

Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis Temporal Epidemic-Type Aftershock Sequence untuk Premi Asuransi

Arsyi Fatiha Nurfauzan, Sutawanir Darwis*

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

ARTICLE INFO

Article history :

Received : 11/5/2024
Revised : 31/7/2024
Published : 31/7/2024



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

Volume : 4
No. : 1
Halaman : 41 - 48
Terbitan : Juli 2024

ABSTRAK

Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan sejumlah energi pada batuan kerak bumi yang dapat memicu gempa susulan (*aftershock*). Dampak dari gempa bumi dapat menyebabkan kerugian ekonomi. Salah satu cara untuk menanggulangi hal tersebut dengan asuransi gempa bumi. Perhitungan premi konvensional hanya memperhitungkan gempa utama (*mainshock*) sementara *aftershock* disisihkan melalui proses *declustering*. Artikel ini menyajikan pengembangan *Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (CPSHA) untuk mengevaluasi risiko gempa bumi dengan memasukkan efek *aftershock* menggunakan model *Epidemic-Type Aftershock Sequence* (ETAS) secara temporal. Perhitungan premi asuransi gempa bumi umumnya hanya mempertimbangkan gempa utama, namun pendekatan ini menyertakan *aftershock* dalam estimasi premi. Model ETAS dengan parameter $\theta=(\mu,K,c,\alpha,p)$ diestimasi melalui *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Analisis ini menggabungkan *seismic hazard* ETAS dengan data kerusakan struktur untuk menentukan premi murni asuransi gempa bumi dengan *aftershock*. Data yang digunakan adalah data gempa bumi Jawa Barat 21 November 2022 sampai 18 Februari 2023 melalui katalog BMKG. Hasil yang diperoleh menunjukkan total premi (TP) asuransi yang harus dibayarkan oleh nasabah untuk *cluster* di wilayah Cianjur sebesar Rp 28.263.946,00 per tahun. Pendekatan ini memberikan kontribusi pada pemahaman risiko gempa bumi dan dapat digunakan dalam perhitungan premi asuransi yang lebih akurat.

Kata Kunci : Asuransi Gempa Bumi; Clustering; Seismic Hazard ETAS.

ABSTRACT

An earthquake is an event that releases energy in the earth's crustal rocks, which can trigger aftershocks. The economic losses caused by earthquakes can be mitigated through earthquake insurance. However, conventional premium calculations only take into account the main earthquake (*mainshock*), while aftershocks are excluded through a declustering process. This article presents the development of Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis (CPSHA) to evaluate earthquake risk by incorporating aftershock effects using a temporal Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) model. The approach is an improvement on traditional earthquake insurance premium calculations, which generally only consider the main earthquake. The ETAS model, with parameters $\theta = (\mu, K, c, \alpha, p)$, is estimated through Maximum Likelihood Estimation (MLE). This analysis combines seismic hazard ETAS with structural damage data to determine the pure premium of earthquake insurance with aftershock. The study uses West Java earthquake data from 21 November 2022 to 18 February 2023, sourced from the BMKG catalogue. The results indicate that customers in the Cianjur area must pay a total insurance premium (TP) of Rp 28.263.945,00 per year for clusters. This approach enhances the comprehension of earthquake risk and can aid in the calculation of more precise insurance premiums.

Keywords : Earthquake Insuranc; Clustering; Seismic Hazard ETAS.

Copyright© 2024 The Author(s).

A. Pendahuluan

Kepulauan Indonesia terletak diantara pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Ketiga lempeng tersebut saling bergerak antara satu terhadap yang lain. Pergerakan relatif ketiga lempeng ini merupakan generator utama aktivitas gempa bumi di Indonesia. Menurut BMKG salah satu wilayah dengan aktivitas gempa paling aktif adalah Jawa Barat. Tidak hanya gempa besar tetapi gempa susulan kecil sering terjadi di Jawa Barat.

Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan sejumlah energi pada batuan kerak bumi yang umumnya mengelompok dalam ruang dan waktu. Sebagian besar *cluster* gempa bumi terdiri dari satu atau lebih gempa bumi dengan magnitudo besar serta kejadian-kejadian yang lebih kecil. Dalam *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) konvensional hanya gempa utama yang dipertimbangkan untuk penilaian bahaya dalam jangka panjang. Gempa susulan dikarakterisasi dalam estimasi bahaya *aftershock* PSHA (APSHA) yang diusulkan oleh Yeo dan Cornell [1] untuk evaluasi bahaya jangka pendek. PSHA mengacu pada *homogeneous Poisson process* (HPP) untuk menggambarkan kejadian gempa bumi, sedangkan APSHA mengestimasi kejadian gempa susulan sebagai *non-homogeneous Poisson process* (NHPP) yang lajunya bergantung pada magnitudo gempa utama yang memicu rangkaian gempa bumi. Metode analitis untuk memperhitungkan efek gempa susulan dilakukan dengan PSHA berbasis *cluster* (CPSHA) dimana gempa bumi dengan magnitudo tertentu memicu rangkaian gempa susulannya sendiri [2][3]. CPSHA dengan memperhitungkan gempa susulan menggunakan model temporal *epidemic-type aftershock sequence* (ETAS). Model ETAS merupakan model urutan gempa susulan tipe epidemik yang menggambarkan pengelompokan aktivitas seismik secara temporal yang dirancang oleh Ogata [4]. Model ini dibentuk berdasarkan hukum Omori yang dimodifikasi dan hubungan Gutenberg-Richter.

Kejadian gempa bumi dapat menyebabkan kerugian ekonomi [5]. Oleh karena itu, diperlukan suatu kebijakan nasional untuk memberi asuransi bagi masyarakat yang terkena dampak bencana, salah satunya adalah asuransi gempa bumi. Pemerintah cenderung mencari jalan keluar untuk mengalihkan risiko gempa bumi. Peran asuransi sangat dibutuhkan dalam penanggulangan risiko gempa bumi, meningkatkan kesiapsiagaan, manajemen, dan kemampuan penanganan darurat [6]. Seiring waktu berlalu data dan metode baru telah disediakan oleh para peneliti untuk memungkinkan pemodelan dan analisis yang lebih efektif untuk mengukur premi asuransi. Namun, validitas besar tarif premi masih menjadi bahan diskusi di kalangan akademisi dan juga di sektor asuransi.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut: “Bagaimana mengembangkan model *seismic hazard* dengan melibatkan efek gempa susulan dalam CPSHA? Serta bagaimana menerapkan CPSHA dan informasi kerusakan struktur bangunan untuk menghitung besar premi asuransi bangunan akibat gempa bumi?”. Selanjutnya, tujuan dalam penelitian ini diuraikan dalam pokok sbb. Mengembangkan model *seismic hazard* dengan melibatkan efek gempa susulan dalam CPSHA. Menerapkan CPSHA dan informasi kerusakan struktur bangunan untuk menghitung besar premi asuransi bangunan akibat gempa bumi.

B. Metode Penelitian

Model Temporal ETAS

Model proses titik [7] adalah alat yang tepat untuk menggambarkan aktivitas rangkaian gempa bumi. Model ETAS merupakan proses titik dimana setiap kejadian memiliki kemampuan untuk menghasilkan kejadian turunannya. Bentuk temporal dari model ETAS yang diperkenalkan oleh Ogata [4] memiliki fungsi intensitas bersyarat yang dikondisikan pada sejarah waktu kejadian t_i dan magnitudo m_i dari gempa bumi ke- i sampai dengan waktu t adalah sebagai berikut:

$$\lambda(t|H_t) = \mu + \sum_{i=1}^{N(t)} \frac{K \times 10^{\alpha(m_i - m_{min})}}{(t - t_i + c)^p} \quad (1)$$

Dimana μ adalah tingkat kejadian yang berhubungan dengan seismisitas latar belakang dan α adalah parameter produktivitas. $N(t)$ adalah semua kejadian i sehingga $t_i < t$. K , c , dan p adalah parameter Omori.

Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

PSHA biasanya mengacu pada HPP untuk memodelkan kejadian gempa secara probabilistik. Laju HPP λ dimana $f(m)$ dan $f(r)$ adalah fungsi densitas peluang (PDF) dari magnitudo gempa utama dan jarak dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\lambda(PGA > x) = v \cdot \int_R \int_{m_0}^{m_{max}} P(PGA > x|m, r) \cdot f(m) \cdot f(r) \cdot dm \cdot dr \tag{2}$$

Dimana $f(m)$ didasarkan pada hubungan GR dan $f(r)$ bergantung pada konfigurasi geometri sumber lokasi.

Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis (CPSHA)

Semua gempa bumi dapat berperan pada *seismic hazard* dengan gempa utama dan gempa susulan dianggap sebagai *cluster* independen [8]. Gempa susulan dari setiap *cluster* dapat dimodelkan berdasarkan hubungan yang sesuai seperti model ETAS, sehingga tingkat tahunan berbasis *cluster* yang melebihi tingkat gerakan tanah yang ditentukan dapat diperkirakan pada lokasi tertentu. Jumlah gempa susulan yang diperkirakan terjadi dalam interval $(t, t + \Delta T_A)$ yang berlaku untuk NHPP adalah sebagai berikut:

$$N_{A|m_E}(0, \Delta T_A) = \frac{10^{\alpha+b(m_E-m_{min})} - 10^{\alpha}}{p - 1} \times [c^{1-p} - (\Delta T_A + c)^{1-p}] \tag{3}$$

Probabilitas pelampauan untuk setiap *cluster* adalah sebagai berikut:

$$P_c = 1 - (1 - P[(PGA \geq x)_E]) \times e^{-N_{A|m}(0, \Delta T_A) \times P[PGA \geq x|m_A, r_A]} \tag{4}$$

Estimasi bahaya berdasarkan *cluster* adalah hasil kali antara probabilitas yang diperoleh untuk setiap *cluster* dikalikan laju tahunan *cluster* sehingga menghasilkan model *annual rate of exceedance* sebagai berikut:

$$\lambda(PGA > x) = \sum v_c \times (1 - (1 - P[(PGA \geq x)_E]) \times e^{-N_{A|m}(0, \Delta T_A) \times P_{A|m}[PGA \geq x]}) \tag{5}$$

Damage Probability Matrix (DPM)

Damage probability matrix (DPM) merupakan estimasi kerusakan empiris. DPM terdiri dari probabilitas DS ketika tipe struktur tertentu (k) terkena intensitas gempa (I). Dengan menggunakan data kerusakan setelah gempa yang tersedia, setiap elemen DPM dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_k(DS, I) = \frac{N(DS, I)}{N(I)} \tag{6}$$

Dimana $P_k(DS, I)$ adalah probabilitas DS pada bangunan tipe- k pada intensitas gempa (I), $N(DS, I)$ adalah jumlah bangunan tipe- k dalam kondisi kerusakan DS , dan $N(I)$ adalah jumlah bangunan tipe- k pada intensitas gempa (I).

Tabel 1. *Damage Probability Matrix (DPM)*

Damage State (DS)	Central Damage Ratio (CDR) %	Intensitas				
		V	VI	VII	VIII	IX
Tidak ada kerusakan (N)	0					
Kerusakan ringan (L)	5					
Kerusakan sedang (M)	30					
Kerusakan berat/runtuh (H/C)	85					

Sumber: [9]

Distribusi kerusakan dengan masing-masing tingkat intensitas dijelaskan dengan parameter tunggal yang disebut *mean damage ratio* (MDR). MDR merupakan rata-rata tertimbang dari rasio kerusakan untuk setiap tingkat intensitas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$MDR_k(I) = \sum_{DS} P_k(DS, I) \times CDR_{DS} \tag{7}$$

CDR_{DS} : Rasio kerusakan pusat untuk memperkirakan DR di setiap DS

Premi Asuransi Gempa Bumi

Premi asuransi gempa bumi dihitung berdasarkan frekuensi yang diperoleh dari *seismic hazard* (SH) dan tingkat kerusakan gempa bumi yang diperoleh dari rasio kerusakan rata-rata (MDR). *Expected Annual Damage Ratio* (EADR) adalah kuantitas tanpa unit dan menyatakan persentase tarif asuransi dari biaya penggantian unit harta benda dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$EADR_k = \sum_I MDR_k(I) \times SH_I \tag{8}$$

