dots (1)$$

Konsep probabilistik memungkinkan adanya ketidakpastian dalam situs, lokasi, dan kecepatan perulangan gempa bumi serta variasi karakteristik pergerakan tanah dengan ukuran dan lokasi gempa bumi untuk diperhitungkan dengan jelas dalam evaluasi *Seismic Hazard. Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) memberikan kerangka kerja dimana ketidakpastian tersebut dapat diidentifikasi, diukur, dan digabungkan secara rasional untuk memberikan gambaran kerawanan seismik yang lebih lengkap (Makrup et al, 2015). Untuk kejadian gempa bumi tertentu. Dalam konteks analisis hazard gempa, pada probabilitas bahwa PGA (X) akan melebihi nilai tertentu (x) dan untuk setiap sumber gempa, perlu mempertimbangkan semua kemungkinan magnitude (M) dan jarak (R). Ini mengubah rumus menjadi integral ganda. Dalaam prakteknya, untuk seluruh sumber gempa, rumusnya menjadi:

$$P(X > x) = \int_M \int_R P(X > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad \dots (2)$$

Dimana

$P(X > x | m, r)$ = Probabilitas bersyarat gerakan tanah (X) melebihi kecepatan tanah (x) untuk magnitude m dan jarak r

$f_M(m)$ = Fungsi densitas probabilitas magnitude

$f_R(r)$ = Fungsi densitas probabilitas jarak

Persamaan (2.2) sangat sulit untuk diselesaikan secara analitis, bahkan hampir tidak dapat diselesaikan secara analitis. Oleh sebab itu, persamaan tersebut harus diselesaikan secara numerik. Landasan teori disusun untuk memberikan mengenai gambaran solusi atau pembahasan dalam artikel ilmiah ini. Gunakan teori yang relevan dan sesuai dengan topik. Teori pendukung dapat dimasukkan sebagai referensi yang dipakai untuk memberikan solusi atas permasalahan yang terjadi pada objek penelitian.

Menurut Susilo dan Adnan (2013), prinsip *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) adalah metode yang digunakan dalam analisis *Seismic Hazard* berdasarkan definisi dari fungsi distribusi probabilitas dengan menggunakan ketidakpastian dari skala kejadian gempa bumi, lokasi kejadian gempa, dan frekuensi kejadian gempa untuk mendapatkan level risiko kejadian gempa di lokasi penelitian. Pada bagian ini, akan dijelaskan kerangka kerja probabilitas dengan menggabungkan ketidakpastian ke dalam perhitungan potensi intensitas gerakan tanah dan mempertimbangkan semua kemungkinan peristiwa gempa bumi bersama dengan kemungkinan kejadian-kejadian yang terkait. Menurut Baker et al., (2021), terdapat 5 langkah dalam menentukan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA):

1. Mengidentifikasi pusat gempa bumi yang mampu menghasilkan kerusakan.
2. Mengidentifikasi distribusi magnitudo gempa (m).

Gutenberg dan Richter (1944) menyatakan bahwa distribusi probabilitas magnitudo gempa atau sumber zona gempa umumnya menggunakan data gempa bumi yang lalu, dengan tingkat laju gempa bumi dengan besaran yang sama atau lebih besar dari M di suatu wilayah dan umumnya mengikuti distribusi tertentu (Baker et al., 2021). Dengan *Gutenberg-Richter Recurrence Law* distribusi probabilitas magnitude gempa mengikuti distribusi eksponensial yang dikembangkan oleh Gutenberg-Richter yang disajikan pada persamaan berikut:

$$\log_{10} \lambda_m = a - bm \quad \dots (3)$$

Dimana $\alpha \approx 2.303a$, $\beta \approx 2.303b$, λ_m adalah jumlah kejadian per tahun, dan a serta b adalah konstanta regresi

