

## Penerapan *Sequence Probabilistic Seismic Hazard Analysis* dalam Pemodelan *Seismogenic Hazard*

Novaida Zulfita, Sutawanir Darwis\*

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

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received : 5/10/2024  
Revised : 31/12/2024  
Published : 31/12/2024



Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Volume : 4  
No. : 2  
Halaman : 145 - 154  
Terbitan : **Desember 2024**

Terakreditasi Sinta [Peringkat 4](#)  
berdasarkan Ristekdikti  
No. 177/E/KPT/2024

### ABSTRAK

Seismogenic area adalah wilayah dalam kerak bumi yang berpotensi menghasilkan gelombang seismik akibat aktivitas tektonik. Setelah diidentifikasi, pemodelan probabilistik digunakan untuk memperkirakan frekuensi dan magnitudo gempa. Pemodelan ini menggunakan peluang bersyarat dan peluang total untuk menggabungkan berbagai sumber gempa, seperti magnitudo dan jarak, dengan data yang dihasilkan melalui software Python. Skripsi ini mengintegrasikan peluang bersyarat dan total dari berbagai skenario gempa untuk menghitung *Sequence Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (SPSHA), yang merupakan gabungan gempa utama dan susulan. Proses ini dimulai dengan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) untuk gempa utama, kemudian *Aftershock Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (APSHA) untuk gempa susulan. Desain komputasi  $1 - m - a$  meliputi konfigurasi seperti  $1 - 1 - 0$ ,  $1 - 1 - 1$ , hingga  $1 - 1 - 8$ . Hasil analisis menunjukkan peran penting peluang bersyarat dalam PSHA, APSHA, dan SPSHA di seismogenic area, dimana SPSHA memberikan pendekatan lebih realistis dibandingkan PSHA dengan mempertimbangkan gempa susulan yang mengikuti gempa utama. Ini menghasilkan *annual rate of exceedance* lebih tinggi yang berguna untuk analisis risiko gempa, perencanaan mitigasi bencana, dan desain infrastruktur tahan gempa.

**Kata Kunci** : Tingkat Kecepatan Melebihi, Gabungan Gempa Utama dan Susulan, Peluang Bersyarat dan Peluang Total.

### ABSTRACT

Seismogenic areas are areas in the earth's crust that have the potential to produce seismic waves due to tectonic activity. Once identified, probabilistic modeling is used to estimate the frequency and magnitude of earthquakes. This modeling uses conditional probability and total probability to combine various earthquake sources, such as magnitude and distance, with data generated via Python software. This thesis integrates conditional and total probabilities from various earthquake scenarios to calculate the *Sequence Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (SPSHA), which is a combination of main and aftershocks. This process begins with *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) for the main earthquake, then *Aftershock Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (APSHA) for aftershocks. The  $1 - m - a$  computational design includes configurations such as  $1 - 1 - 0$ ,  $1 - 1 - 1$ , up to  $1 - 1 - 8$ . The analysis results show the important role of conditional probability in PSHA, APSHA, and SPSHA in seismogenic areas, where SPSHA provides a more realistic approach than PSHA by considering aftershocks that follow the main earthquake. This results in a higher *annual rate of exceedance* which is useful for earthquake risk analysis, disaster mitigation planning, and earthquake-resistant infrastructure design.

**Keywords** : Annual Rate of Exceedance; Combination of Mainshocks and Aftershocks; Conditional Chance and Total Chance.

Copyright© 2024 The Author(s)..

## A. Pendahuluan

Seismogenic area adalah wilayah geologis di kerak bumi yang memiliki sesar aktif, di mana terjadi tegangan tektonik yang cukup besar yang dapat terakumulasi dan dilepaskan sehingga menghasilkan potensi gempa bumi. Apabila gempa bumi terjadi dapat menimbulkan bencana baik kerusakan kecil maupun kerusakan besar hingga korban jiwa. Oleh karena itu, pemodelan seismogenic hazard menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak bencana. Seismogenic hazard mengacu pada potensi terjadinya gempa bumi di suatu wilayah tertentu yang disebabkan oleh aktivitas tektonik [1]. Pemodelan seismogenic hazard bertujuan untuk memprediksi frekuensi dan intensitas gempa bumi di masa depan.