SH_I : Nilai dari *seismic hazard*

Pure Risk Premium (PRP) dari suatu harta benda harus dihitung sebanding dengan nilai harta benda yang sesuai dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$PRP_k = EADR_k \times INSV \tag{9}$$

PRP_k : Biaya yang harus dibayarkan setiap tahun untuk bangunan tipe- k

$INSV$: Nilai pertanggungan bangunan

Total Insurance Premium (TP) atau total premi asuransi yang akan dikenakan oleh perusahaan asuransi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$TP_k = \frac{PRP_k}{1 - LF} \tag{10}$$

TP_k : Premi yang harus dibayarkan oleh pihak tertanggung

LF : *Local factor* yang ditetapkan sama dengan 0.4 (Gurpinar dan Yucemen, 1980)

Data

Data yang digunakan adalah data sekunder dari *website* Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Data dalam penelitian ini meliputi tanggal kejadian dan waktu yang digunakan untuk menentukan *cluster*, garis lintang dan garis bujur yang digunakan untuk membuat peta sebaran gempa bumi, kedalaman (km) yang digunakan untuk perhitungan jarak hiposenter gempa bumi, serta magnitudo (M) yang digunakan untuk perhitungan peluang terjadinya gempa bumi. Data diambil dalam rentang waktu 90 hari dimulai dari 21 November 2022 sampai 18 Februari 2023 dengan magnitudo minimum 2.5 M dan kedalaman 0-100 km di wilayah Jawa Barat.

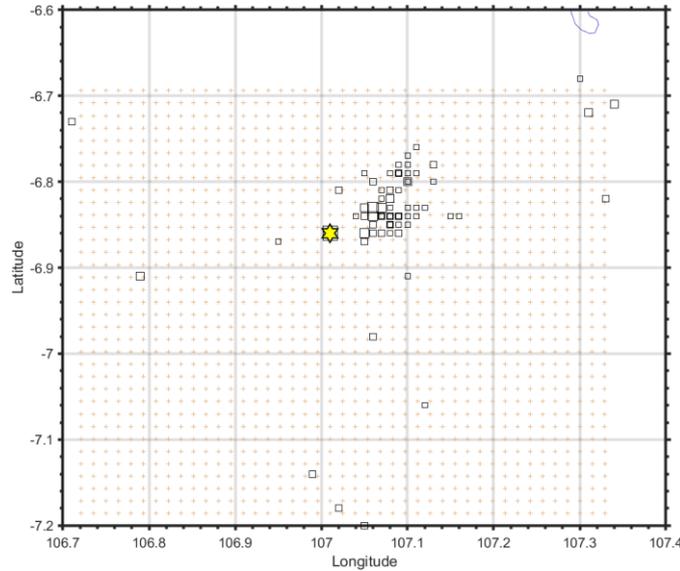
C. Hasil dan Pembahasan

Deskripsi Data

Data yang digunakan merupakan kejadian gempa bumi di Jawa Barat. Dari beberapa *cluster* gempa bumi yang terjadi di Jawa Barat hanya diambil satu *cluster* yaitu gempa bumi di Cianjur pada tanggal 21 November 2022 dengan magnitudo gempa utama 5.6 M yang terletak pada koordinat 6.86°LS 107.01°BT dengan Pusat gempa bumi berada di darat 10 km Barat Daya Kabupaten Cianjur pada kedalaman 11 km. Kejadian gempa bumi tersebut memiliki rangkaian gempa susulan. Dalam rentang waktu 90 hari terdapat 74 gempa susulan dengan magnitudo minimum 2.5 M dan magnitudo maksimum 4.5 M. Deskripsi data disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Deskripsi data gempa bumi

Gempa Utama (<i>mainshock</i>)	
Magnitudo	5.6 M
Gempa Susulan (<i>aftershock</i>)	
n	74
Magnitudo minimum	2.5 M
Magnitudo maksimum	4.5 M
Rata-rata magnitudo	2.9 M