Lalu berikut merupakan rumus distribusi magnitudo $F_M(m)$

$$f_M(m) = \beta e^{-\beta(m-m_0)} \quad \dots (4)$$

Untuk probabilitas magnitudo Kolmogorov-Smirnov disajikan pada persamaan berikut:

$$P(M = m_j) = F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j) \quad \dots (5)$$

3. Mengidentifikasi distribusi jarak (R) sumber ke tempat yang terjadi dengan potensi gempa bumi.

Fungsi densitas peluang diperoleh dari turunan fungsi distribusi kumulatif yang disajikan pada persamaan berikut:

$$f_R(r) = \frac{d}{dr} F_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{50\sqrt{r^2-100}} & \text{jika } 10 \leq r < 51 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad \dots (6)$$

Untuk probabilitas jarak Kolmogorov-Smirnov disajikan pada persamaan berikut:

$$P(R = r_j) = F_R(m_{j+1}) - F_R(r_j) \quad \dots (7)$$

Secara umum diasumsikan bahwa gempa bumi akan terjadi dengan probabilitas yang sama di setiap titik gempa mengikuti berdistribusi uniform, sehingga penelitian akan diukur menggunakan statistik Kolmogorov-Smirnov

$$D = \max_{1 \leq j \leq n} \left\{ \left| \hat{F}(x_{(j)}) - \frac{j-1}{n} \right|, \left| \hat{F}(x_{(j)}) - \frac{j}{n} \right| \right\} \quad \dots (8)$$

4. Prediksi distribusi intensitas pergerakan tanah yang dihasilkan sebagai fungsi magnitudo gempa, jarak, dan lain-lain. $\mu_{\ln PGA}, \sigma_{\ln PGA}$ dimodelkan dengan menyesuaikan persamaan $\ln PGA$ dari Cornell (1979) sebagai berikut:

$$\ln PGA = -0,152 + 0,859m - 1,803 \ln(R + 25) \quad \dots (9)$$

Cornell (1979) menyatakan bahwa model prediksi untuk rata-rata log PGA dapat menghitung probabilitas melebihi level PGA (dalam satuan g) dengan menggunakan rata-rata dan standar deviasi jika sudah diketahui keduanya. Persamaan disajikan sebagai berikut

$$P(PGA > x|m, r) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln x - \ln PGA}{\sigma_{\ln PGA}}\right) \quad \dots (10)$$

5. Menggabungkan probabilitas dalam ukuran, lokasi, dan pergerakan tanah menggunakan perhitungan dalil probabilitas total atau model *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Langkah-langkah diatas akan dijelaskan selanjutnya dimana hasil akhir dari perhitungan tersebut akan menjadi hubungan antara distribusi *Peak Ground Acceleration* dengan *Return Period*. Dengan informasi yang sudah ada, dengan menggabungkan persamaan *Law of Total Probability* (2), persamaan densitas magnitudo (4), persamaan densitas jarak site ke patahan (*Fault*) (6) dan persamaan mean lognormal (10), menjadi

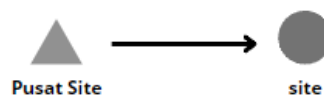
$$P(X > x) = \int_M \int_R \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln A}}{\sigma_{\ln A}}\right) \right) \times \beta e^{-\beta(m-m_0)} \times \frac{r}{50\sqrt{r^2-100}} dm dr \quad \dots (11)$$

Persamaan (3) tidak dapat diselesaikan secara analitik. (Makrup et al, 2015). mengembangkan solusi numerik untuk menyelesaikan *Law of Total Probability* (3). (Baker, 2008) mengembangkan metode diskritisasi untuk persamaan (3)

$$P(PGA > x) = \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln PGA}}{\sigma_{\ln PGA}}\right) \right) P(M = m_j) P(R = r_k) \quad \dots (12)$$

Skripsi ini mengusulkan proses komputasi sekuensial untuk menyelesaikan integral *Hazard* (4) berdasarkan jarak terhadap site Pelabuhanratu. Proses komputasi sekuensial dibatasi pada titik-titik gempa di ruang dimensi satu dengan memproyeksikan koordinat titik gempa terhadap *Latitude* (lintang)