Pemodelan seismogenic hazard merupakan aplikasi peluang bersyarat dengan konsep probabilitas yang menggambarkan kemungkinan terjadinya suatu peristiwa berdasarkan terjadinya peristiwa lain sebelumnya. Dalam konteks pemodelan seismogenik, peluang bersyarat dan peluang total digunakan untuk memprediksi kemungkinan gempa bumi berdasarkan data historis dan karakteristik geologis suatu daerah penggunaan definisi dasar dari peluang bersyarat dan hukum probabilitas total untuk mendapatkan distribusi marginal. Peluang bersyarat dan peluang total merupakan dasar teori peluang [2] dan [3]. Peluang bersyarat A bila diketahui bahwa suatu kejadian B telah terjadi disebut sebagai peluang bersyarat dan dilambangkan  $P(A|B)$  dan dibaca peluang terjadinya A bila kejadian B diketahui.

Gempa bumi cenderung berhubungan erat dengan lokasi geografis dan periode waktu tertentu. Fenomena ini mencerminkan karakteristik aktivitas seismik di berbagai wilayah di sepanjang batas lempeng tektonik, sesar, atau patahan yang rentan terhadap pelepasan energi tiba-tiba [4]. Selain itu, gempa bumi sering terjadi dalam serangkaian yang terkait satu sama lain, seperti gempa utama diikuti oleh gempa-gempa susulan. Pola ini dapat diamati dalam seismogenic hazard dan pengamatan sejarah gempa bumi dalam mengevaluasi risiko gempa bumi di suatu wilayah termasuk perencanaan tata ruang dan pembangunan infrastruktur, pengembangan kode bangunan yang tahan gempa, manajemen dan mitigasi risiko bencana, serta kebijakan publik dan perencanaan evakuasi. Dengan memahami pemodelan ini, kita dapat meningkatkan kewaspadaan dan kesiapan dalam menghadapi potensi gempa bumi di masa mendatang.

Kita tidak tahu kapan akan terjadinya gempa maka dari itu mitigasi risiko gempa bumi sangat diperlukan. Hal ini mengarah pada Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) yang merupakan pendekatan untuk menilai seismogenic hazard di suatu wilayah dengan memperhitungkan berbagai sumber gempa dan ketidakpastian [5]. Cornell [6] adalah salah satu pionir dalam pengembangan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), yang menggabungkan berbagai sumber gempa dan ketidakpastian untuk menghasilkan estimasi probabilitas kejadian gempa. Kramer [7] menyatakan bahwa PSHA penting untuk menilai risiko dan merancang strategi mitigasi yang efektif. Dalam PSHA, peluang bersyarat digunakan untuk menggabungkan berbagai faktor yang mempengaruhi seismogenic hazard. Peluang bersyarat dan peluang total memainkan peran penting terutama dalam mengestimasi probabilitas kejadian gempa dan dampaknya [8].

PSHA atau Probabilistic Seismic Hazard Analysis umumnya digunakan untuk menentukan seberapa bahaya kegempaan secara probabilistic menggunakan pengukuran perkiraan besaran peluang magnitudo suatu daerah dan lokasi dengan jarak dari pusat sumber gempa yang mengalami pergerakan tanah. Teori ini mengansumsikan bahwa gempa dengan magnitudo dan jarak sebagai suatu variabel acak. PSHA mengacu pada terjadinya gempa utama, yaitu gempa bumi berkekuatan besar yang mungkin teridentifikasi dalam kluster [5].

Yeo & Cornell [10] mengembangkan gempa susulan atau Aftershock Probabilistic Seismic Hazard Analysis (APSHA) untuk menentukan bahaya gempa susulan yang bergantung dengan bahaya gempa utamanya. Setiap kluster seismik terdapat guncangan gempa utama dan diikuti rangkaian gempa susulan, dapat dikatakan bahwa kemunculan kluster secara probabilistik dijelaskan oleh laju kejadian gempa utama yang konstan sedangkan laju kejadian gempa susulan tidak konstan. Maka dari itu, dalam rangka untuk menentukan gabungan bahaya gempa utama dan gempa susulan dibutuhkan analisis untuk rangkaian gempa.

