

ANALISIS RISIKO KERUGIAN BENCANA ALAM DI INDONESIA MENGGUNAKAN EXTREME VALUE THEORY-VALUE AT RISK DENGAN PENDEKATAN BAYESIAN MIXTURE MODEL

Latifah Sekar Hanin

Program Studi Statistika Bisnis, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, dan Indonesia
e-mail : 2043221083@student.its.ac.id*

Iis Dewi Ratih

Program Studi Statistika Bisnis, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, dan Indonesia
e-mail : iis.dewi@statistika.its.ac.id

Abstrak

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerentanan bencana alam tertinggi di dunia, sehingga berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan setiap tahun. Kondisi geologis dan geografis yang kompleks menyebabkan tingginya frekuensi bencana geofisika dan hidrologi, sehingga diperlukan analisis risiko yang mampu menggambarkan peluang terjadinya bencana sekaligus besarnya kerugian yang ditimbulkan. Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif melalui matriks risiko dengan dua komponen utama, yaitu frekuensi dan konsekuensi. Frekuensi kejadian bencana diestimasi menggunakan distribusi *Poisson*, yang sesuai untuk memodelkan kejadian yang bersifat jarang (*rare events*). Konsekuensi risiko diukur menggunakan VaR, yang merepresentasikan potensi kerugian pada tingkat kepercayaan tertentu. Karena data kerugian bencana bersifat ekstrem dan memiliki ekor distribusi yang berat (*heavy-tailed*), pemodelan VaR dilakukan menggunakan EVT dengan metode POT, di mana *central part* dimodelkan menggunakan distribusi Lognormal dan *tail part* menggunakan GPD. Estimasi parameter dilakukan dengan *Bayesian Mixture Model* melalui algoritma *Metropolis-Hastings* MCMC, dan parameter *posterior* digunakan dalam simulasi *Monte Carlo* untuk memperoleh estimasi EAL dan VaR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa banjir dan gempa bumi berada dalam kategori *High Risk*. Kerugian tahunan rata-rata (EAL) akibat banjir mencapai 331.773 ribu USD, sedangkan gempa bumi mencapai 888.907 ribu USD, menunjukkan bahwa gempa bumi menimbulkan kerugian rata-rata yang lebih besar. Risiko kerugian ekstrem juga lebih tinggi pada gempa bumi, dengan VaR 95% sebesar 1.282.478 ribu USD untuk banjir dan 3.064.858 ribu USD untuk gempa bumi. Temuan ini menegaskan perlunya strategi mitigasi yang berkelanjutan serta alokasi dana kontinjensi yang lebih optimal untuk mengurangi potensi kerugian finansial akibat bencana alam di Indonesia.

Kata Kunci: *Bayesian, Bencana Alam, Extreme Value Theory, Mixture Model, Value at Risk*

Abstract

Indonesia is one of the countries with the highest vulnerability to natural disasters, resulting in significant economic losses each year. Its complex geological and geographical conditions contribute to the high frequency of geophysical and hydrological disasters, making it essential to conduct risk analysis that captures both the likelihood of disaster occurrence and the magnitude of resulting losses. This study employs a quantitative approach using a risk matrix consisting of two main components: frequency and consequence. The frequency of disaster events is estimated using the *Poisson* distribution, which is suitable for modeling rare events. The consequence of risk is measured using VaR, which represents potential losses at a specified confidence level. Since disaster-related losses are extreme and heavy-tailed, VaR estimation is conducted using EVT with the POT method, where the central part of the data is modeled using the Lognormal distribution and the tail part using the GPD. Parameter estimation is performed through a *Bayesian Mixture Model* using the *Metropolis-Hastings* MCMC algorithm, and posterior parameters are utilized in *Monte Carlo* simulation to obtain estimates of EAL and VaR. The results indicate that floods and earthquakes fall into the *High-Risk* category. The average annual loss (EAL) from floods reaches 331.773 thousand USD, while earthquakes result in 888.907 thousand USD, indicating that earthquakes generate higher average losses. Extreme loss risk is also greater for earthquakes, with a 95% VaR of 1,282,478 thousand USD for floods and 3,064,858 thousand USD for earthquakes. These findings highlight the need for sustained disaster mitigation strategies and more effective allocation of contingency funds to reduce the financial impacts of natural disasters in Indonesia.

Keywords: *Bayesian, Natural Disasters, Extreme Value Theory, Mixture Model, Value at Risk*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerentanan bencana alam tertinggi di dunia. Secara geologis, Indonesia berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik, yang menyebabkan tingginya potensi bencana geofisika seperti gempa bumi, tsunami, dan erupsi gunung berapi. Di sisi lain, kondisi geografis Indonesia yang berada di daerah tropis dengan curah hujan tinggi turut meningkatkan risiko bencana hidrologi, seperti banjir, tanah longsor, cuaca ekstrem, dan kekeringan yang memicu kebakaran hutan dan lahan (BNPB, 2025).