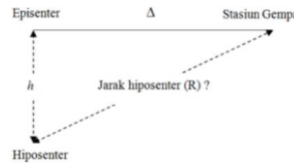
Komputasi sekuensial *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) ini akan menyelesaikan integral hazard atau persamaan (4) berdasarkan jarak titik gempa terdekat terhadap site (Pelabuhanratu) yang diteliti. Proses dilanjutkan untuk titik gempa terdekat berikutnya dan seterusnya. Pada setiap penambahan titik gempa dilakukan perbandingan grafik *Seismic Hazard* untuk mengkonfirmasi pola kurva *Seismic Hazard*. Proses komputasi sekuensial dibatasi pada titik-titik gempa di ruang dimensi satu dengan memproyeksikan koordinat titik gempa terhadap *Latitude* (lintang). selanjutnya menghitung sumber site dengan satu site dan satu titik gempa, satu site dan dua titik gempa, satu site dan tiga titik gempa dan seterusnya. Lalu mengukur efek penambahan titik gempa. Penulis membuat contoh proses untuk menghitung proyek titik gempa terhadap koordinat *Latitude* (lintang) sebagai berikut:



Gambar 1. Proyek Titik Gempa terhadap Koordinat Latitude (lintang)

Untuk memproyeksikan titik gempa terhadap koordinat *Latitude* (lintang), maka penulis harus mendapatkan besarnya jarak hiposenter menggunakan teori *Pythagoras* dan gambaran sebagai

berikut:



Gambar 2. Ilustrasi jarak hiposenter gempa bumi

Misalkan jarak lokasi gempa sebesar 4 KM dan memiliki kedalaman sebesar 3 KM, dengan demikian hasilnya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{4^2 + 3^2} \\ &= \sqrt{25} \\ &= 5 \end{aligned}$$

Dengan mengulangi perhitungan ini untuk mendapatkan urutan jarak hiposenter.

visual basic for applications (VBA) adalah bahasa pemrograman yang tertanam dalam berbagai aplikasi Microsoft Office, seperti Microsoft Excel, Word, dan Access. Bahasa pemrograman ini memungkinkan pengguna untuk mengotomatiskan tugas-tugas berulang, membuat kustomisasi pada antarmuka pengguna, dan menganalisis data dengan lebih mendalam (Walkenbach, 2015)

Algoritma adalah suatu upaya dengan urutan operasi yang disusun secara logis dan sistematis untuk menyelesaikan suatu masalah untuk menghasilkan suatu output tertentu (Press, 2007). output yang diharapkan adalah perhitungan integral *hazard*. Integral *Hazard* dalam *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) adalah hasil perhitungan yang menunjukkan probabilitas bahwa suatu parameter gerakan tanah (seperti percepatan tanah puncak atau PGA) akan melebihi suatu nilai tertentu di suatu lokasi dalam periode waktu tertentu. Lalu ini merupakan urutan sekuensial dengan sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi site, kota Pelabuhanratu
2. Menentukan Banyaknya titik gempa, misalkan N titik gempa, N = 25
3. Memproyeksikan titik gempa terhadap koordinat Latitude (lintang)
4. Menghitung jarak site terhadap pusat gempa
5. Mengurutkan jarak site terhadap pusat gempa
6. Menghitung integral *Hazard* untuk titik terdekat, plot kurva hazard
7. Menghitung integral *Hazard* untuk titik terdekat kedua, plot kurva hazard
8. Menghitung efek penambahan titik gempa, plot kurva hazard

Lalu untuk komputasi Integral *hazard* dihitung menggunakan bahasa pemrograman *visual basic for applications* (VBA)

Berdasarkan latar belakang yang disajikan, maka permasalahan yang dapat diidentifikasi pada penelitian ini yaitu bagaimana menerapkan solusi numerik dengan metode makrup yang efisien dan akurat untuk Integral Hazard dalam komputasi sekuensial satu dimensi Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)?. Dan juga bagaimana mengembangkan program komputer integral hazard sekuensial satu dimensi berbasis Visual Basic for Application (VBA)?.