Bahaya rangkaian gempa utama dan gempa susulan dapat ditentukan dengan kombinasi peluang total PSHA dan APSHA yang disebut Sequence Probabilistic Seismic Hazard Analysis (SPSHA). Hasil SPSHA akan dibuat komputasi SPSHA menggunakan desain  $1 - m - a$  dimana 1 menyatakan site, m menyatakan banyak gempa utama, dan a menyatakan banyak gempa susulan untuk dibandingkan dengan PSHA dan dibahas

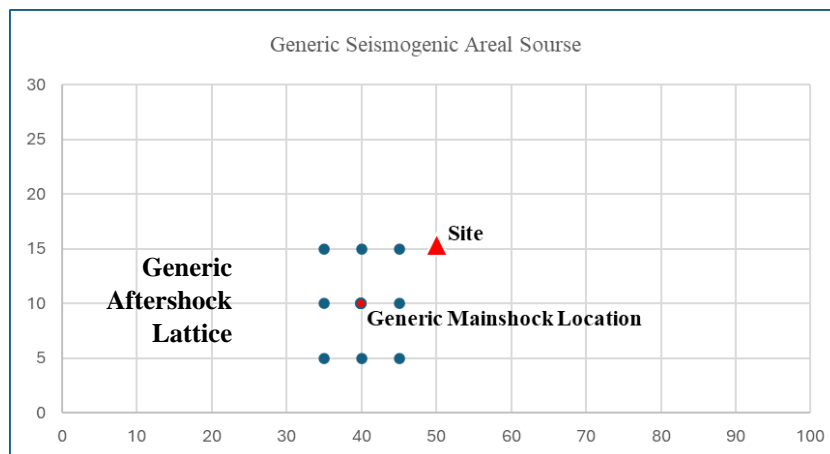
secara analitis untuk memberikan informasi tentang probabilitas terjadinya annual rate of exceedance intensitas gerakan tanah [11].

Berdasarkan penelitian terdahulu [9], menghitung bahaya gempa bumi berdasarkan generic seismogenic areal source dengan ukuran 30 x 100 km<sup>2</sup>. Generic mainshock location diasumsikan terdistribusi secara seragam di dalam zona sumber gempa. Magnitudo guncangan utama diambil dengan membangkitkan fungsi distribusi probabilitas untuk distribusi eksponensial terpotong. Magnitudo dan jarak sumber gempa ke lokasi dianggap independent. Diasumsikan bahwa terdapat satu gempa utama yang memiliki 120 gempa susulan yang dibatasi di area sekitar pusat gempa. Ukuran zona seismogenik gempa susulan dalam kilometer kuadrat yang artinya epicenter gempa utama diasumsikan terdistribusi secara seragam dalam zona sumber. Generic seismogenic areal source yang diasumsikan berbentuk bujur sangkar.

Berdasarkan uraian diatas, maka dalam penelitian artikel ini akan dibahas komputasi penggabungan PSHA dan APSHA yang dilakukan secara analitis untuk mendapatkan pemodelan seismogenic hazard untuk rangkaian gempa utama dan gempa susulan (SPSHA). Kemudian, membandingkan SPSHA dengan PSHA agar dapat mengidentifikasi area berisiko tinggi, merancang bangunan tahan gempa, dan merencanakan evakuasi yang lebih efektif berdasarkan data historis gempa utama dan gempa susulan.

### B. Metode Penelitian

Artikel ini membahas mengenai perhitungan peluang bersyarat dan peluang total. Peluang total bergantung pada penggunaan peluang bersyarat untuk menghitung peluang keseluruhan suatu kejadian dengan mempertimbangkan semua kemungkinan cara kejadian tersebut dapat terjadi. Pada pemodelan seismogenic hazard perhitungan PSHA, APSHA, dan SPSHA dihitung menggunakan peluang bersyarat sehingga mendapatkan peluang total untuk hasil annual rate of exceedance dari masing-masing analisis yang bertujuan untuk pengembangan strategi mitigasi risiko bencana secara tepat dalam merancang bangunan dan infrastruktur agar dapat menahan guncangan gempa bumi. Gambar 1 memperlihatkan peta Generic Seismogenic Areal Source. Gambar tersebut memperlihatkan lokasi site, gempa utama dan gempa susulan. Gempa utama dan gempa susulan dapat diidentifikasi juga dengan melihat seberapa besar magnitudo gempa bumi.



