

PEMODELAN GEMPA BUMI DI PROVINSI JAWA TIMUR MENGGUNAKAN *EXTREME VALUE THEORY* DAN *PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS*

Muhammad Afjar Firdaus

Program Studi Sarjana Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, dan Indonesia
e-mail: firdanafjar14@gmail.com

Dimas Avian Maulana

Program Studi Sarjana Sains Aktuaria, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, dan Indonesia
e-mail: dimasmaulana@unesa.ac.id*

Abstrak

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Indo-Australia yang menyebabkan Indonesia menjadi wilayah yang rawan terjadi gempa bumi. Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi yang dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Salah satu provinsi di Indonesia yang menjadi salah satu wilayah yang cukup rentan adalah Provinsi Jawa Timur. Wilayah Jawa Timur dipilih karena terdapat kejadian gempa tak lazim pada hari Jumat, 22 Maret 2024 di Pulau Bawean, Jawa Timur. Data kejadian gempa bumi di Provinsi Jawa Timur dengan besaran 4.5 magnitudo atau lebih pada tahun 2004 hingga 2024 dianalisis untuk mengetahui model kejadian gempa bumi yang akan datang. Pemodelan kejadian gempa bumi dilakukan sebagai salah satu sarana untuk melakukan prediksi kejadian gempa bumi sehingga mampu membantu berbagai pihak untuk persiapan mitigasi bencana gempa bumi. Pemodelan gempa bumi dilakukan dengan dua metode yaitu *Extreme Value Theory* (EVT) sebagai pendekatan statistik yang akan dibandingkan dengan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) yang merupakan pendekatan geologis. Hasil pemodelan kedua pendekatan dibandingkan menggunakan *Akaike Information Criterion* (AIC) untuk memilih model terbaik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PSHA memiliki hasil model yang lebih baik dengan hasil perhitungan AIC sebesar -2806.87 sehingga dapat dikatakan bahwa PSHA memberikan model gempa yang lebih baik berdasarkan data kejadian gempa bumi di Jawa Timur

Kata Kunci: : Gempa Bumi, *Extreme Value Theory*, *Generalized Pareto Distribution*, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, *Gutenberg-Richter*.

Abstract

Indonesia is located at the meeting point of three tectonic plates, namely the Eurasian Plate, the Pacific Plate, and the Indo-Australian Plate, which makes Indonesia an area prone to earthquakes. An earthquake is an event where the earth vibrates due to the release of energy in the earth resulting from the movement of tectonic plates. One of the provinces in Indonesia that is quite vulnerable is East Java Province. The East Java region was chosen because there was an unusual earthquake on Friday, March 22, 2024 on Bawean Island, East Java. Earthquake data in East Java Province with a magnitude of 4.5 or more from 2004 to 2024 was analyzed to determine the model of future earthquake events. Earthquake event modeling is carried out as a means to predict earthquake events so that it can help various parties to prepare for earthquake disaster mitigation. Earthquake modeling is carried out using two methods, namely *Extreme Value Theory* (EVT) as a statistical approach that will be compared with *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) which is a geological approach. The modeling results of the two approaches were compared using the *Akaike Information Criterion* (AIC) to select the best model. The results of the study showed that PSHA had better model results with an AIC calculation result of -2806.87. So it can be said that PSHA provides a better earthquake model based on earthquake data in East Java.

Keywords: Earthquake, *Extreme Value Theory*, *Generalized Pareto Distribution*, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, *Gutenberg-Richter*.

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng IndoAustralia. Letak Indonesia yang

berada di pertemuan ketiga lempeng tersebut menyebabkan Indonesia menjadi wilayah yang rawan terjadi gempa bumi (Zakaria dan Sidarto, 2015). Gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang tidak dapat dihindari (Munandar dkk.,

2019). Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi yang disebabkan karena adanya benturan antar lempeng tektonik. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik (BMKG, 2023).

Pergerakan dari lempeng-lempeng tektonik tersebut akan mengakibatkan tekanan pada daerah-daerah pertemuannya. Pada saat batuan tidak dapat menahan tekanan tersebut, maka batuan akan pecah, kemudian menimbulkan gelombang seismik yang kuat dalam lempeng bumi. Peristiwa tersebut disebut dengan gempa bumi tektonik (Verstappen, 2000). Berdasarkan data dari website usgs.gov mengenai kejadian gempa bumi yang berada di Pulau Jawa dari tahun 2004 hingga 2024, memperlihatkan bahwa gempa banyak terjadi di Pulau Jawa.

Peta yang ada pada Gambar 1.1. menunjukkan gempa yang terjadi di Pulau Jawa. Gempa bumi banyak terjadi di lautan disekitar pulau Jawa dengan beragam kekuatan gempa yang ditunjukkan dari ukuran lingkaran abu-abu kecil menunjukkan kejadian gempa bumi dengan kekuatan rendah hingga lingkaran abu-abu besar menunjukkan kejadian gempa bumi dengan kekuatan yang tinggi.