Berdasarkan identifikasi masalah yang disajikan, maka tujuan pada penelitian ini yaitu menghasilkan bahaya seismik yang lebih detail dan akurat untuk wilayah Pelabuhanratu yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan tata ruang dan mitigasi bencana. dan juga mengimplementasikan metode sekuensial berbasis VBA untuk menghitung integral hazard dalam Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

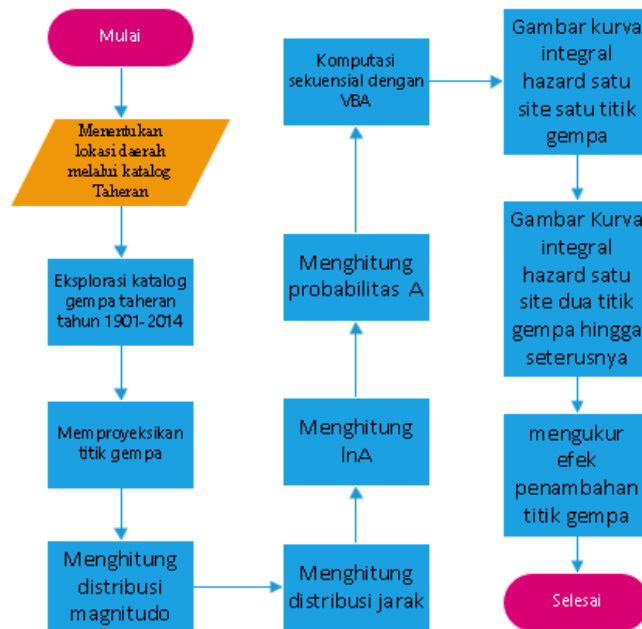
Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu Penelitian ini dapat memberikan kontribusi baru dalam pengembangan metode analisis bahaya seismik, khususnya dalam hal efisiensi dan akurasi perhitungan, Hasil penelitian ini dapat memperkaya literatur ilmiah di bidang kegempaan dan rekayasa gempa dan metode sekuensial berbasis VBA yang dikembangkan dapat menjadi rujukan bagi peneliti lain dalam melakukan analisis serupa di wilayah lain.

B. Metode



Gambar 3. Katalog Gempa Bumi Pelabuhanratu 1982-2020, site = Pelabuhanratu

Data yang digunakan bersumber dari USGS yaitu data sekunder katalog gempa bumi Pelabuhanratu tahun 1982-2020 yang berada di lokasi titik koordinat Pelabuhanratu $-6^{\circ} 98' 81''$ Lintang Selatan dan $106^{\circ} 55' 00''$ Bujur Timur dengan radius 50 KM, kedalaman 50 KM, magnitudo sebesar 3,8 mw hingga 5,4 mw dan jumlah data sebanyak 25 kejadian gempa bumi



Gambar 4. Diagram Alir

Tahapan analisis atau langkah-langkah dalam penelitian ini disajikan sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi daerah penelitian dengan menggunakan katalog gempa bumi ISC (*International Seismological Centre*). Memplot lokasi titik gempa dan site penelitian (Pelabuhanratu) dengan proyeksi titik gempa terhadap *Latitude* (lintang)
2. Eksplorasi katalog gempa Pelabuhanratu yang meliputi:
 - a. Histogram magnitudo gempa, boxplot magnitudo gempa, distribusi empiris magnitudo gempa. Apakah magnitude gempa mengikuti distribusi eksponensial
 - b. Histogram jarak titik gempa ke site Pelabuhanratu, boxplot jarak titik gempa ke site Pelabuhanratu. Bagaimana pola distribusi jarak titik gempa terhadap site Pelabuhanratu
3. memproyeksikan titik gempa terhadap koordinat *Latitude* (lintang) menggunakan teori *Pythagoras*
4. Menghitung kesesuaian distribusi eksponensial yang dikembangkan oleh Gutenberg-Richter atau dengan statistic Kolmogorov-Smirnov
5. Menghitung kesesuaian distribusi jarak site-titik gempa dengan statistic Kolmogorov-Smirnov
6. Menghitung nilai $\ln PGA$ dan menyesuaikan model dengan menggunakan persamaan (9)

