

PEMODELAN RISIKO KERUGIAN AKIBAT GEMPA BUMI: STUDI KASUS WILAYAH M7 MEGATHRUST INDONESIA

Dea Permata Sari¹, Azizah²

^{1, 2} Universitas Negeri Malang

dea.permata.2203126@students.um.ac.id¹, azizah.fmipa@um.ac.id²

Received 27 Maret 2025; revised 23 Juni 2025; accepted 26 Juni 2025.

ABSTRAK

Indonesia memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi akibat lokasinya yang berada di zona *megathrust*, termasuk di wilayah M7 Selat Sunda Banten yang berpotensi mengalami gempa berkekuatan besar. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mengestimasi potensi kerugian finansial akibat gempa bumi menggunakan *Earthquake Catastrophe Model* yang terdiri dari empat modul utama: *hazard, inventory, vulnerability, dan loss*. Data gempa bumi yang diperoleh dari situs resmi USGS dipisahkan (*declustering*) untuk memperoleh data gempa bumi *mainshock*. Selanjutnya, distribusi Generalized Pareto digunakan untuk memodelkan magnitudo gempa bumi, sementara nilai *spectral acceleration* dihitung menggunakan fungsi atenuasi Zhao dkk. (2006). Simulasi Monte-Carlo dilakukan untuk membangkitkan kejadian stokastik gempa bumi, serta untuk membangkitkan *total aggregate loss (S)*, yang kemudian dimodelkan menggunakan *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan tingkat kepercayaan 95%, estimasi kerugian finansial akibat gempa bumi di zona *megathrust* M7 Selat Sunda Banten tidak akan melebihi Rp298 miliar. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam perencanaan strategi mitigasi risiko bencana serta skema pembiayaan asuransi bagi pemerintah daerah dan sektor keuangan di Indonesia.

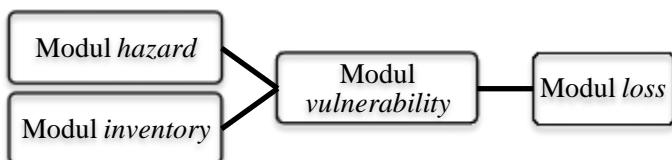
Kata kunci: gempa bumi, kerugian finansial, *megathrust*, model probabilistik, *Value-at-Risk*.

ABSTRACT

Indonesia faces a high risk of earthquakes due to its location in the megathrust zone, including the M7 Sunda Strait segment, which has the potential for high-magnitude earthquakes. This study aims to model and estimate potential financial losses caused by earthquakes using the Earthquake Catastrophe Model, which consists of four main modules: hazard, inventory, vulnerability, and loss. Earthquake data obtained from the official USGS website were processed using the declustering method to extract mainshock events. The Generalized Pareto Distribution was

Pemerintah mengalokasikan rata-rata Rp3,1 triliun setiap tahun untuk dana cadangan bencana. Akan tetapi, skala bencana besar seperti gempa dan tsunami Aceh tahun 2004 menimbulkan kerugian hingga Rp51,4 triliun (Pusat Kebijakan Regional dan Bilateral, 2019). Keterbatasan anggaran tersebut menunjukkan perlunya pendekatan alternatif dalam strategi Pembiayaan dan Asuransi Risiko Bencana (PARB). Penerapan skema investasi dalam pengelolaan risiko bencana dipandang sebagai langkah yang efektif untuk memenuhi kewajiban di masa mendatang, khususnya dalam menghadapi risiko gempa bumi.

Dalam menghadapi risiko gempa bumi skala tinggi dan potensi kerugian finansial yang besar di Indonesia, pemodelan kerugian finansial yang akurat menjadi penting untuk mendukung perumusan strategi Pembiayaan dan Asuransi Risiko Bencana (PARB) yang efektif. Pendekatan probabilistik dapat diterapkan untuk mengukur ketidakpastian gempa bumi dan memodelkan kerugian finansial tersebut (Pratama, 2022). Pemodelan kerugian finansial pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Earthquake Catastrophe Model*, yang terdiri dari empat modul: *hazard*, *inventory*, *vulnerability*, dan *loss* (Grossi & Kunreuther, 2005). Modul *hazard* berisi karakteristik gempa bumi, seperti koordinat *epicentre*, kedalaman, dan *moment magnitude*. Modul *inventory* memuat data risiko yang diasuransikan (*exposure*), misalnya properti, yang di dalamnya berisi koordinat geografis, alamat, usia bangunan, dan informasi lainnya. Modul *vulnerability* berisi kurva kerentanan (*vulnerability curve*) untuk menghitung kerusakan pada *exposure*. Modul *loss* memuat perhitungan kerugian finansial serta pemodelan risikonya. Gambar 2 berikut menunjukkan ilustrasi hubungan antar modul dalam *Earthquake Catastrophe Model*.