**Gambar 1.** *Generic Seismogenic Areal Source*

Pada gambar 1. menjelaskan generic seismogenic areal source yang memiliki satu gempa utama dengan simbol titik merah. Epicenter gempa utama diasumsikan terdistribusi secara seragam dalam zona sumber. Gempa utama tersebut memiliki delapan gempa susulan dengan ukuran zona seismogenik dalam kilometer kuadrat dan diasumsikan secara geometri berbentuk bujur sangkar yang ditandai dengan titik biru. Kemudian, simbol segitiga merah manandakan site atau lokasi spesifik yang dianalisis untuk bahaya seismik.

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data magnitudo dan kedalaman yang dibangkitkan menggunakan software python menggunakan syntax pada lampiran 1 dan lampiran 2. Data magnitudo yang dibangkitkan berdasarkan distribusi eksponensial terpotong dengan batas interval maksimal 5,6 M dan

minimal 2,5 M. Data kedalaman diambil menggunakan distribusi uniform dengan batas interval maksimal 96 km dan minimal 5 km. Batas interval magnitudo dan kedalaman diambil dari hasil declustering daerah cianjur [12]. Analisisnya akan dibahas sebagai berikut:

**Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)**

Komputasi PSHA menghasilkan hubungan antara distribusi maksimum percepatan tanah (*peak ground acceleration*) dengan ukuran intensitas (*annual rate of exceedence*)[13]. Dengan rumus ukuran intensitas (*annual rate of exceedence*) sebagai berikut:

$$\lambda_{im,E} = V_E \cdot \int_{r_{E,min}}^{r_{E,max}} \int_{m_{E,min}}^{m_{E,max}} P[IM_E > im|x, y] \cdot f_{M_E,R_E}(x, y) \cdot dx \cdot dy$$

**Aftershock Probabilistic Seismic Hazard Analysis (APSHA)**

APSHA juga memperhitungkan laju dengan probabilitas (*time-invariant*) bahwa PGA di suatu lokasi melebihi ambang batas. Hal ini menyebabkan laju proses NHPP  $\lambda_{A|m_E}$  dimana  $f(m_A)$  dan  $f(r_A)$  adalah PDF dari magnitudo dan jarak sumber ke lokasi gempa susulan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\lambda_{im,A|m_E}(t) = V_{A|m_E}(t) \cdot \int_{r_{A,min}}^{r_{A,max}} \int_{m_{A,max}}^{m_{A,max}} P[IM_A > im|w, z] \cdot f_{M_A,R_A}(w, z) \cdot dw \cdot dz$$

**Sequences Probabilistic Seismic Hazard Analysis (SPSHA)**

Menganalisis rangkaian gempa utama dan gempa susulan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\lambda_{im}(im) = V_E \cdot \left\{ 1 - \iint_{M_E,R_E} P[IM_E \leq im|x, y] \cdot \left( \iint_{M_A,R_A} P[IM_A \leq im | w, z] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times f_{M_A,R_A|M_E,R_E}(w, z|x, y) \cdot dw \cdot dz \right)^{E[N_{A|x}(0,\Delta T_A)]} \cdot f_{M_E,R_E}(x, y) \cdot dx \cdot dy \right\}$$

**C. Hasil dan Pembahasan**

**Komputasi Desain 1 – 1 – 0**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 0 yang merupakan komponen probability exceedance gempa utama tanpa komponen probability exceedance gempa susulan karena 1 untuk site, 1 gempa utama, dan 0 gempa susulan. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan hanya komputasi PSHA dimana  $P(M = 5,4) = 1$ ,  $P(R = 27) = 1$ , dan nilai  $V_E$  adalah 0.054 kejadian/tahun [9]. Sehingga diperoleh annual rate of exceedance dan probability of exceedance sebagai berikut:

**Tabel 1.** Level PGA  $\lambda$  (PGA > x) Desain (1 – 1 – 0)

x	$\lambda$ (PGA > x)	POE <sub>E</sub>
0,01	5,4,E-02	6,3,E-01
0,02	5,3,E-02	6,3,E-01
:	:	:
1,99	2,9,E-11	2,4,E-09
2	2,7,E-11	2,3,E-09

Berdasarkan Tabel 1. dapat dilihat bahwa dengan percepatan (x) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu cluster. Dari percepatan (x) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 0.054 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 0.63, percepatan (x) 0.02 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 0.053 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 0.63 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan (x).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 1**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 1 yang merupakan gabungan komponen *probability exceedance* gempa utama dan komponen *probability exceedance* gempa susulan dengan 1 untuk site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 1 gempa susulan yang memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 2.** Level PGA  $\lambda$  ( $PGA > x$ ) Desain (1 – 1 – 1)

$x$	$\lambda$ ( $PGA_E > x$ )	$POE_E$	$\lambda$ ( $PGA > x$ )	$POE$
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,3985,E-02	6,3201,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,3346,E-02	6,2731,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	1,2976E-10	2,3964,E-09
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	1,2307E-10	2,2728,E-09

Berdasarkan Tabel 2. dapat dilihat bahwa dengan percepatan ( $x$ ) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu cluster. Dari percepatan ( $x$ ) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3985,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan ( $x$ ).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 2**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 2 yang merupakan gabungan komponen *probability exceedance* gempa utama dan komponen *probability exceedance* gempa susulan dengan 1 untuk site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 2 gempa susulan dengan gempa susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km dan gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 3.** Level PGA  $\lambda$  ( $PGA > x$ ) Desain (1 – 1 – 2)

$x$	$\lambda$ ( $PGA_E > x$ )	$POE_E$	$\lambda$ ( $PGA > x$ )	$POE$
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,3995,E-02	6,3204,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,3745,E-02	6,2861,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	1,3457E-10	2,4260,E-09
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	1,2761E-10	2,3008,E-09

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat bahwa dengan percepatan ( $x$ ) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu cluster. Dari percepatan ( $x$ ) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3995,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3204,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan ( $x$ ).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 3**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 3 yang merupakan gabungan komponen *probability exceedance* gempa utama dan komponen *probability exceedance* gempa susulan dengan 1 untuk

site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 3 gempa susulan dengan gempa susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km, gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km, dan gempa susulan ketiga memiliki magnitudo sebesar 4,9 berjarak 27 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 4.** Level PGA  $\lambda$  (PGA > x) Desain (1 – 1 – 3)

x	$\lambda$ (PGA <sub>E</sub> > x)	POE <sub>E</sub>	$\lambda$ (PGA > x)	POE
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,3999,E-02	6,3193,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	1,5942E-10	2,5867,E-09
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	1,5107E-10	2,4524,E-09

Berdasarkan Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa dengan percepatan (x) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu *cluster*. Dari percepatan (x) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,4000,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3212,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan (x).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 4**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 4 yang merupakan gabungan komponen probability exceedance gempa utama dan komponen probability exceedance gempa susulan dengan 1 untuk site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 4 gempa susulan dengan gempa susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km, gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km, gempa susulan ketiga memiliki magnitudo sebesar 4,9 berjarak 27 km, dan gempa susulan keempat memiliki magnitudo sebesar 4,7 berjarak 29 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA menggunakan persamaan (2.36), sehingga diperoleh annual rate of exceedance dan probability of exceedance sebagai berikut:

**Tabel 5.** Level PGA  $\lambda$  (PGA > x) Desain (1 – 1 – 4)

x	$\lambda$ (PGA <sub>E</sub> > x)	POE <sub>E</sub>	$\lambda$ (PGA > x)	POE
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	2,1900E-10	2,9749,E-09
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	2,0731E-10	2,8188,E-09

Berdasarkan Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa dengan percepatan (x) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu *cluster*. Dari percepatan (x) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,4000,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3212,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan (x)