7. Menghitung nilai probabilitas *PGA* dengan menggunakan persamaan (10)
8. Melakukan Komputasi integral Hazard dengan visual basic for applications (VBA)
 - a. Gambarkan kurva untuk menggambarkan integral *Hazard* dengan satu magnitudo dan satu jarak
 - b. Gambarkan kurva untuk menggambarkan integral *Hazard* dengan dua magnitudo dan dua jarak
 - c. Gambarkan kurva untuk menggambarkan integral *Hazard* sekuensial dengan satu site dan satu titik gempa terdekat, satu site dan dua titik gempa terdekat, satu site dan tiga titik gempa terdekat dan seterusnya. Lalu mengukur efek penambahan titik gempa.

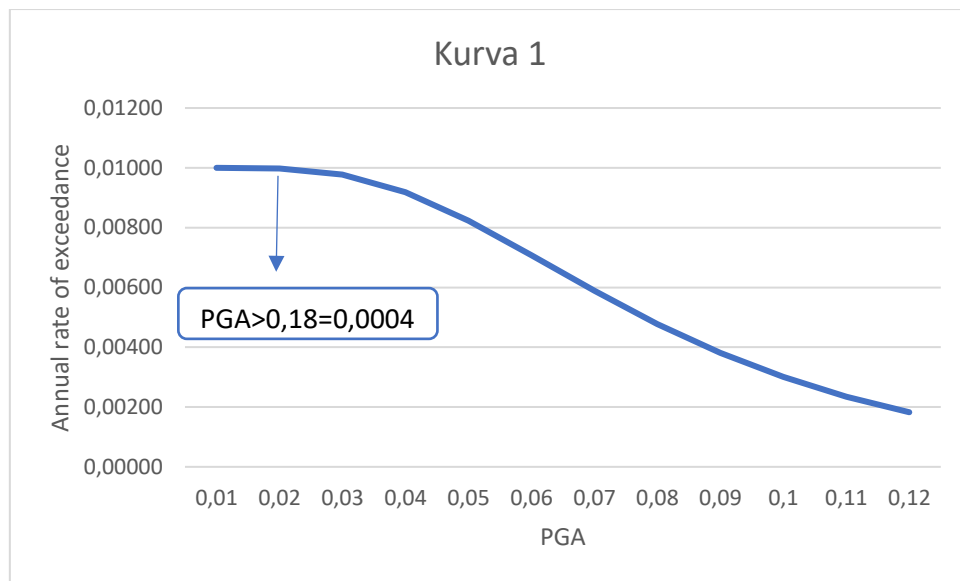
C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Lalu berikut merupakan hasil dari Integral Hazard dengan visual basic for applications (VBA)