Gambar 2. Skema Hubungan Modul Dalam *Earthquake Catastrophe Model*

Penelitian terdahulu terkait *catastrophe bond* telah banyak dilakukan dengan fokus untuk memahami peran *catastrophe bond* sebagai instrumen keuangan untuk mitigasi risiko bencana dan penentuan premi asuransi gempa bumi di Indonesia. Arham & Firmansyah (2019) menganalisis kontribusi *catastrophe*

bond dalam mengurangi dampak bencana serta potensi pemberian bagi pemerintah. Sementara itu, Tampubolon & Raissa (2020) mengusulkan strategi pemberian dengan layer-layer serta melibatkan penentuan *parametric trigger* yang optimal, seperti magnitudo gempa, untuk menarik minat *investor* dan pemerintah. Di sisi lain, penelitian Pratama (2022) berfokus pada pengembangan *Event Loss Table* (ELT) dengan memanfaatkan modul *hazard*, *inventory*, *vulnerability*, dan *loss* pada *catastrophe model* untuk memodelkan kerugian gempa bumi secara akurat pada bangunan sekolah di Padang.

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mengestimasi kerugian finansial yang dialami oleh *exposure* terdampak gempa bumi di zona *megathrust* M7 Selat Sunda Banten, Indonesia, menggunakan *Earthquake Catastrophe Model*. Secara spesifik, penelitian ini berisi setiap tahapan pembangunan modul *hazard*, *inventory*, dan *vulnerability*, hingga proses konstruksi *Event Loss Table* (ELT) berbasis *collective risk model* dengan melibatkan simulasi Monte-Carlo. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar dalam perumusan skema pemberian risiko bencana berbasis data historis bagi pemerintah daerah dan perusahaan asuransi.

METODE PENELITIAN

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini meliputi frekuensi terjadinya gempa bumi (N_i), kerugian finansial ke- j akibat gempa bumi ke- i (X_{ij}), dan kerugian agregat akibat gempa bumi ke- i (S_i). Instrumen yang digunakan meliputi *software QGIS*, *Python*, dan *Microsoft Excel*.

Penelitian diawali dengan penyiapan data gempa bumi yang diperoleh dari situs resmi USGS. Data yang berisi informasi koordinat *latitude* dan *longitude*, *moment magnitude*, kedalaman gempa bumi, serta informasi lainnya, dibersihkan (*cleaning*) dan diseleksi agar hanya mencakup kejadian di zona *megathrust* M7 saja. Selain itu, dilakukan konversi satuan *moment magnitude* agar seluruh data seragam dalam satuan M_w .

Proses penyiapan data dilanjutkan dengan pemisahan (*declustering*) data gempa bumi dengan metode *window* oleh Gardner & Knopoff (1974). Metode ini mengidentifikasi gempa *aftershock* berdasarkan kedekatan *spatio-temporal* dengan gempa sebelumnya, dengan asumsi bahwa kekuatan gempa sebelumnya lebih besar

dari rata-rata gempa dalam durasi yang lama. Untuk setiap gempa yang ada di suatu katalog, gempa setelahnya dikategorikan sebagai *aftershock* jika berada dalam ruang dan waktu tertentu (Juellyan dkk., 2023), yang ditentukan dengan persamaan (1) dan (2) berikut,

$$d(M_i) = 10^{0.1238M+0.983} \quad (1)$$

$$t(M_i) = \begin{cases} 10^{0.032M_i+2.7389}, & M_i \geq 6.5 \\ 10^{0.5409M_i-0.547}, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2)$$

di mana M_i menyatakan kekuatan magnitudo gempa ke- i , t menyatakan selisih waktu terjadinya suatu gempa dan gempa sebelumnya, serta d menyatakan jarak lokasi terjadi suatu gempa dan gempa sebelumnya. Proses *declustering* menghasilkan sejumlah data gempa bumi *mainshock*.