**Komputasi Desain 1 – 1 – 5**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 5 yang merupakan gabungan komponen probability exceedance gempa utama dan komponen probability exceedance gempa susulan dengan 1 untuk site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 5 gempa susulan dengan gempa

susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km, gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km, gempa susulan ketiga memiliki magnitudo sebesar 4,9 berjarak 27 km, gempa susulan keempat memiliki magnitudo sebesar 4,7 berjarak 29 km, dan gempa susulan kelima memiliki magnitudo sebesar 4,5 berjarak 88 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 6.** Level PGA  $\lambda$  ( $PGA > x$ ) Desain (1 – 1 – 5)

$x$	$\lambda$ ( $PGA_E > x$ )	$POE_E$	$\lambda$ ( $PGA > x$ )	$POE$
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	3,6241E-10	3,9052,E-09
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	3,4269E-10	3,6970,E-09

Berdasarkan Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa dengan percepatan ( $x$ ) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu *cluster*. Dari percepatan ( $x$ ) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,4000,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3212,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan ( $x$ ).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 6**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 6 yang merupakan gabungan komponen *probability exceedance* gempa utama dan komponen *probability exceedance* gempa susulan dengan 1 untuk site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 6 gempa susulan dengan gempa susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km, gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km, gempa susulan ketiga memiliki magnitudo sebesar 4,9 berjarak 27 km, gempa susulan keempat memiliki magnitudo sebesar 4,7 berjarak 29 km, gempa susulan kelima memiliki magnitudo sebesar 4,5 berjarak 88 km, dan gempa susulan keenam memiliki magnitudo sebesar 4,0 berjarak 58 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 7.** Level PGA  $\lambda$  ( $PGA > x$ ) Desain (1 – 1 – 6)

$x$	$\lambda$ ( $PGA_E > x$ )	$POE_E$	$\lambda$ ( $PGA > x$ )	$POE$
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	7,5188E-10	6,4363,E-09
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	7,1033E-10	6,0852,E-09

Berdasarkan Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa dengan percepatan ( $x$ ) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu *cluster*. Dari percepatan ( $x$ ) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,4000,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3212,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan ( $x$ ).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 7**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 7 yang merupakan gabungan komponen *probability exceedance* gempa utama dan komponen *probability exceedance* gempa susulan dengan 1 untuk

site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 7 gempa susulan dengan gempa susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km, gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km, gempa susulan ketiga memiliki magnitudo sebesar 4,9 berjarak 27 km, gempa susulan keempat memiliki magnitudo sebesar 4,7 berjarak 29 km, gempa susulan kelima memiliki magnitudo sebesar 4,5 berjarak 88 km, gempa susulan keenam memiliki magnitudo sebesar 4,0 berjarak 58 km, dan gempa susulan ketujuh memiliki magnitudo sebesar 3,0 berjarak 14 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 8.** Level PGA  $\lambda$  ( $PGA > x$ ) Desain (1 – 1 – 7)

x	$\lambda$ ( $PGA_E > x$ )	$POE_E$	$\lambda$ ( $PGA > x$ )	POE
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	2,3763E-09	1,7031,E-08
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	2,2440E-09	1,6088,E-08

Berdasarkan Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa dengan percepatan ( $x$ ) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu *cluster*. Dari percepatan ( $x$ ) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,4000,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3212,E-01 begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan ( $x$ ).

**Komputasi Desain 1 – 1 – 8**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan untuk komputasi desain 1 – 1 – 8 yang merupakan gabungan komponen *probability exceedance* gempa utama dan komponen *probability exceedance* gempa susulan dengan 1 untuk site, 1 gempa utama yang memiliki magnitudo sebesar 5,4 berjarak 27 km, dan 8 gempa susulan dengan gempa susulan pertama memiliki magnitudo sebesar 5,3 berjarak 33 km, gempa susulan kedua memiliki magnitudo sebesar 5,2 berjarak 68 km, gempa susulan ketiga memiliki magnitudo sebesar 4,9 berjarak 27 km, gempa susulan keempat memiliki magnitudo sebesar 4,7 berjarak 29 km, gempa susulan kelima memiliki magnitudo sebesar 4,5 berjarak 88 km, gempa susulan keenam memiliki magnitudo sebesar 4,0 berjarak 58 km, gempa susulan ketujuh memiliki magnitudo sebesar 3,0 berjarak 14 km, dan gempa susulan kedelapan memiliki magnitudo sebesar 2,9 berjarak 14 km. Maka, komputasi perhitungan yang dilakukan menghitung komputasi PSHA, komputasi APSHA, dan komputasi SPSHA, sehingga diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:

**Tabel 9.** Level PGA  $\lambda$  ( $PGA > x$ ) Desain (1 – 1 – 8)

x	$\lambda$ ( $PGA_E > x$ )	$POE_E$	$\lambda$ ( $PGA > x$ )	POE
0,01	5,3984,E-02	6,3201,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
0,02	5,3279,E-02	6,2718,E-01	5,4000,E-02	6,3212,E-01
:	:	:	:	:
1,99	2,8639,E-11	2,3937,E-09	7,20351E-09	4,8632,E-08
2	2,7040,E-11	2,2703,E-09	6,80055E-09	4,5912,E-08

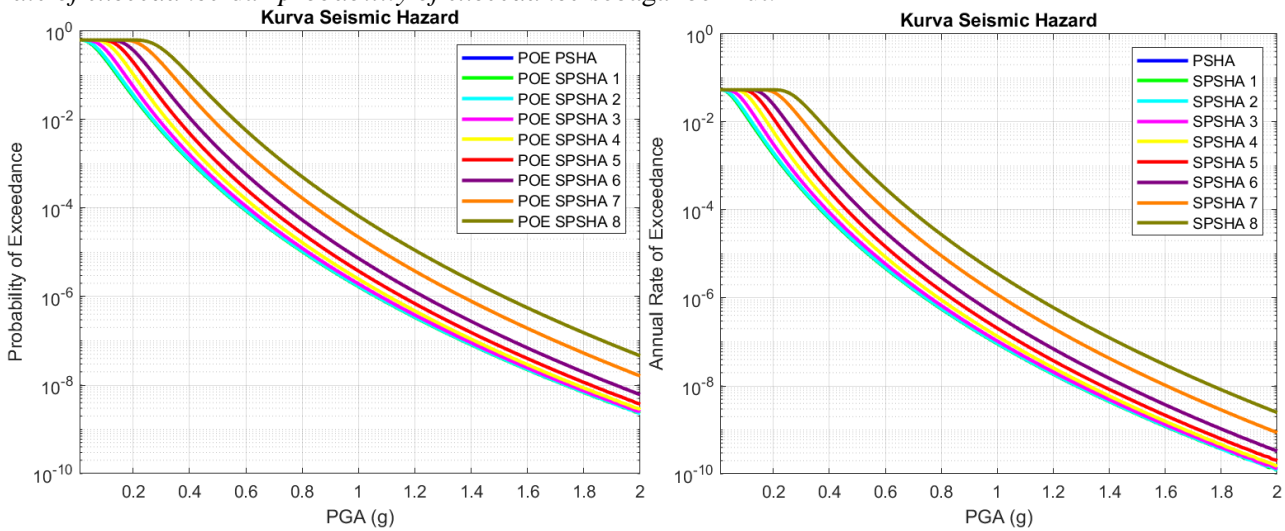
Berdasarkan Tabel 4.10 dapat dilihat bahwa dengan percepatan ( $x$ ) antara 0.01 sampai 2 diperoleh hasil tingkat pelampauan tahunan untuk satu *cluster*. Dari percepatan ( $x$ ) 0.01 memiliki nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,3984,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3201,E-01 untuk PSHA, sedangkan nilai tingkat pelampauan tahunan sebesar 5,4000,E-02 dan peluang kejadian gempa bumi sebesar 6,3212,E-01



begitupun seterusnya nilai tingkat pelampauan tahunan dan peluang gempa bumi menurun terhadap percepatan ( $x$ ).