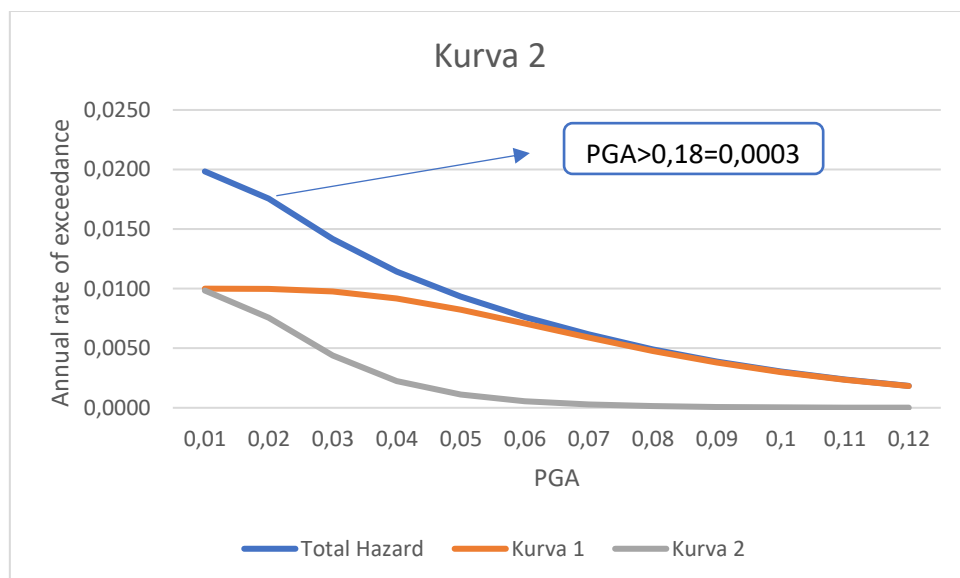
Tabel 1. Hasil Integral hazard

Kurva 1	Kurva 2	Kurva 3	Kurva 4	Kurva 5	Kurva 6	Kurva 7	Kurva 8
0,01000	0,01984	0,02984	0,03984	0,04867	0,05865	0,06864	0,07862
0,00998	0,01755	0,02748	0,03713	0,04110	0,05048	0,05986	0,06924
0,00977	0,01417	0,02367	0,03198	0,03331	0,04085	0,04840	0,05594
0,00919	0,01144	0,01995	0,02634	0,02678	0,03212	0,03746	0,04280
0,00823	0,00934	0,01652	0,02107	0,02122	0,02473	0,02825	0,03176
0,00708	0,00762	0,01339	0,01650	0,01655	0,01878	0,02100	0,02323
0,00588	0,00615	0,01064	0,01272	0,01273	0,01412	0,01551	0,01689
0,00478	0,00491	0,00833	0,00969	0,00970	0,01056	0,01142	0,01228
0,00381	0,00388	0,00644	0,00734	0,00734	0,00788	0,00841	0,00895
0,00300	0,00304	0,00495	0,00554	0,00554	0,00587	0,00621	0,00654
0,00235	0,00237	0,00378	0,00417	0,00417	0,00438	0,00459	0,00480
0,00183	0,00184	0,00288	0,00314	0,00314	0,00327	0,00341	0,00354
0,00142	0,00142	0,00219	0,00237	0,00237	0,00245	0,00254	0,00262
0,00110	0,00110	0,00167	0,00179	0,00179	0,00184	0,00190	0,00195
0,00085	0,00085	0,00127	0,00135	0,00135	0,00139	0,00143	0,00146
0,00066	0,00066	0,00097	0,00103	0,00103	0,00105	0,00108	0,00110
0,00051	0,00051	0,00075	0,00078	0,00078	0,00080	0,00082	0,00083
0,00040	0,00040	0,00057	0,00060	0,00060	0,00061	0,00062	0,00063
0,00031	0,00031	0,00044	0,00046	0,00046	0,00047	0,00047	0,00048
0,00024	0,00024	0,00034	0,00035	0,00035	0,00036	0,00036	0,00037
0,00019	0,00019	0,00026	0,00027	0,00027	0,00028	0,00028	0,00028
0,00015	0,00015	0,00021	0,00021	0,00021	0,00021	0,00022	0,00022
0,00012	0,00012	0,00016	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017
0,00009	0,00009	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013
0,00007	0,00007	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010