Setelah data disiapkan, langkah selanjutnya adalah pengolahan data melalui beberapa prosedur. Modul *hazard* dalam *Earthquake Catastrophe Model* dibangun dengan memodelkan data gempa bumi *mainshock* menggunakan distribusi Generalized Pareto (GPD). Parameter GPD diestimasi menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) dan dengan melihat plot *Mean Residual Life* (MRL). Fungsi distribusi GPD didefinisikan pada persamaan (3) berikut (Tampubolon & Raissa, 2020),

$$F_x(x; \xi, u, \sigma) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{\xi}}, & \xi \neq 0, \\ 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right), & \xi = 0. \end{cases} \quad (3)$$

di mana ξ menyatakan parameter bentuk (*shape*), u menyatakan parameter *threshold*, serta σ menyatakan parameter skala (*scale*).

Setelah memperoleh parameter GPD, dilakukan uji kecocokan model dengan Uji Cramér-von Mises. Hipotesis Uji Cramér-von Mises, antara lain,

H_0 : data berasal dari distribusi yang diuji

H_1 : data tidak berasal dari distribusi yang diuji

di mana jika $p_{value} > 0,05$, maka H_0 diterima, artinya data berdistribusi GPD dengan parameter yang ditaksir. Statistik Uji Cramér-von Mises dituliskan pada persamaan (4) berikut,

$$T = \sum_{i=1}^n \left(F(x_{(i)}) - \frac{2i-1}{2n} \right)^2 + \frac{1}{12n} \quad (4)$$

dengan $x_{(i)}$ adalah observasi terurut serta $F(x_{(i)})$ adalah fungsi distribusi kumulatif dari distribusi yang diuji. Setelah memastikan bahwa data gempa bumi *mainshock* berdistribusi GPD, dilakukan simulasi Monte-Carlo sebanyak 1,000 kali sehingga diperoleh himpunan kejadian stokastik gempa bumi *mainshock*.

Selain membangun modul *hazard*, dilakukan pembangunan modul *inventory*. Modul *inventory* dibangun dengan memanfaatkan karakteristik dan nilai *exposure*. Melalui fungsi atenuasi Zhao dkk. (2006), diperoleh nilai *spectral acceleration*, yaitu nilai maksimum percepatan guncangan tanah akibat gempa di suatu lokasi.

Hasil pembangunan modul *hazard* dan modul *inventory* selanjutnya menjadi dasar pembangunan modul *vulnerability*. Kurva kerentanan yang dikembangkan oleh Martins & Silva (2021) dimanfaatkan untuk menghitung *loss ratio* karena kurva tersebut merupakan kurva yang menampilkan plot antara nilai *spectral acceleration* terhadap *loss ratio*. *Loss ratio* ini menjadi dasar dalam perhitungan kerugian finansial.

Memasuki modul *loss*, dilakukan konstruksi *Event Loss Table* (ELT) berdasarkan hasil pembangunan modul-modul sebelumnya. Frekuensi terjadinya gempa bumi (N_i) diasumsikan berdistribusi Poisson dengan parameter $\frac{1}{ARI}$. Pada penelitian ini, ditetapkan nilai ARI (*Average Recurrence Intervals*) sebesar 250 tahun. Bentuk matematis dari ARI dituliskan pada persamaan (5) berikut,

$$ARI(\tau) = E[Z] = \frac{1}{p} = \frac{1}{\Pr[M_w \geq M | M_w \geq M_t]} \quad (5)$$

di mana nilai $\frac{1}{\tau} = \lambda$ disebut *average recurrence rate*.

Lebih lanjut, fungsi kepadatan peluang dari variabel kerugian finansial ke- j akibat gempa bumi ke- i (X_{ij}) ditaksir menggunakan pendekatan non-parametrik *Kernel Density Estimation* (KDE). Definisi *Kernel Density Estimator* dari fungsi distribusi diberikan pada persamaan (6) berikut (Klugman dkk., 2019),

$$\hat{F}(x) = \sum_{j=1}^k p(y_j) K_{y_j}(x) \quad (6)$$

di mana $p(y_j)$ menunjukkan probabilitas yang diberikan kepada nilai y_j oleh distribusi empiris ($j = 1, \dots, k$) dan $K_{y_j}(x)$ merupakan fungsi distribusi untuk distribusi kontinu yang memiliki rata-rata y . KDE yang digunakan pada penelitian

ini adalah Kernel Epanechnikov. Fungsi Kernel Epanechnikov didefinisikan pada persamaan (7) berikut,

$$K_E(\psi) = \frac{3}{4}(1 - \psi^2), \text{ untuk } -1 < \psi < 1 \quad (7)$$

di mana $\psi = \frac{x-x_i}{b}$, serta $b_{opt} = 1,06 \times s \times n^{-0.2}$ (Herawati dkk., 2017).