Gambar 1. Hasil declustering sebaran data dalam satu cluster di Jawa Barat, satu gempa utama dan 74 gempa susulan

Penerapan Model Temporal ETAS

Model ETAS dibedakan menjadi *null model* dan *full model*. *Null model* mengacu pada model dengan magnitudo mengikuti distribusi eksponensial yang tidak bergantung pada kejadian masa lalu, sedangkan *full model* mengacu pada model dengan magnitudo mengikuti distribusi gamma yang bergantung pada kejadian masa lalu. Parameter ETAS diestimasi menggunakan metode MLE [10]. Hasil estimasi parameter model ETAS disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Estimasi Parameter Model ETAS Data Gempa Bumi di Jawa Barat

Parameter ETAS	<i>Null Model</i>	<i>Full Model</i>
$p_1 = \mu$	0.204	0.05
$p_2 = K$	1.335×10^{-19}	3.1
$p_3 = \alpha$	14.877	13
$p_4 = c$	3.963	0.02
$p_5 = p$	1.953	1.1
p_6	2.071	2.071
p_7	0	0.1
log L	-46.398	-

Keterangan:

- μ : laju kegempaan dasar
- K : produktivitas gempa susulan
- α : efisiensi gempa bumi dengan magnitudo tertentu menghasilkan gempa susulan
- c : skala waktu laju peluruhan gempa susulan
- p : laju peluruhan gempa susulan

Berdasarkan tabel 3, hasil estimasi parameter model ETAS dengan menggunakan *null model* maka fungsi intensitas bersyarat model temporal ETAS dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\lambda(t|H_t) = 0.204 + \sum_{i=1}^{N(t)} \frac{1.335 \times 10^{-19} \times 10^{14.877(m_i - m_{min})}}{(t - t_i + 3.963)^{1.953}}$$

Dimana $N(t)$ adalah semua kejadian i sehingga $t_i < t$.

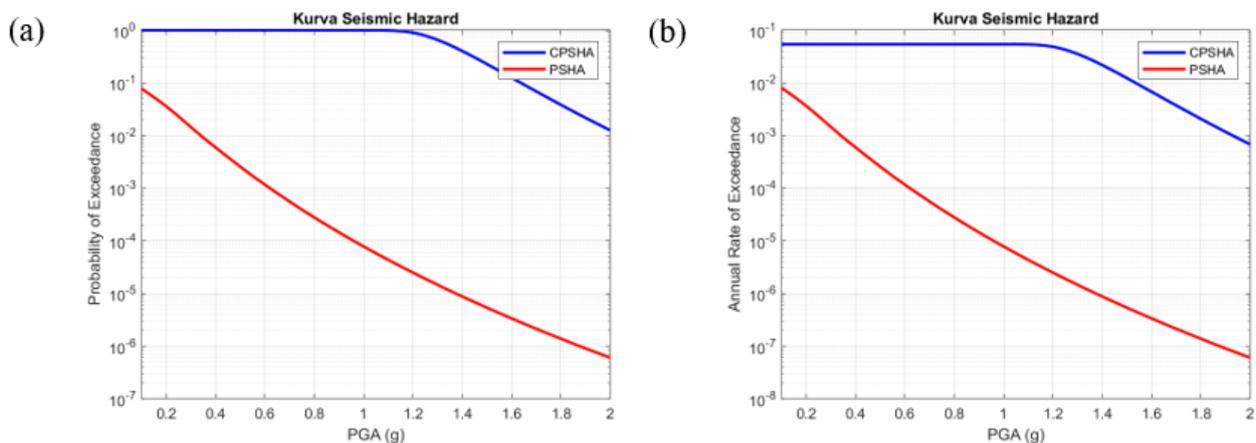
Clustering Probabilistic Seismic Hazard Analysis (CPSHA)

Dalam CPSHA gempa utama dan gempa susulan dianggap sebagai *cluster* independen. Gempa susulan dimodelkan dengan model temporal ETAS. Beberapa parameter pada CPSHA disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Parameter CPSHA temporal ETAS

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i> (days)	<i>p</i>	<i>m_{min}</i>	<i>m_{max}</i>	<i>m_{mainshock}</i>
4.5963	0.9709	3.963658	1.95394	2.5	4.5	5.6