Data *The International Disaster Database Centre for Research on the Epidemiology of Disaster* menunjukkan bahwa sepanjang tahun 1966-2024 telah terjadi 539 kejadian bencana yang meliputi bencana geofisika dan hidrologi di Indonesia, dengan sebesar 36% merupakan bencana geofisika dan 64% merupakan bencana hidrologi (EM-DAT, 2024). Tingginya frekuensi tersebut berdampak signifikan terhadap kondisi sosial ekonomi masyarakat dan menimbulkan beban finansial bagi pemerintah yang sebagian besar ditanggung melalui Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN) (Kemenkeu, 2025). Selama 15 tahun terakhir, kerugian tahunan akibat bencana alam di Indonesia mencapai Rp 22,85 miliar, dan salah satu kejadian terbesar adalah gempa dan tsunami Aceh pada tahun 2004 yang menimbulkan kerugian mencapai Rp 51,4 miliar (Dwi, 2024). Intensitas bencana alam yang semakin tinggi membuat pemerintah menyediakan dana kontinjensi yang memadai untuk mendukung upaya penanggulangan bencana alam. Oleh karena itu perlu dilakukan upaya-upaya untuk pengelolaan risiko bencana untuk mengurangi kerugian akibat bencana alam seminimal mungkin (BNPB, 2025).

Pemerintah memiliki tanggung jawab konstitusional untuk melindungi masyarakat dari dampak bencana, termasuk dalam hal pemulihan wilayah terdampak secara menyeluruh. Hal ini sesuai dengan peraturan Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana yang menegaskan bahwa penyelenggaraan penanggulangan bencana merupakan tanggung jawab dan wewenang pemerintah dan pemerintah

daerah yang dilaksanakan secara terencana, terpadu, terkoordinasi, dan menyeluruh. Untuk mendukung upaya tersebut, dibutuhkan metode kuantitatif yang mampu menganalisis tingkat risiko dengan mengestimasi frekuensi terjadinya bencana alam dan besar kerugian akibat bencana alam di Indonesia agar dapat menjadi dasar perencanaan asuransi, mitigasi bencana, dan kebijakan manajemen risiko nasional (Nugroho, 2021).

Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui frekuensi kejadian bencana banjir dan gempa bumi di Indonesia dapat dianalisis menggunakan pendekatan kesesuaian distribusi *Poisson* dalam memodelkan pola kejadiannya. Selanjutnya, mengetahui analisis konsekuensi kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi yang dianalisis menggunakan metode EVT dengan pendekatan *Bayesian Mixture Model* untuk mengestimasi parameter risiko, serta mengetahui nilai EAL dan VaR yang dihasilkan. Selain itu, permasalahan lain yaitu mengetahui tingkat risiko bencana banjir dan gempa bumi dapat ditentukan melalui matriks risiko yang mengintegrasikan analisis frekuensi dan konsekuensi, serta bagaimana rekomendasi mitigasi dapat dirumuskan berdasarkan hasil pemetaan risiko tersebut.

Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan Pemerintah dalam mengestimasi kerugian maksimum akibat bencana alam dengan tingkat keyakinan tertentu, sehingga dapat digunakan untuk menyusun strategi mitigasi dan alokasi dana kontinjensi yang lebih tepat sasaran. Selain itu, matriks risiko memungkinkan identifikasi tingkat risiko tinggi berdasarkan frekuensi dan konsekuensi yang terjadi, sehingga dapat berguna dalam menentukan prioritas penanganan, perencanaan kebijakan, serta pengalokasian anggaran secara efisien.

Data yang digunakan merupakan data dari EM-DAT *The International Disaster Database* dimana terdapat 8 jenis bencana alam yang terjadi di Indonesia yaitu banjir, gempa bumi, tanah longsor, cuaca ekstrem, tsunami, kebakaran, badai, dan kekeringan. Namun, pada penelitian ini hanya akan digunakan jenis bencana alam yaitu banjir dan gempa bumi berdasarkan banyaknya bencana alam yang sering terjadi di Indonesia.

KAJIAN TEORI

Matriks risiko merupakan salah satu alat yang digunakan untuk menilai tingkat risiko dengan mempertimbangkan kriteria kemungkinan terjadinya suatu risiko dengan besarnya dampak risiko yang ditimbulkan (BSN, 2018). Frekuensi atau kemungkinan terjadinya risiko dapat diestimasi menggunakan distribusi *Poisson*, sedangkan dampak atau konsekuensi risiko dapat diestimasi menggunakan *Expected Annual Loss* (EAL) dan *Value at Risk* (VaR). EAL menggambarkan *average yearly risk* dari suatu bencana, sehingga menjadi indikator kunci dalam penilaian risiko dan perencanaan mitigasi (McNeil, 2015). Sedangkan VaR merupakan salah satu metode untuk menghitung risiko kerugian yang mungkin terjadi pada tingkat kepercayaan tertentu (Wildani, 2021). Kerugian akibat bencana alam umumnya termasuk kejadian ekstrem yang tidak dapat dimodelkan dengan distribusi normal, sehingga perhitungan akan dilakukan dengan menggunakan *Extreme Value Theory* (EVT) melalui metode *Peaks Over Threshold* (POT), dengan Lognormal untuk *central part* dan *Generalized Pareto Distribution* (GPD) untuk *tail part*. Untuk meningkatkan stabilitas estimasi, digunakan *Bayesian Mixture Model* dengan estimasi parameter melalui algoritma *Metropolis-Hastings* MCMC (Adistiya, 2024). Parameter *posterior* kemudian digunakan dalam simulasi *Monte Carlo* untuk mensimulasikan *annual loss*, menghasilkan ukuran risiko seperti EAL dan VaR. Hasil analisis frekuensi dan konsekuensi tersebut diintegrasikan dalam penyusunan matriks risiko bencana alam di Indonesia.