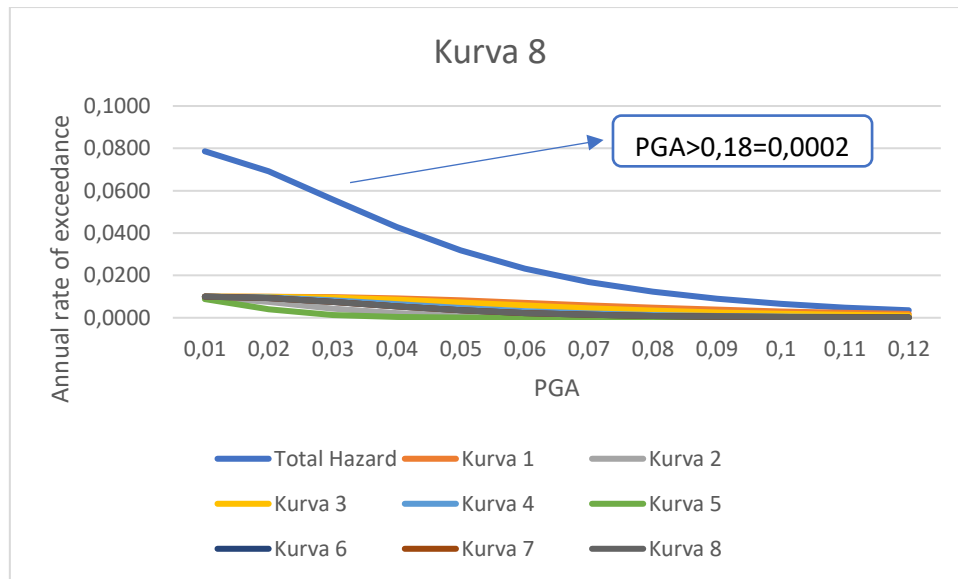
Warna kuning adalah mean dari setiap titik dan untuk warna biru adalah sebagai acuan. Lalu berikut adalah gambar hingga efek penambahan titik gempa tidak signifikan

**Gambar 5.** Kurva 1

Bentuk kurva menunjukkan bahwa semakin besar nilai PGA, semakin kecil probabilitas terjadinya. Lalu titik-titik pada PGA 0.18g menunjukkan bahwa diperkirakan terjadi gempa dengan PGA sebesar atau lebih besar dari 0.18g sebanyak 0.00040 kali dalam setahun.

**Gambar 6.** Kurva 2

Masing-masing kurva mewakili kontribusi dari sumber gempa yang berbeda atau skenario gempa yang berbeda. Kurva "Total Hazard" merupakan gabungan dari kedua kurva sebelumnya, sehingga memberikan gambaran keseluruhan risiko gempa. Lalu titik-titik pada PGA 0.19g di "Total Hazard" menunjukkan bahwa diperkirakan terjadi gempa dengan PGA sebesar atau lebih besar dari 0.19g sebanyak 0.00031 kali dalam setahun, selain itu terlihat bahwa efek penambahan gempa masih signifikan.



Gambar 7. Kurva 8

Masing-masing kurva mewakili kontribusi dari sumber gempa yang berbeda atau skenario gempa yang berbeda. Kurva "Total Hazard" merupakan gabungan dari kedua kurva sebelumnya, sehingga memberikan gambaran keseluruhan risiko gempa. Lalu titik-titik pada PGA 0.22g di "Total Hazard" menunjukkan bahwa diperkirakan terjadi gempa dengan PGA sebesar atau lebih besar dari 0.22g sebanyak 0.00022 kali dalam setahun, selain itu terlihat bahwa efek penambahan gempa sudah tidak signifikan, sehingga didapat bahwa pada gempa Pelabuhanratu memiliki PGA sebesar 0.22g sebanyak 0.00022 kali dalam setahun.