Dalam melakukan perhitungan CPSHA temporal ETAS dimana nilai *b* dan *a* diperoleh dari nilai hubungan Gutenberg-Richter (GR), *c* dan *p* diperoleh dari model temporal ETAS, *m_{min}* dan *m_{max}* adalah nilai minimum dan maksimum dari gempa susulan, dan *m_{mainshock}* adalah magnitudo dari gempa utama. Selanjutnya dibuat visualisasi dengan menggunakan kurva *seismic hazard* untuk menjelaskan bahaya agregat di suatu lokasi dan menggambarkan nilai PGA yang terlampaui dengan probabilitas (%) tertentu dalam rentang waktu tertentu.



Gambar 2. (a) Perbandingan *probability of exceedance* (POE) pada CPSHA dan PSHA konvensional dan (b) Perbandingan *annual rate of exceedance* pada CPSHA dan PSHA konvensional.

Dari kurva *seismic hazard* dengan sumbu mendatar menunjukkan nilai PGA dan sumbu tegak menunjukkan *probability of exceedance* (POE) diperoleh nilai *SH_I* sesuai dengan skala intensitas gempa bumi. Nilai *SH_I* disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil *SH_I* berdasarkan skala intensitas gempa bumi

Skala Intensitas Gempa Bumi (MMI)	<i>SH_I</i>
I	0.0170
II	0.0530
III	0.0700
IV	0.2500
V	0.5300
VI	0.4747

Estimasi Kerusakan Gempa Bumi

Dalam mengestimasi kerusakan gempa bumi digunakan *damage probability matrix* (DPM) untuk menghitung nilai peluang tingkat kerusakan pada bangunan atau tempat tinggal yang terdampak gempa bumi pada intensitas tertentu. Namun, data tingkat kerusakan bangunan di Indonesia masih belum lengkap dan sulit untuk

mendapatkannya maka sebagai acuan akan digunakan data tingkat kerusakan atau DPM dari wilayah Turki. Hasil dari DPM disajikan pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil *Damage Probability Matrix* (DPM)

<i>Damage State</i>	<i>CDR (%)</i>	<i>Intensity</i>					
		I	II	III	IV	V	VI
<i>None</i>	0	-	-	-	-	0.833	0.433
<i>Light</i>	5	-	-	-	-	0.167	0.420
<i>Moderate</i>	30	-	-	-	-	0	0.066
<i>Heavy/Collapse</i>	85	-	-	-	-	0	0.081
<i>MDR (%)</i>		-	-	-	-	0.84	10.97

Premi Asuransi Gempa Bumi

Premi asuransi gempa bumi dihitung berdasarkan nilai *seismic hazard* dan tingkat kerusakan bangunan akibat gempa bumi. Perhitungan asuransi gempa bumi dilakukan dengan menghitung EADR atau rasio kerusakan tahunan. Setelah mendapatkan nilai EADR selanjutnya dihitung PRP atau premi murni yaitu biaya yang harus dibayarkan setiap tahun dimana INSV atau nilai pertanggungan bangunan sebesar Rp 3.000.000 untuk tipe bangunan perumahan dengan 1 lantai. INSV diperoleh dari nilai DBKB (Daftar Biaya Komponen Bangunan). TP atau total premi yang harus dibayarkan oleh pihak tertanggung kepada pihak asuransi hasilnya disajikan pada tabel 7.

Tabel 7. Hasil perhitungan EADR, PRP, dan TP

Intensitas	<i>MDR</i>	<i>SH_I</i>	<i>EADR (%)</i>	<i>PRP</i>	<i>TP</i>
I	0.0000	0.0170	0.0000		
II	0.0000	0.0530	0.0000		
III	0.0000	0.0700	0.0000		
IV	0.0000	0.2500	0.0000	16958367	28263946
V	0.8400	0.5300	0.4452		
VI	10.9700	0.4747	5.2076		
Jumlah			5.6528		

Berdasarkan analisis data gempa bumi di Jawa Barat untuk *cluster* di wilayah Cianjur dengan mempertimbangkan gempa susulan untuk tipe bangunan perumahan dengan 1 lantai diperoleh bahwa rasio kerusakan tahunan (EADR) adalah 5.6528% sehingga dihasilkan premi murni (PRP) sebesar Rp 16.958.367,00 per tahun dengan total premi (TP) asuransi yang harus dibayarkan oleh nasabah sebagai pihak tertanggung kepada pihak asuransi sebesar Rp 28.263.946,00 per tahun.

D. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dalam penelitian ini, peneliti menyimpulkan beberapa hasil penelitian sebagai berikut. Dalam PSHA mengacu pada *homogeneous Poisson process* (HPP) untuk menggambarkan kejadian gempa bumi dengan model laju tahunan sebagai berikut:

$$\lambda(PGA > x) = v \cdot \int_R \int_{m_0}^{m_{max}} P(PGA > x|m, r) \cdot f(m) \cdot f(r) \cdot dm \cdot dr$$

Lalu dikembangkan model *seismic hazard* dengan melibatkan efek gempa susulan yang disebut CPSHA temporal ETAS. CPSHA mengacu pada *non-homogeneous Poisson process* (NHPP) dimana lajunya bergantung pada magnitudo gempa utama dengan model laju tahunan sebagai berikut:

$$\lambda(PGA > x) = \sum v_c \times (1 - (1 - P[(PGA \geq x)_E]) \times e^{-N_{A|m}(0, \Delta T_A) \times P_{A|m}[PGA \geq x]})$$

Pengembangan model *seismic hazard* dalam CPSHA dapat meningkatkan akurasi penilaian bahaya serta dapat meningkatkan kesiapsiagaan terhadap risiko gempa bumi.

Dengan menerapkan metode CPSHA temporal ETAS dari data gempa bumi di Jawa Barat untuk *cluster* di wilayah Cianjur dari tanggal 21 November 2022 sampai 18 Februari 2023 serta mempertimbangkan informasi tentang kerusakan struktur bangunan diperoleh hasil total premi asuransi yang harus dibayarkan oleh nasabah sebagai pihak bertanggung kepada pihak asuransi sebesar Rp 28.263.946,00 per tahun.

Daftar Pustaka

- [1] 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.
- [2] I. Iervolino, "Generalized Earthquake Counting Processes for Sequence-Based Hazard," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 109, no. 4, pp. 1435–1450, Aug. 2019, doi: 10.1785/0120180271.
- [3] S. Yaghmaei-Sabegh, P. Shoaefar, and N. Shoaefar, "Probabilistic Seismic-Hazard Analysis Including Earthquake Clusters," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 107, no. 5, pp. 2367–2379, Oct. 2017, doi: 10.1785/0120170031.
- [4] Y. Ogata, "Estimation of The Parameters in The Modified Omori Formula for Aftershock Frequencies by The Maximum Likelihood Procedure," *Journal of Physics of the Earth*, vol. 31, no. 2, pp. 115–124, 1983, doi: 10.4294/jpe1952.31.115.
- [5] R. Nurfitri and T. S. Yanti, "Pemodelan Umur Harapan Hidup di Jabar Tahun 2021 Menggunakan Spatial Durbin Model," *Jurnal Riset Statistika*, vol. 3, no. 2, pp. 137–146, Dec. 2023, doi: 10.29313/jrs.v3i2.3023.
- [6] N. Suhartina and I. Sukarsih, "Model SVEIR Penyebaran Penyakit Rabies Terhadap Anjing dengan Vaksinasi," *DataMath: Journal of Statistics and Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 25–32, 2024.
- [7] H. M. Taylor and S. Karlin, *An Introduction to Stochastic Modeling*, 3rd Ed. Academic Press, 1998.
- [8] J. Baker, B. Bradley, and P. Stafford, *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge University Press, 2021. doi: 10.1017/9781108425056.
- [9] A. Deniz, "Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates Based Stochastic Methods," Middle East Technical University, 2006.
- [10] D. Harte, "PtProcess: An R Package for Modelling Marked Point Processes Indexed by Time," *J Stat Softw*, vol. 35, no. 8, 2010, doi: 10.18637/jss.v035.i08.