METODE

Metode analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan dua pendekatan utama yaitu analisis frekuensi dan analisis konsekuensi. Analisis frekuensi digunakan untuk mengukur peluang atau intensitas terjadinya bencana banjir dan gempa bumi setiap tahun di Indonesia. Data yang dianalisis berupa jumlah kejadian bencana per tahun pada bencana banjir dan gempa bumi. Visualisasi dengan *time series plot* digunakan untuk melihat pola kecenderungan, fluktuasi, dan potensi tren kejadian bencana dari waktu ke waktu. Selanjutnya dilakukan uji kesesuaian terhadap distribusi *Poisson*, yang secara teoritis sesuai untuk memodelkan jumlah

kejadian yang bersifat jarang, independen, dan terjadi dalam periode waktu tertentu. Distribusi *Poisson* memungkinkan estimasi parameter λ , yaitu rata-rata jumlah kejadian bencana per tahun. Hasil analisis frekuensi berupa nilai estimasi λ kemudian digunakan dalam simulasi *Monte Carlo* pada tahap analisis konsekuensi, khususnya dalam pemodelan EAL, sehingga memberikan pengukuran risiko yang lebih komprehensif berdasarkan gabungan nilai frekuensi dan besarnya kerugian.

Pada analisis konsekuensi, penelitian ini bertujuan untuk mengukur besarnya dampak finansial yang ditimbulkan oleh kejadian bencana banjir dan gempa bumi di Indonesia. Data yang digunakan merupakan data kerugian finansial tahunan masing-masing akibat bencana banjir dan gempa bumi. Pemodelan kerugian dilakukan menggunakan pendekatan EVT dengan metode POT untuk menangkap perilaku ekor distribusi yang bersifat ekstrem. Sesuai dengan karakteristik data kerugian yang sangat *right-skewed* dan *heavy-tailed*, pemodelan dilakukan dengan *Bayesian Mixture Model*, yaitu menggabungkan distribusi Lognormal untuk memodelkan nilai kerugian non-ekstrem dan GPD untuk memodelkan kerugian ekstrem. Nilai *threshold* u ditentukan berdasarkan analisis distribusi dan digunakan secara konsisten pada proses estimasi. Estimasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan *Metropolis-Hastings* (MCMC). Pada proses ini, *posterior* parameter dihitung sebagai gabungan antara *log-likelihood* campuran Lognormal-GPD dan *prior* Bayesian yang digunakan pada masing-masing parameter, yaitu *prior* Normal untuk μ , *Jeffreys prior* untuk parameter skala σ dan β , serta *prior Uniform* untuk parameter bentuk ξ . Proposal parameter dihasilkan secara acak pada setiap iterasi MCMC, dan diterima atau ditolak berdasarkan probabilitas penerimaan *Metropolis Hastings* hingga diperoleh rantai sampel *posterior* yang stabil dan konvergen. Parameter *posterior* hasil MCMC kemudian digunakan untuk melakukan *Monte Carlo Simulation* dalam memodelkan kerugian tahunan. Proses ini dilakukan dengan mensimulasikan frekuensi kejadian menggunakan distribusi *Poisson* dan mensimulasikan besarnya kerugian menggunakan model campuran Lognormal-GPD. Simulasi dijalankan sebanyak ribuan iterasi untuk menghasilkan distribusi empiris kerugian tahunan. Hasil distribusi ini dihitung

ukuran risiko utama, yaitu EAL sebagai estimasi rata-rata kerugian tahunan, serta VaR 95% sebagai ukuran *tail-risk* atau kerugian ekstrem yang mungkin terjadi dengan probabilitas tertentu. Hasil analisis konsekuensi tersebut kemudian digabungkan dengan analisis frekuensi untuk menentukan tingkat risiko bencana pada matriks risiko, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang probabilitas dan dampak bencana banjir dan gempa bumi di Indonesia.

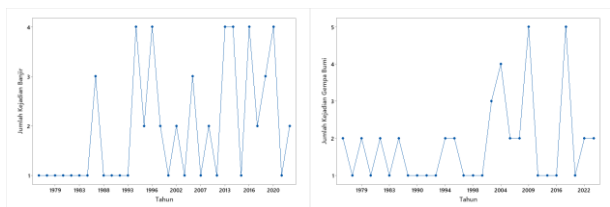
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Frekuensi Terjadinya Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Analisis frekuensi digunakan untuk menentukan frekuensi atau kemungkinan bencana banjir dan gempa bumi yang terjadi di Indonesia.