Variabel kerugian agregat akibat gempa bumi ke- i (S_i) diperoleh dari penerapan *collective risk model* (CRM). Definisi CRM dituliskan pada persamaan (8) berikut (Tse, 2009),

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij} \quad (8)$$

dengan $E[S_i] = E[N_i]E[X_{ij}]$, serta $Var(S_i) = E[N_i]Var(X_{ij}) + E[X_{ij}]Var(N_i)$.

ELT yang telah dikonstruksi kemudian disimulasikan menggunakan metode Monte-Carlo sebanyak 1,000 kali sehingga diperoleh data 1,000 estimasi *total aggregate loss* (S). Data tersebut selanjutnya dimodelkan menggunakan *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model*, dengan fungsi peluangnya didefinisikan pada persamaan (9) berikut (Tampubolon dkk., 2023),

$$f(s; \theta, \mu, \sigma^2) = \theta \times 1_{s=0} + (1 - \theta) \times f_{LN}(s; \mu, \sigma^2) \times 1_{s>0} \quad (9)$$

dengan,

$$f_{LN}(s; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\frac{1}{s} \right) \exp \left(-\frac{(\ln(s) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right), s > 0, \mu \in \mathbb{R}, \sigma^2 > 0 \quad (10)$$

$$E_{LN}[S] = \exp \left(\mu + \frac{\sigma^2}{2} \right) \quad (11)$$

$$Var_{LN}(S) = [\exp(\sigma^2) - 1] \exp(2\mu + \sigma^2) \quad (12)$$

Setelah mengetahui distribusi *total aggregate loss* (S), kerugian finansial yang mungkin terjadi diestimasi dengan ukuran risiko *Value at Risk* (VaR). VaR dihitung sebagai persentil distribusi kerugian S , sehingga dapat diartikan bahwa nilai VaR untuk tingkat kepercayaan tertentu menunjukkan potensi maksimum kerugian yang mungkin dialami. Secara formal, diasumsikan X menyatakan peubah acak dari suatu kerugian, VaR dari X pada tingkat $100p\%$ yang dinotasikan sebagai $VaR_p(X)$ atau π_p tertulis pada persamaan (13) berikut (Klugman dkk., 2019).

$$VaR_p(X) = \inf_{x \geq 0} [x | F_X(x) \geq p], 0 < p < 1 \quad (13)$$

Lebih lanjut, persamaan $VaR_p(X)$ untuk distribusi kontinu dapat dinyatakan sebagai nilai π_p yang memenuhi persamaan (14) berikut,

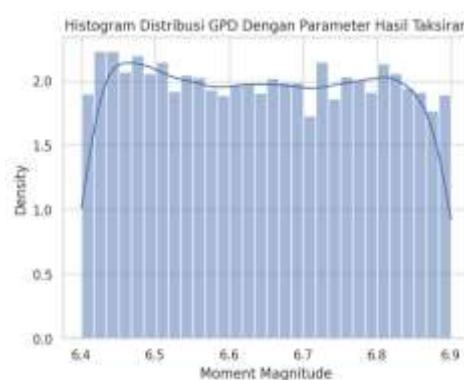
$$Pr(X > \pi_p) = 1 - p \quad (14)$$

dengan p adalah *quantile* yang digunakan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Earthquake Catastrophe Model terdiri dari empat modul, meliputi modul *hazard*, modul *inventory*, modul *vulnerability* dan modul *loss*. Pada tahap pertama dilakukan penyiapan data yang diperlukan untuk analisis lebih lanjut. Data historis gempa bumi yang diunduh dari situs USGS merupakan data gempa bumi yang terjadi di wilayah yang ditandai dengan *rectangle* secara manual sejak 1 Januari 1901 hingga 31 Oktober 2024.

Menggunakan *software* QGIS, dilakukan pembersihan (*cleaning*) data gempa bumi sehingga data gempa yang digunakan hanya mencakup kejadian di zona *megathrust* M7 saja. Hasil pembersihan menyisakan 747 gempa bumi di zona *megathrust* M7 sesuai tanggal yang dibatasi. Data gempa bumi di zona *megathrust* M7 tersebut memiliki satuan gempa bumi yang berbeda-beda sehingga dilakukan konversi satuan gempa bumi menjadi satuan yang sama yaitu M_w . Selain itu, data gempa bumi tersebut masih memuat data gempa bumi *foreshock*, *mainshock*, dan *aftershock*. Oleh karena itu, dilakukan pemisahan (*declustering*) data gempa bumi agar didapat data gempa bumi *mainshock* saja. Hasil pemisahan data gempa bumi *mainshock* menunjukkan bahwa terdapat 183 kejadian gempa bumi *mainshock* di wilayah M7 yang kemudian dinotasikan sebagai *Event ID* pertama sampai ke-183.