**Aplikasi Ilustrasi**

Pada bagian ini dilakukan penggabungan *seismic hazard curves* untuk komputasi desain 1 – 1 – 0 hingga komputasi desain 1 – 1 - 8 untuk melihat perbedaan lebih jelas pada setiap desainnya. Maka, diperoleh *annual rate of exceedance* dan *probability of exceedance* sebagai berikut:



**Gambar 2.** Seismic Hazard Curve Generic Seismogenic Areal Source

Berdasarkan Gambar 4.11 dapat dilihat dari desain 1 – 1 – 0 hingga desain 1 – 1 – 8, baik plot PGA terhadap *probability of exceedance* maupun plot PGA terhadap *annual rate of exceedance* menunjukkan PSHA dan SPSHA yang mengalami penurunan artinya semakin tinggi nilai PGA peluang gempa bumi semakin rendah dan semakin tinggi nilai PGA tingkat pelampauan tahunan (*annual rate of exceedance*) semakin kecil. Pada seluruh desain diatas, dapat membuktikan satu gempa utama dan banyaknya gempa susulan memberikan hasil analisis yang lebih realistis dibanding nilai yang hanya memperhitungkan gempa utamanya saja.

**D. Kesimpulan**

Penelitian ini bertujuan memahami penerapan peluang bersyarat dan peluang total dalam perhitungan seismic hazard. Permasalahan ini telah terjawab dengan mengusulkan desain komputasi 1 – 1 – a, a = 1, 2, ..., 8. Berdasarkan hasil dan pembahasan dengan membandingkan *annual rate of exceedance* antara PSHA dan SPSHA dari efek gempa susulan pada *generic seismogenic areal source*, dapat disimpulkan SPSHA memberikan pendekatan yang lebih realistis dibandingkan dengan PSHA. Karena PSHA memiliki *annual rate of exceedance* yang lebih rendah dibandingkan SPSHA yang mempertimbangkan rangkaian gempa susulan yang mengikuti gempa utama. Hasil analisis ini berguna untuk meningkatkan tingkat keamanan dan persiapan terhadap potensi bahaya seismik untuk membantu dalam pengembangan strategi mitigasi risiko bencana secara tepat dalam merancang bangunan dan infrastruktur agar dapat menahan guncangan gempa bumi. Desain komputasi yang diusulkan dalam penelitian telah memberikan pemahaman yang lebih baik tentang peluang bersyarat dan peluang total.

**Daftar Pustaka**

[1] A. F. Nurfauzan and S. Darwis, “Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis Temporal Epidemic-Type Aftershock Sequence untuk Premi Asuransi,” *Jurnal Riset Statistika*, pp. 41–48, Jul. 2024, doi: 10.29313/jrs.v4i1.3864.

[2] R. E. Walpole and R. H. Myers, *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*, Ninth edition. Boston: Pearson, 2012.

- [3] R. V Hogg, J. W. McKean, and A. T. Craig, *Introduction to mathematical statistics*, Eighth edition. Boston: Pearson, 2019.
- [4] T. Lay and T. C. Wallace, *Modern global seismology*. Academic Press, 1955.
- [5] C. A. Cornell, "Engineering seismic risk analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606, 1968.
- [6] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 1996.
- [7] D. Oktoriandi, "Penerapan uji Q Cochran terhadap Atribut Produk Laptop Menggunakan Multiple Response Analysis (MRA)," *Jurnal Riset Statistika*, vol. 1, no. 2, pp. 127–134, Feb. 2022, doi: 10.29313/jrs.v1i2.521.
- [8] I. Iervolino, M. Giorgio, and B. Polidoro, "Probabilistic seismic hazard analysis for seismic sequences," *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, no. 66, pp. 1–8, 2013.
- [9] G. L. Yeo and C. A. Cornell, "A probabilistic framework for quantification of aftershock ground-motion hazard in California: Methodology and parametric study," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 38, no. 1, pp. 45–60, Jan. 2009, doi: 10.1002/eqe.840.
- [10] FERC Engineering Guidelines, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, vol. 20. 2014.
- [11] A. F. Nurfauzan and S. Darwis, "Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis Temporal Epidemic-Type Aftershock Sequence untuk Premi Asuransi," *Jurnal Riset Statistika*, vol. 4, no. 1, pp. 41–48, 2024, doi: 10.29313/jrs.v4i1.3864.
- [12] J. W. Baker, B. A. Bradley, and P. J. Stafford, *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.