A. Karakteristik Kejadian Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Indonesia dikenal sebagai negara yang rentan terhadap bencana banjir dan gempa bumi. Untuk mengetahui karakteristik bencana banjir dan gempa bumi yang terjadi di Indonesia, maka dapat digunakan *time series plot* yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Time Series Plot* Jumlah Kejadian Banjir (Kiri) dan Gempa Bumi (Kanan)

Gambar 1 menunjukkan bahwa jumlah kejadian bencana banjir dan gempa bumi di Indonesia selama periode pengamatan bersifat fluktuatif dari tahun ke tahun. Puncak kejadian bencana banjir pada tahun 1994, 1996, 2013, 2014, 2016, dan 2020, yang masing-masing mencapai hingga empat kejadian dalam satu tahun. Kejadian bencana banjir cenderung lebih sering terjadi dengan variasi yang cukup tinggi, mencerminkan pengaruh faktor iklim, curah hujan, dan perubahan lingkungan yang dinamis. Sementara itu, kejadian bencana gempa bumi relatif lebih jarang, namun pada beberapa tahun tertentu terlihat lonjakan jumlah kejadian yang 16 cukup signifikan. Peningkatan signifikan terlihat pada tahun 2009 dan 2018, ketika terjadi lonjakan aktivitas seismik dengan jumlah kejadian mencapai lima kali dalam setahun. Pola ini menunjukkan bahwa kedua jenis bencana

memiliki karakteristik yang berbeda. Bencana banjir lebih dipengaruhi oleh faktor hidrometeorologis yang berulang setiap tahun, sedangkan bencana gempa bumi dipengaruhi oleh aktivitas tektonik yang bersifat acak dan sulit diprediksi. Secara keseluruhan, fluktuasi kejadian bencana banjir dan gempa bumi menunjukkan bahwa dalam satu tahun Indonesia dapat mengalami lebih dari satu jenis bencana dengan frekuensi yang bervariasi, sehingga menunjukkan tingginya tingkat kerentanan Indonesia terhadap berbagai bencana alam.

B. Uji Kesesuaian Distribusi *Poisson*

Jumlah kejadian bencana banjir dan gempa bumi merupakan data diskrit yang secara teoritis dimodelkan dengan distribusi *Poisson*. Dilakukan uji kesesuaian distribusi *Poisson* menggunakan uji Chi-Square dengan hipotesis berikut:

$H_0: F(x) = F_0(x)$ (Data jumlah kejadian bencana banjir dan gempa bumi mengikuti distribusi *Poisson*)
 $H_1: F(x) \neq F_0(x)$ (Data jumlah kejadian bencana banjir dan gempa bumi tidak mengikuti distribusi *Poisson*)

Tabel 1. Uji Kesesuaian Distribusi *Poisson* Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	χ^2	$\chi^2_{(0,05;2)}$	P-value
Banjir	3,649	5,991	0,161
Gempa Bumi	3,726		0,155

Tabel 1 menunjukkan nilai χ^2 pada masing-masing bencana banjir dan gempa bumi lebih kecil daripada $\chi^2_{(0,05;2)}$, serta diperkuat $P\text{-value} > 0,05$. Dengan demikian, diperoleh keputusan gagal tolak H_0 yang artinya data jumlah kejadian bencana banjir dan gempa bumi masing-masing mengikuti distribusi *Poisson*.

C. Estimasi Parameter Distribusi *Poisson* Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Hasil estimasi parameter distribusi *Poisson* menunjukkan nilai λ sebesar 1,938 untuk banjir dan 1,821 untuk gempa bumi. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa rata-rata kejadian banjir dan gempa bumi di Indonesia mencapai sekitar dua kali per tahun, yang mencerminkan tingginya risiko kedua jenis bencana tersebut.

2. Analisis Konsekuensi Akibat Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Analisis konsekuensi digunakan untuk menentukan besarnya dampak atau konsekuensi

terjadinya bencana banjir dan gempa bumi di Indonesia.

A. Karakteristik Kerugian Akibat Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Sebagai negara dengan tingkat kerentanan yang tinggi terhadap bencana alam, peristiwa bencana banjir dan gempa bumi yang terjadi umumnya menimbulkan kerugian finansial yang cukup besar. Karakteristik kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi di Indonesia ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Statistika Deskriptif Kerugian Akibat Banjir dan Gempa Bumi

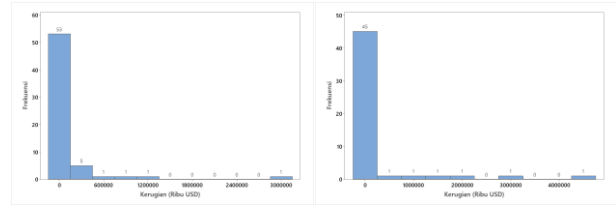
Keterangan	Nilai (Ribu USD)	
	Banjir	Gempa Bumi
Minimum	300	500
Maksimum	3.000.000	4.451.600
Skewness	5,52	3,92
Kurtosis	34,54	16,04