D. Kesimpulan

Pada kurva ke-8 terlihat bahwa efek penambahan gempa sudah tidak signifikan, sehingga didapat bahwa pada gempa Pelabuhanratu memiliki PGA sebesar 0.22g sebanyak 0.00022 kali dalam setahun, maka kurva ke-8 sudah mewakili nilai dari seluruh data. Jadi berdasarkan hasil tersebut komputasi sekuensial satu dimensi dapat menjadi solusi numerik yang efisien dan akurat untuk PSHA dengan model Integral Hazard. contoh diatas memberikan gambaran bagaimana pendekatan ini dapat diterapkan dalam perhitungan PSHA. selain itu, Penggunaan perangkat lunak seperti Visual Basic for Applications (VBA) juga membantu dalam analisis PSHA yang komprehensif.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyadari tanpa bantuan dan dukungan akan terasa sulit untuk menyelesaikan artikel ini, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Sutawanir Darwis, selalu dosen pembimbing yang telah memberikan waktu, tenaga, serta ilmu dan arahan, Dosen-dosen Program Studi Statistika yang telah memberikan ilmu dan wawasan selama perkuliahan, Teman-teman jurusan statistika yang memberi semangat serta motivasi selama pelaksanaan kuliah.

Daftar Pustaka

- Aliyah, S. (2021). *Analisis Probabilitas Seismic Hazard* Pada Wilayah Lombok Barat. Skripsi. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Baker, J. W., Cornell, C. A., & McGuire, R. K. (2021). *Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Beginner's Guide*. John Wiley & Sons.
- Bommer, J. J., and N. A. Abrahamson (2006). *Why do modern seismic hazard analyses often lead to increased hazard estimates*, Bull. Seism. Soc. Am., in Press.

- Casella, G., dan Berger, R. L. (2002). *Statistical Inference*. Edisi kedua. Duxbury.
- Edwiza, D. (2008). Penentuan Parameter Gerakan Tanah Akibat Gempa bumi Menggunakan Metode Regresi Linier Berganda. *Jurnal Ilmiah MTG*, 1(1), 1-11.
- Else, R. (2017). *Seismic Hazard Analysis: Deterministic and Probabilistic Approaches*. CRC Press.
- Fadillah, R. (2011). Analisis Parameter Fisik Gunung Api Untuk Mengetahui Karakteristik Gempa Vulkanik (Studi Kasus: Gunung Bromo). *Jurnal Geodesi Undip*, 1(1), 1-9.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). *Frequency of Earthquakes in California*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185-188.
- Hariyanto, A., Susanto, H., & Putri, A. (2020). Analisis Bahaya Gempabumi Probabilistik (PSHA) Berdasarkan Data Mikroseismik. *Jurnal Sains Dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 22(1), 1-10.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Pearson Education.
- Makrup, N. L., Darwis, S., & Adnan, M. (2015). Pemodelan *Probabilitas Seismic Hazard Analysis* (PSHA) untuk Wilayah Lombok Barat. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), 2337-3520.
- Nandy, A. (2021). Analisis Gempa Tektonik. *Jurnal Geofisika*, 15(2), 75-85.
- Patterson, D. A., & Hennessy, J. L. (2014). *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. Morgan Kaufmann.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing*. Cambridge University Press.
- Putri, A., Susanto, H., & Hariyanto, A. (2017). Analisis Tingkat Bahaya Gempabumi Probabilistik (PSHA) di Wilayah Lombok Barat. *Jurnal Sains Dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 19(1), 1-10.
- Sunardi, S., Darwis, S., & Adnan, M. (2012). Analisis Risiko Gempa Bumi. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 1(1), 2337-3520.
- Susilo, S. H., & Adnan, M. (2013). Analisa *Probabilitas Seismic Hazard Analysis* (PSHA) di Wilayah Lombok Barat. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 2(1), 2337-3520.
- Taylor, H. M., & Karlin, S. (1998). *An Introduction to Stochastic Modeling*. Academic Press.
- Utoyo, U. (2007). *Kamus Gempa Bumi*. Gramedia Pustaka Utama.
- Walkenbach, John. (2015). *Excel VBA Programming for Dummies*, 4th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons Inc
- Youngs, dkk. 1997. Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*. 68 (1): 58-73