Gambar 3. Histogram GPD dengan Parameter Hasil Taksiran

Setelah data disiapkan, dilakukan pembangunan modul *hazard* dalam *Earthquake Catastrophe Model* dengan memodelkan 183 data gempa bumi *mainshock*. Data tersebut berdistribusi Generalized Pareto sesuai histogram pada

Gambar 3, dengan estimasi parameter *threshold* (u) bernilai 6.4, estimasi parameter *scale* (σ) bernilai 0.4865, serta estimasi parameter *shape* (ξ) bernilai -0.9719 . Dari uji kecocokan model dengan Uji Cramér-von Mises, diperoleh $P_{value} = 0.5788 > 0.05$ (H_0 diterima) yang menunjukkan bahwa data tersebut secara signifikan berdistribusi GPD. Model ini kemudian digunakan untuk membangkitkan 1,000 magnitudo momen dari gempa bumi *mainshock* berdistribusi GPD menggunakan simulasi Monte-Carlo sehingga diperoleh himpuan kejadian stokastik sejumlah 183,000 simulasi gempa bumi *mainshock* seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Himpunan Kejadian Stokastik 183,000 Gempa Bumi *Mainshock*

Event ID	Latitude	Longitude	Kedalaman	M_w	Tipe Gempa
1;1	-7.2822	104.7907	49	6.604301	<i>Interface</i>
1;2	-7.2822	104.7907	49	6.755483	<i>Interface</i>
:	:	:	:	:	:
183;999	-7.569	104.552	33	6.402207	<i>Interface</i>
183;1000	-7.569	104.552	33	6.464311	<i>Interface</i>

Selain modul *hazard*, dilakukan pula pembangunan modul *inventory*. Modul ini menyimpan karakteristik dari bangunan residensial di wilayah Kabupaten Sukabumi. Kabupaten Sukabumi dipilih sebagai wilayah *exposure* yang diamati karena berdasarkan tabel indeks risiko bencana kabupaten/kota Tahun 2023, Kabupaten Sukabumi berada di kelas risiko tinggi (Adi dkk., 2024). Selain itu, potensi bencana gempa bumi di Kabupaten Sukabumi juga termasuk pada kelas tinggi dengan potensi bahaya pada 245,992 ha wilayahnya (Kajian risiko bencana nasional Provinsi Jawa Barat 2022-2026, 2021). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa Kabupaten Sukabumi merupakan salah satu wilayah dengan risiko bencana khususnya gempa bumi yang tinggi. Sehingga menjadi penting untuk memprediksi dan memperhitungkan kerugian yang akan dialami jika terjadi gempa bumi *mainshock* di masa depan. Berdasarkan data residensial, diperoleh titik koordinat *latitude* dan *longitude* lokasi bangunan di Kabupaten Sukabumi yaitu (106.551; -6.98885). Titik tersebut berada di sekitar Kantor Bupati Kabupaten Sukabumi. Selain itu diperoleh nilai v_{s30} yaitu 353.9229 dan dihitung pula nilai *spectral acceleration* (SA) berdasarkan masing-masing taksonomi bangunan. Tabel 2 berikut menampilkan statistika deskriptif dari nilai SA yang diperoleh dengan fungsi atenuasi Zhao dkk. (2006).

Tabel 2. Statistika Deskriptif Nilai *Spectral Acceleration*

Statistika Deskriptif	Bangunan 1	Bangunan 2	...	Bangunan 27
Minimum	0.009121	0.006753	...	0.009121
Kuartil 1	0.027028	0.016585	...	0.027028
Median	0.049551	0.026774	...	0.049551
Kuartil 3	0.130979	0.059825	...	0.130979
Persentil 95	0.26034	0.115072	...	0.26034
Persentil 99	0.377892	0.178394	...	0.377892
Maksimum	0.575276	0.288864	...	0.575276
Rataan	0.088197	0.042541	...	0.088197
Standar Deviasi	0.085369	0.037232	...	0.085369
<i>Skewness</i>	1.698507	1.967625	...	1.698507
Kurtosis	3.243233	5.257712	...	3.243233

Tabel 3. Nilai *Spectral Acceleration*

Event ID	Bangunan 1	Bangunan 2	...	Bangunan 26	Bangunan 27
1;1	0.033676	0.019081	...	0.033676	0.033676
1;2	0.039749	0.022934	...	0.039749	0.039749
:	:	:	...	:	:
183;999	0.01605	0.010171	...	0.01605	0.01605
183;1000	0.017214	0.010998	...	0.017214	0.017214