Tabel 2 menunjukkan bahwa kerugian akibat bencana banjir memberikan dampak kerugian yang sangat besar. Kerugian bencana banjir tertinggi sepanjang tahun 1966 hingga 2022 yaitu sebesar 3.000.000 ribu USD yang terjadi pada tahun 2013 di DKI Jakarta. Sedangkan kerugian banjir terendah sebesar 300 ribu USD yang terjadi pada tahun 1996 di Jawa Tengah. Berdasarkan kerugian akibat bencana gempa bumi juga memberikan dampak kerugian yang sangat besar. Kerugian bencana gempa bumi tertinggi sepanjang tahun 1976 hingga 2024 yaitu sebesar 4.451.600 ribu USD yang terjadi pada tahun 2004 di Aceh. Sedangkan kerugian gempa bumi terendah sebesar 500 ribu USD yang terjadi pada tahun 1984 di Sulawesi Tengah.

Data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi memiliki *skewness* masing-masing sebesar 5,52 dan 3,92 yang lebih besar dari 0 yang mengindikasikan bahwa data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi tidak simetris. Data yang memiliki ekor distribusi lebih panjang di sebelah kanan dengan nilai terbanyak menunjukkan bahwa data memiliki kemiringan positif.

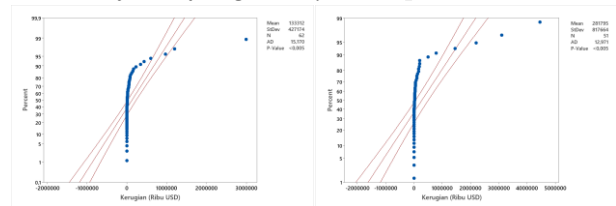
Data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi memiliki *kurtosis* masing-masing sebesar 34,54 dan 16,04 yang lebih besar dari 3 sehingga disebut *leptokurtic* yang artinya kurva distribusi data semakin runcing sehingga nilai data terpusat di sekitar rata-rata. Hal tersebut

mengindikasikan adanya pola distribusi *heavy-tailed* yaitu ekor distribusi yang turun secara lambat dan adanya nilai ekstrem pada data.



Gambar 2. Histogram Kerugian Akibat Banjir (Kiri) dan Gempa Bumi (Kanan)

Distribusi data ditunjukkan secara visual menggunakan histogram pada Gambar 2, di mana mayoritas bencana banjir (kiri) mengakibatkan kerugian pada *range* interval 0 sampai 150.000 ribu USD. Sedangkan pada bencana gempa bumi (kanan) mengakibatkan kerugian pada *range* interval 0 sampai 250.000 ribu USD. Namun masih terdapat beberapa bencana banjir maupun gempa bumi yang mengakibatkan kerugian yang sangat besar dengan frekuensi yang jauh lebih kecil. Adanya indikasi pola distribusi *heavy-tailed* menunjukkan bahwa data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi tidak berdistribusi normal. Indikasi data tidak berdistribusi normal juga dapat dilihat pada *Probability Plot* yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Probability Plot Kerugian Akibat Banjir (Kiri) dan Gempa Bumi (Kanan)

Gambar 3 menunjukkan bahwa sebaran data kerugian akibat bencana banjir (kiri) dan gempa bumi (kanan) tidak mengikuti garis linear, sehingga secara visual data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi tidak mengikuti distribusi normal dan terdapat nilai ekstrem.

B. Uji Kesesuaian Distribusi Normal

Selain secara visual, untuk mengetahui apakah data berdistribusi Normal atau tidak, dapat dilakukan uji kesesuaian distribusi Normal menggunakan uji *Anderson Darling* dengan hipotesis sebagai berikut.

$H_0: F(y) = F_0(y)$ (Data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi mengikuti distribusi Normal)

$H_1: F(y) \neq F_0(y)$ (Data kerugian akibat bencana

banjir dan gempa bumi tidak mengikuti distribusi Normal)

Tabel 3. Uji Distribusi Normal Kerugian Akibat Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	AD	AD _{0,05}	P-value
Banjir	15,170	2,502	0,005
Gempa Bumi	12,971		0,005

Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai AD pada masing-masing bencana banjir dan gempa bumi lebih besar daripada AD_{0,05}, serta diperkuat *P-value* < 0,05. Dengan demikian, diperoleh keputusan tolak H₀ yang artinya data kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi masing-masing tidak mengikuti distribusi Normal.

C. Pemodelan EVT Kerugian Akibat Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Berdasarkan hasil identifikasi karakteristik kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi, diketahui bahwa data memiliki ekor distribusi yang panjang (*heavy-tailed*), sehingga peluang munculnya nilai kerugian yang sangat besar relatif tinggi. Kondisi ini menyebabkan distribusi klasik seperti distribusi Normal tidak dapat digunakan untuk memodelkan data secara akurat. Oleh karena itu, data kerugian dianalisis menggunakan pendekatan EVT, yang berfokus pada perilaku ekstrem atau ekor (*tail*) distribusi untuk memahami probabilitas munculnya nilai kerugian yang sangat tinggi.

D. Penentuan Nilai Ekstrem Menggunakan POT

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Peak Over Threshold* (POT) untuk mengidentifikasi nilai-nilai ekstrem. Metode POT ini dipilih karena mampu memanfaatkan seluruh data yang melebihi ambang batas (*threshold*) tanpa membaginya ke dalam blok waktu tertentu, sehingga informasi mengenai kejadian ekstrem dapat diperoleh lebih efisien dibandingkan pendekatan blok maksimum. Penetapan ambang batas dilakukan untuk mengidentifikasi nilai kerugian ekstrem akibat bencana banjir dan gempa bumi secara keseluruhan. Nilai *threshold* digunakan sebagai dasar dalam pemodelan *tail* dan sebagai parameter yang membedakan data bagian tengah (*central part*) dan bagian ekor (*tail part*) menangkap kerugian ekstrem akibat bencana banjir dan gempa bumi secara keseluruhan. *Threshold* bencana banjir dan gempa bumi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. *Threshold* Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	<i>Threshold</i>
Banjir	6
Gempa Bumi	5

Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai *threshold* untuk bencana banjir berada pada data ke-7, yaitu sebesar $u = 235.000$ ribu USD, dan *threshold* untuk bencana gempa bumi berada pada data ke-6, yaitu sebesar $u = 500.000$ ribu USD. Seluruh data kerugian yang melebihi nilai *threshold* ini dikategorikan sebagai nilai ekstrem dan digunakan dalam pemodelan GPD.

E. Uji Kesesuaian Distribusi GPD dan Lognormal

Uji kesesuaian distribusi dilakukan untuk memastikan bahwa model distribusi yang digunakan sesuai dengan karakteristik data kerugian pada bagian *tail part* ($x \geq u$) maupun *central part* ($x < u$). Pada penelitian ini, bagian *tail part* diasumsikan berdistribusi GPD, sedangkan bagian *central part* diasumsikan berdistribusi Lognormal. Pengujian distribusi dilakukan menggunakan uji *Anderson Darling* dengan bantuan *software* Easyfit. Hipotesis diterima jika hasil uji *Anderson Darling* dari *software* Easyfit tidak diterima.

Hipotesis untuk data yang berada pada *tail part*, $x \geq u$:

H₀: Data kerugian ekstrem berdistribusi GPD

H₁: Data kerugian ekstrem tidak berdistribusi GPD

Tabel 5. Uji GPD Kerugian Akibat Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	AD	AD _{0,05}
Banjir	0,215	2,502
Gempa Bumi	0,196	

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai AD pada masing-masing bencana banjir dan gempa bumi lebih kecil dari nilai kritis AD_{0,05}. Dengan demikian, diperoleh keputusan gagal tolak H₀ yang artinya data kerugian ekstrem pada bencana banjir dan gempa bumi masing-masing berdistribusi GPD.

Hipotesis untuk data yang berada pada *central part*, $x < u$:

H₀: Data kerugian non-ekstrem berdistribusi Lognormal

H₁: Data kerugian non-ekstrem tidak berdistribusi Lognormal

Tabel 6. Uji Distribusi Lognormal Kerugian Akibat Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	AD	AD _{0,05}
Banjir	0,788	

Gempa Bumi	0,756	2,502
------------	-------	-------

Tabel 6 menunjukkan bahwa nilai AD pada masing-masing bencana banjir dan gempa bumi lebih kecil dari nilai kritis $AD_{0,05}$. Dengan demikian, diperoleh keputusan gagal tolak H_0 yang artinya data kerugian non-ekstrem bencana banjir dan gempa bumi masing-masing berdistribusi Lognormal.

F. Estimasi Parameter Menggunakan Bayesian

Parameter besarnya kerugian pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu *central part* untuk nilai kerugian yang berada di bawah *threshold* u , dan *tail part* untuk nilai kerugian yang berada di atas atau sama dengan *threshold*. Pada *central part* ($x < u$), data kerugian dimodelkan menggunakan distribusi Lognormal yang memiliki dua parameter, yaitu parameter lokasi (μ) dan parameter skala (σ). Kedua parameter tersebut belum diketahui sehingga perlu diestimasi. Pada *tail part* ($x \geq u$), data kerugian ekstrem dimodelkan dengan distribusi GPD yang memiliki parameter bentuk (ξ), parameter skala (β), dan *threshold* (u). Karena ξ dan β belum diketahui, diperlukan proses estimasi parameter menggunakan pendekatan Bayesian. Hasil estimasi parameter pada masing-masing bencana banjir dan gempa bumi ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Estimasi Parameter Kerugian Akibat Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	Tail Part			Central Part	
	ξ	β	u	μ	σ
Banjir	0,747	394.074	235.000	8,984	1,733
Gempa Bumi	0,711	1.120.953	500.000	9,306	1,843

Tabel 7 menunjukkan nilai parameter yang diperoleh dari estimasi *Bayesian Mixture Model*. Parameter μ dan σ menggambarkan karakteristik kerugian pada *central part* yang mengikuti distribusi Lognormal, sedangkan parameter ξ dan β menggambarkan perilaku ekor distribusi pada *tail part* yang mengikuti distribusi GPD. Nilai ξ pada kedua jenis bencana lebih besar dari 0, yang menunjukkan bahwa distribusi kerugian bersifat *heavy-tailed*, artinya kejadian ekstrem memiliki probabilitas yang relatif tinggi. Nilai μ dan σ pada *central part* menunjukkan bahwa kerugian yang lebih kecil hingga menengah memiliki sebaran yang Lognormal dan cenderung *skewed* ke kanan. Hasil

estimasi parameter selanjutnya digunakan dalam proses simulasi *Monte Carlo* untuk menghitung EAL dan VaR.