Hasil pengolahan modul *hazard* dan modul *inventory* menjadi dasar pembangunan modul *vulnerability*. Berdasarkan kurva kerentanan oleh Martins & Silva (2021) nilai SA yang diperoleh dan ditunjukkan pada Tabel 3, digunakan untuk mengetahui *loss ratio*. Nilai *loss ratio* tersebut digunakan dalam perhitungan kerugian finansial. Tabel 4 berikut menampilkan statistika deskriptif dari realisasi total kerugian yang diperoleh.

Tabel 4. Statistika Deskriptif Realisasi Total Kerugian

Statistika Deskriptif	1	2	...	183
Minimum	Rp516,777,377.83	Rp1,313,107,462.51	...	Rp310,258,423.37
Kuartil 1	Rp593,487,461.95	Rp2,831,656,766.13	...	Rp350,933,382.83
Median	Rp682,720,470.17	Rp6,740,494,176.66	...	Rp407,509,895.69
Kuartil 3	Rp780,237,409.96	Rp14,116,842,373.33	...	Rp464,349,314.04
Persentil 95	Rp870,935,498.38	Rp23,886,325,254.77	...	Rp519,943,912.54
Persentil 99	Rp891,767,659.77	Rp26,367,618,813.44	...	Rp534,372,323.63
Maksimum	Rp896,321,702.07	Rp27,507,897,827.57	...	Rp537,340,312.60
Rataan	Rp688,922,118.96	Rp9,140,947,132.97	...	Rp411,139,568.76
Standar Deviasi	Rp108,889,366.20	Rp7,347,670,816.61	...	Rp65,196,190.21
<i>Skewness</i>	0.18	0.86	...	0.21
Kurtosis	-1.14	-0.49	...	-1.16

Pada modul *loss*, akan dilakukan konstruksi *Event Loss Table* (ELT). Realisasi total kerugian pada Tabel 4 menjadi dasar untuk menaksir fungsi kepadatan peluang dari variabel X_{ij} dengan pendekatan non-parametrik yaitu menggunakan Kernel Epanechnikov. Setelah melakukan *kernel fitting* untuk nilai

tidak nol pada kolom *Event ID*, dibangkitkan X_{ij} sebanyak N_i . N_i diasumsikan berdistribusi Poisson dengan parameter $\frac{1}{ARI}$ dengan nilai ARI ditetapkan sebesar 250 tahun. Hasil konstruksi ELT ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. *Event Loss Table*

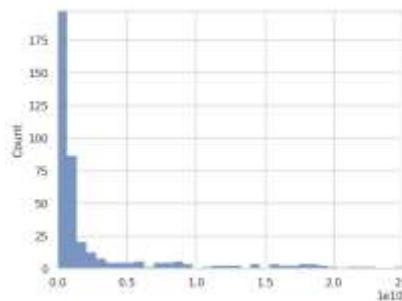
<i>Event ID</i>	N_i	S_i	$E[X_{ij}]$	$Std[X_{ij}]$	$E[N_i]$	$Var(N_i)$	$E[S_i]$	$Var(S_i)$
1	0	0	688,895,873.37	109,640,091.41	0.004	0.004	2,755,583.49	1,946,393,895,989,080
2	0	0	9,132,030,836.17	7,395,107,742.65	0.004	0.004	36,528,123.34	552,326,422,872,713,000
3	0	0	137,160,022,180.6	72,119,777,086.12	0.004	0.004	548,640,088.72	96,056,535,726,139,500,000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
36	1	583,631,054.75	594,125,681.99	96,717,773.62	0.004	0.004	2,376,502.73	1,449,358,614,954,690
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
183	0	0	411,102,881.83	65,634,880.75	0.004	0.004	1,644,411.53	693,254,068,082,968
Total			583,631,054.75					

ELT pada Tabel 5 kemudian disimulasikan menggunakan metode Monte-Carlo sebanyak 1,000 kali sehingga diperoleh 1,000 nilai *total aggregate loss* (S) seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. 1,000 Nilai *Total Aggregate Loss* (S)

j (Repetisi Simulasi)	S
1	0
2	0
⋮	⋮
544	Rp337,143,563.88
545	Rp822,703,329.77
⋮	⋮
999	0
1,000	0

Data S tersebut memuat banyak nilai 0, sedangkan nilai-nilai yang tidak 0 cenderung bernilai besar. Selain itu, dari histogram pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa S yang dihasilkan cenderung *skewed-to-the-right*. Oleh karena itu, S dimodelkan menggunakan *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model*.