G. Estimasi Risiko Kerugian Menggunakan EAL dan VaR

Hasil estimasi parameter dari *Bayesian Mixture Model* selanjutnya digunakan untuk menghitung risiko kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi melalui pendekatan *Compound Poisson Process*. Pada pendekatan ini, risiko kerugian tahunan diperoleh dari dua komponen utama, yaitu frekuensi kejadian yang dimodelkan menggunakan distribusi *Poisson* dan besarnya kerugian per kejadian yang dimodelkan dengan gabungan distribusi Lognormal (*central part*) dan GPD (*tail part*). Simulasi *Monte Carlo* dilakukan sebanyak 20.000 iterasi untuk menghasilkan EAL. Dari distribusi tersebut kemudian dihitung dua ukuran risiko utama, yaitu EAL sebagai estimasi kerugian rata-rata per tahun dan VaR sebagai kerugian tahunan pada tingkat kepercayaan 95%. Hasil estimasi kerugian ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. EAL dan VaR Kerugian Akibat Banjir dan Gempa Bumi

Jenis Bencana	EAL (ribu USD)	VaR (ribu USD)
Banjir	331.773	1.282.478
Gempa Bumi	888.907	3.064.858

Tabel 8 menunjukkan bahwa kerugian tahunan rata-rata (EAL) akibat banjir mencapai 331.773 ribu USD, lebih rendah dibandingkan gempa bumi dengan EAL sebesar 888.907 ribu USD. Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun banjir lebih sering terjadi, gempa bumi cenderung menimbulkan kerugian yang lebih besar ketika terjadi. Pada estimasi risiko ekstrem dengan VaR 95% pada bencana banjir sebesar 1.282.478 ribu USD dan bencana gempa bumi sebesar 3.064.858 ribu USD. Hasil menunjukkan bahwa bencana banjir memberikan kerugian lebih sering dan stabil, namun nilai ekstremnya tidak sebesar gempa bumi. Sedangkan pada bencana gempa bumi, meskipun jarang terjadi memiliki potensi kerugian ekstrem yang jauh lebih besar, sesuai dengan sifat *tail* yang lebih berat pada distribusi GPD.

3. Analisis Risiko Bencana Banjir dan Gempa Bumi

Matriks risiko digunakan untuk menggabungkan dua komponen utama, yaitu frekuensi kejadian per

tahun dan konsekuensi atau dampak kerugian, yang dalam penelitian ini direpresentasikan oleh EAL.

		Konsekuensi				
		>10 juta USD	1-10 juta USD	50 ribu-1 juta USD	10-50 ribu USD	<10 ribu USD
Frekuensi	>1/tahun			Gempa Bumi dan Banjir		
	<10 ⁻¹ /tahun					
	<10 ⁻² /tahun					
	<10 ⁻³ /tahun					
	<10 ⁻⁴ /tahun					

Gambar 4. Matriks Risiko Banjir dan Gempa Bumi

Tabel 4 menunjukkan hasil pemetaan risiko melalui matriks risiko yang menggabungkan frekuensi kejadian bencana per tahun dan besarnya kerugian finansial akibat bencana banjir dan gempa bumi. Pada bencana banjir dan gempa bumi berada pada kategori *High Risk* yang umumnya tidak dapat diterima (*typically unacceptable*) karena frekuensi kejadiannya tinggi dan dampak ekonominya signifikan. Oleh karena itu, kedua bencana memerlukan upaya mitigasi yang berkelanjutan dengan prioritas lebih tinggi pada peningkatan kapasitas ketahanan terhadap bencana banjir dan gempa bumi.

Strategi penurunan risiko bencana dilakukan melalui tiga pendekatan utama. Pertama, pengurangan frekuensi kejadian, yang terutama relevan untuk banjir melalui penataan tata ruang wilayah, rehabilitasi DAS, optimalisasi sistem drainase, reforestasi, dan pengendalian kerusakan lingkungan. Temuan ini sejalan dengan laporan BNPB (2022) yang mencatat bahwa sekitar 98% bencana di Indonesia merupakan bencana hidrometeorologi yang dipicu oleh degradasi lingkungan. Kedua, pengurangan tingkat konsekuensi, yaitu melalui pembangunan infrastruktur tahan bencana, penerapan standar konstruksi, penguatan sistem peringatan dini, serta edukasi kesiapsiagaan masyarakat. Ketiga, pengelolaan pembiayaan risiko, sesuai dengan Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007, melalui penyediaan dana cadangan, asuransi bencana, dan instrumen transfer risiko lainnya.

Dengan demikian, hasil analisis risiko ini dapat menjadi dasar penting dalam penentuan prioritas mitigasi, perencanaan anggaran, serta pengambilan kebijakan pengelolaan risiko bencana yang lebih efektif dan berbasis data. EAL memberikan gambaran kerugian tahunan rata-rata yang dapat

digunakan untuk alokasi dana kontinjensi, sedangkan VaR memberikan informasi mengenai potensi kerugian ekstrem yang perlu diantisipasi melalui strategi ketahanan jangka panjang.

PENUTUP

SIMPULAN

Kesimpulan yang didapat berdasarkan hasil analisis risiko kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi adalah sebagai berikut.

1. Hasil estimasi distribusi *Poisson* menunjukkan bahwa rata-rata kejadian bencana banjir sebesar 1,938 kali per tahun dan bencana gempa bumi sebesar 1,821 kali per tahun, yang mengindikasikan bahwa kedua bencana tersebut terjadi sekitar dua kali setiap tahun di Indonesia.
2. Estimasi kerugian menunjukkan bahwa EAL banjir sebesar 331.773 ribu USD, lebih rendah dibandingkan EAL gempa bumi sebesar 888.907 ribu USD. Pada tingkat risiko ekstrem, nilai VaR 95% banjir sebesar 1.282.478 ribu USD dan VaR 95% gempa bumi sebesar 3.064.858 ribu USD, yang menunjukkan bahwa gempa bumi memiliki potensi kerugian ekstrem yang jauh lebih besar meskipun frekuensinya lebih rendah.
3. Hasil pemetaan matriks risiko menunjukkan bahwa bencana banjir dan gempa bumi berada pada kategori *High Risk* (*typically unacceptable*), sehingga diperlukan strategi mitigasi prioritas yang mencakup pengurangan frekuensi kejadian, pengurangan dampak kerugian, serta pengelolaan pembiayaan risiko berbasis nilai EAL dan VaR.

SARAN

Saran yang dapat diberikan berdasarkan analisis risiko kerugian akibat bencana banjir dan gempa bumi adalah sebagai berikut.

1. Hasil bahwa rata-rata kejadian bencana banjir dan gempa bumi mencapai sekitar dua kali per tahun, sehingga hasil analisis frekuensi ini perlu dimanfaatkan sebagai dasar dalam perencanaan kebijakan pengurangan risiko, khususnya untuk menekan frekuensi kejadian banjir melalui penataan ruang berbasis risiko, pengelolaan DAS, dan perbaikan sistem drainase.
2. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gempa bumi memiliki nilai EAL dan VaR yang lebih tinggi dibandingkan banjir, upaya mitigasi perlu

difokuskan pada pengurangan dampak dan potensi kerugian ekstrem gempa bumi, antara lain melalui penguatan infrastruktur tahan gempa, penerapan standar konstruksi yang ketat, serta peningkatan kesiapsiagaan dan sistem peringatan dini.

3. Hasil matriks risiko yang memetakan bencana banjir dan gempa bumi pada kategori *High Risk*, hasil pemetaan risiko ini perlu dijadikan acuan utama dalam penentuan prioritas mitigasi dan alokasi pembiayaan risiko, termasuk penyediaan dana cadangan berbasis nilai EAL dan penerapan skema transfer risiko untuk mengantisipasi kerugian ekstrem yang tercermin dari nilai VaR.

DAFTAR PUSTAKA

- Adistiya, N. (2024). Perhitungan Value at Risk Kerugian Banjir di Indonesia Menggunakan Simulasi Monte Carlo dengan Parameter Hasil Pendekatan Bayesian Mixture Model. *Repository Universitas Brawijaya*.
- BNPB. (2025). *Indeks Risiko Bencana Indonesia Tahun 2024*. Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- BSN. (2018). *Grand Desain Penerapan Manajemen Risiko*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Dwi, C. (2024, Agustus 19). *Megathrust Mengancam: Ini 8 Bencana dengan Kerugian Terbesar di RI*. Retrieved from CNBC Indonesia: <https://www.cnbcindonesia.com/research/20240818222910-128-564222/megathrust-mengancam-ini-8-bencana-dengan-kerugian-terbesar-di-ri>
- EM-DAT. (2024). *Public EM-DAT : Indonesia*. Retrieved from The International Disaster Database Centre for Research on the Epidemiology of Disaster: <https://public.emdat.be/data>
- Kemenkeu. (2025). *Buku II Nota Keuangan Beserta Rancangan Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara Tahun Anggaran 2025*. Jakarta Pusat: Kementerian Keuangan Republik Indonesia.
- McNeil, A. J. (2015). *Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools*. United Kingdom: Princeton University Press.
- Nugroho, K. (2021, Februari 3). *BMN dan Bencana*. Retrieved from Artikel KPNN Banda Aceh: <https://www.djkn.kemenkeu.go.id/kpnn-bandaaceh/baca-artikel/13681/BMN-dan-Bencana.html>
- Wildani, Z. (2021). Estimation of the Catastrophic Risk using Mixture Models. *IPTEK : The Journal of Engineering*.