Gambar 4. Histogram S Dengan 1,000 Kali Monte-Carlo

Estimasi parameter *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model* dari S antara lain parameter $\hat{\theta}$ bernilai 0.484, parameter *shape* ($\hat{\mu}$) bernilai 2.7919, serta parameter *scale* ($\hat{\sigma}^2$) bernilai 7920914125.635. Dari uji kecocokan model dengan Uji Cramér-

von Mises, diperoleh $P_{value} = 0.0816 > 0.05$ (H_0 diterima) yang menunjukkan bahwa data tersebut berdistribusi *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model*.

Setelah mengetahui bahwa *total aggregate loss S* berdistribusi *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model*, estimasi kerugian finansial dapat dilakukan dengan metode estimasi ukuran risiko. Menurut Otoritas Jasa Keuangan (2017) serta hasil penelitian dari Pratama (2022), disimpulkan bahwa perusahaan asuransi/reasuransi wajib menggunakan metode estimasi ukuran risiko terbaik dengan tingkat kepercayaan minimum 75% dalam mengestimasi kerugian finansial. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah ukuran risiko *Value-at-Risk* (VaR). Hasil estimasi kerugian finansial dengan metode VaR ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Estimasi Kerugian Finansial dengan Metode VaR

Percentil	\widehat{VaR}
10	0
20	0
30	0
40	0
50	Rp43,255,941.58
60	Rp959,530,646.3
70	Rp4,463,256,748.1
80	Rp17,581,162,485.21
90	Rp88,378,440,247.96
95	Rp298,066,571,091.71
99	Rp2,538,999,218,628.84

Dari Tabel 7, dapat dilihat bahwa nilai VaR 95% adalah sekitar 298 miliar rupiah. Artinya dengan tingkat kepercayaan 95%, dapat dipastikan bahwa kerugian finansial yang akan diperoleh jika terjadi gempa bumi *mainshock* berkekuatan lebih dari magnitudo 6.4 di zona *megathrust* M7 dengan ditetapkannya nilai ARI sebesar 250 tahun, tidak melebihi 298 miliar rupiah. Sedangkan 5% sisanya mengindikasikan kemungkinan kerugian finansial yang melebihi 298 miliar rupiah. Batasan kerugian maksimum ini dapat menjadi acuan bagi perusahaan asuransi dalam menentukan premi asuransi.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil memodelkan dan mengestimasi potensi kerugian finansial akibat gempa bumi di zona *megathrust* M7 Selat Sunda Banten, Indonesia, menggunakan *Earthquake Catastrophe Model*. Model ini dikembangkan melalui

serangkaian tahapan, termasuk pembangunan modul *hazard, inventory, dan vulnerability*, hingga konstruksi *Event Loss Table* (ELT) berbasis *collective risk model* yang melibatkan simulasi Monte-Carlo pada modul *loss*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *Bernoulli-Lognormal Two-Part Model* efektif dalam memodelkan distribusi *total aggregate loss* akibat gempa bumi. Berdasarkan analisis *Value-at-Risk* (VaR), diperoleh estimasi bahwa dengan tingkat kepercayaan 95%, potensi kerugian finansial akibat gempa bumi di zona *megathrust* M7 tidak melebihi Rp298 miliar. Angka ini mengimplikasikan bahwa perlu dipersiapkan setidaknya Rp298 miliar sebagai alokasi dana untuk menanggung potensi kerugian finansial akibat gempa dengan kriteria tertentu di zona *megathrust* M7 untuk nilai ARI 250 tahun. Hasil tersebut menunjukkan kontribusi penelitian ini dalam mengestimasi kerugian finansial yang dapat digunakan oleh pemerintah daerah atau perusahaan asuransi dalam merancang strategi mitigasi risiko dan menentukan skema pembiayaan bencana yang lebih akurat berbasis data historis di zona *megathrust* M7. Melalui penelitian ini, diharapkan pendekatan probabilistik dalam pemodelan risiko gempa bumi dapat semakin dikembangkan dan diterapkan dalam kebijakan mitigasi bencana di Indonesia, khususnya dalam meningkatkan ketahanan finansial terhadap potensi bencana gempa bumi di wilayah *megathrust* yang berisiko tinggi.

Hasil estimasi kerugian finansial pada penelitian ini sangat bergantung pada data dan asumsi yang digunakan dalam pemodelan. Salah satu batasan utama adalah penggunaan data gempa historis spesifik pada zona *megathrust* M7, sehingga temuan ini tidak dapat digeneralisasi langsung ke wilayah *megathrust* lainnya. Selain itu, data *exposure* yang digunakan terbatas pada bangunan residensial di Kabupaten Sukabumi dengan titik representasi di lokasi kantor Bupati. Penetapan nilai ARI sebesar 250 tahun serta penggunaan Kernel Epanechnikov juga menjadi batasan metodologis yang memengaruhi hasil penelitian. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengatasi batasan ini dengan memanfaatkan data *exposure* yang lebih detail per titik bangunan, menggunakan kombinasi nilai ARI dan fungsi kernel yang berbeda, serta memperluas cakupan wilayah penelitian untuk memberikan informasi yang lebih komprehensif bagi zona *megathrust* lainnya di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, A. W., Bagaskoro, Y., Putra, A. S., Jayanti, T., Shalih, O., Dewi, A. N., Karimah, R., Eveline, F., Ayu, H., Purnamaswi, D. I., Rizqi, A., Rahmawati, I., Shabrina, F., Alfian, A., Hafizh, A., Syauqi, Kurniawan, D., Septian, R. T., Seniarwan, ... Wibawanti, P. (2024). *Indeks Risiko Bencana Indonesia* (R. Yunus, Ed.; Vol. 2). Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Arham, A., & Firmansyah, A. (2019). Catastrophe bond sebagai instrumen pembiayaan pemerintah dalam penanggulangan bencana alam di indonesia. *Indonesian Treasury Review: Jurnal Perpendidaraan, Keuangan Negara dan Kebijakan Publik*, 4(4), 339–349. <https://doi.org/10.33105/itrev.v4i4.145>
- Badan Pusat Statistik Indonesia. (2024). *Statistik Indonesia 2024* (Vol. 52).
- Fadilah, A. (2024, November 11). *Tentang gempa di selat sunda dan mentawai-siberut yang “tinggal menunggu waktu.”* <https://www.bmkg.go.id/berita/utama/tentang-gempa-di-selat-sunda-dan-mentawai-siberut-yang-tinggal-menunggu-waktu>
- Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern california, with aftershocks removed, poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640051363>
- Grossi, P., & Kunreuther, H. (2005). *Catastrophe modeling: a new approach to managing risk.*
- Herawati, N., Nisa, K., & Setiawan, E. (2017). The optimal bandwidth for kernel density estimation of skewed distribution: a case study on survival time data of cancer patients. *Seminar Nasional Metode Kuantitatif*.
- Juellyan, Setiawan, B., Hasan, M., Yunita, H., Sungkar, M., & Saidi, T. (2023). Comparing gardner-knopoff, gruenthal, and uhrhammer earthquake declustering methods in Aceh, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1245(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1245/1/012010>
- Kajian risiko bencana nasional Provinsi Jawa Barat 2022-2026.* (2021).
- Klugman, S. A., Panjer, H. H., & Willmot, G. E. (2019). *Loss Models: From Data to Decisions* (5 ed.). Wiley. www.wiley.com
- Martins, L., & Silva, V. (2021). Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(15), 6719–6745. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>
- Otoritas Jasa Keuangan. (2017). *Lampiran surat edaran OJK nomor 27.*
- Pratama, R. (2022). *Pemodelan risiko kerugian finansial akibat gempa bumi tektonik: studi kasus pada kerusakan bangunan sekolah di Kota Padang.* Institut Teknologi Bandung.
- Pusat Kebijakan Regional dan Bilateral. (2019). *Strategi pembiayaan dan asuransi risiko bencana.* <https://fiskal.kemenkeu.go.id/kajian/2019/04/05/055846874640008-strategi-pembiayaan-dan-asuransi-risiko-bencana-parb>
- Tampubolon, D. R., Boro, Y. R. L., Pratama, R., Putra, I., Rahmady, M. F., & Christian, V. F. (2023). *Workshop on earthquake catastrophe risk modeling.*

- Tampubolon, D. R., & Raissa, R. (2020). The moment magnitude of an earthquake as a parametric trigger for a catastrophe bond: the megathrust mid 2 Sumatera, Indonesia, as a case study. *GRIR 2020 International Conference on “Risk Considerations and Insurance in Developing Countries.”*
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Tse, Y.-K. (2009). *Nonlife Actuarial Models Theory, Methods and Evaluation*. Cambridge University Press.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of Seismological Society of America*, 96(3), 898–913.