Dinamika tektonik pulau Jawa didominasi oleh pergerakan lempeng Indo-Australia yang relatif bergerak ke utara dan bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam. Tumbukan antarlempeng biasanya terjadi pada lempeng Indo-Australia dengan kedalaman berkisar 100-200 km di bawah dan 600 km di utara pulau Jawa. Tumbukan antar lempeng tersebut mengakibatkan pergerakan unsur-unsur bumi. Kondisi ini menjadikan wilayah pulau Jawa sebagai daerah tektonik aktif dengan tingkat seismisitas yang tinggi. Salah satu provinsi di Pulau Jawa yang menjadi salah satu wilayah yang cukup rentan adalah Provinsi Jawa Timur. Wilayah Jawa Timur yang secara geografis dekat dengan sumber-sumber penyebab gempa bumi meningkatkan resiko akan bencana gempa bumi (Permana dan Faisal, 2023).

Pada tahun 2024, menurut Daryono selaku direktur Gempa Bumi dan Tsunami terdapat gempa bumi tidak lazim yang terjadi pada hari Jumat, 22 Maret 2024 di Pulau Bawean, Jawa Timur. Berdasarkan catatan BMKG, terdapat 149 kali gempa

susulan yang terjadi hingga Sabtu 23 Maret 2024 (Metro TV, 2024). Adanya kejadian ini membuat peneliti tertarik untuk melakukan pemodelan kejadian gempa bumi di Jawa Timur. Data yang digunakan adalah kejadian gempa bumi di Jawa Timur dengan besaran 4.5 magnitudo atau lebih dengan periode 2004 hingga 2024. Data ini digunakan berdasarkan informasi yang disebutkan pada website usgs.go yaitu gempa yang dirasakan oleh banyak penduduk tergolong pada skala MMI IV keatas dengan kekuatan sebesar 4.5 magnitudo sehingga data ini cocok untuk dilakukan pemodelan.

Pada penelitian ini, pemodelan dilakukan dengan memilih pendekatan *Extreme Value Theory* (EVT) dan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) yang kemudian hasil pemodelan dari keduanya dibandingkan dengan *Akaike Information Criterion* (AIC). Analisis extreme value bertujuan untuk mengukur perilaku stokastik dari suatu kejadian yang sangat besar atau sangat kecil. Parameter yang diestimasi dengan distribusi nilai ekstrem merupakan parameter ditentukan dari data maksimum waktu tertentu, sehingga data yang digunakan terbatas (Rahmadani dan Oktaviana, 2022). Teori nilai ekstrem berhubungan dengan hukum statistik tentang nilai ekstrem suatu variabel acak dan ditujukan untuk analisis statistik kejadian yang jarang terjadi. Pendekatan ini secara efektif dapat menggambarkan karakteristik ekor data dan melibatkan perhitungan yang sederhana. Teori nilai ekstrim adalah sarana yang sangat diperlukan dalam studi bencana alam. Teori ini merupakan model umum yang sesuai dengan distribusi ekor data risiko bencana, dan digunakan secara luas di berbagai bidang, seperti hidrologi, meteorologi, dan ilmu bumi (Bai dkk., 2021).

Bai dkk. (2021) menggunakan *Extreme Value Theory* untuk mengevaluasi periode ulang dari magnitudo gempa terbesar yang kemungkinan terjadi di Tiongkok. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis resiko gempa bumi berdasarkan karakteristik geografis dan model statistik ekstrem. Hasil yang diharapkan bertujuan mempermudah mengurangi resiko gempa bumi dan mempermudah tanggapan darurat terhadap gempa bumi.

Sebagai pembanding, PSHA dipilih karena PSHA merupakan metode yang menggunakan pendekatan geologis dengan tujuan untuk membandingkan pendekatan statistik dengan pendekatan geologis.

Pada analisis PSHA harus diketahui berapa besar kekuatan maksimalnya di setiap sumber kegempaan atau setiap segmen, kegempaan yang terakhir, dan berapa lama periode atau frekuensi alamiah dari kegempaannya dengan memperhitungkan kemungkinan terlampauinya suatu kekuatan gempa tertentu (Habiburrahman, 2019). Metode PSHA menghitung tingkat guncangan tanah di lokasi tertentu secara probabilistik, artinya dilakukan perhitungan mengenai faktor ketidakpastian dalam analisis seperti ukuran, lokasi, dan frekuensi kejadian gempa bumi (Purbandini dkk., 2017).

Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan prediksi kekuatan gempa bumi menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dilakukan oleh Muslih Purwana dkk. (2019) di Sutami Dam, Malang. Penelitian ini menentukan probabilitas terjadi gempa bumi pada return period yang menghasilkan probabilitas gempa bumi yang mungkin terjadi terletak antara 22 - 44 km dari Sutami Dam.

Setelah dilakukan analisis menggunakan EVT dan PSHA, dilanjutkan dengan evaluasi model dan pemilihan model terbaik dengan *Akaike Information Criterion* (AIC). AIC merupakan salah satu metode evaluasi model yang digunakan dalam pemilihan model terbaik dari sekumpulan model yang telah diestimasi. Tujuan utama AIC adalah memilih model yang mampu memprediksi data baru secara lebih akurat dengan mempertimbangkan kompleksitas parameter model (Beirlant dkk., 2004).

Berdasarkan kasus pada paragraf sebelumnya, peneliti akan melakukan penelitian di wilayah Jawa Timur sebagai salah satu wilayah yang memiliki kejadian gempa bumi yang menjadi salah satu sorotan oleh BMKG sehingga dengan adanya penelitian ini mampu menjadi salah satu langkah awal untuk mempermudah strategi mitigasi bencana di Jawa Timur. Dengan demikian, penelitian ini membahas perbandingan pemodelan dari pendekatan EVT dan PSHA yang nantinya akan dibandingkan untuk memperoleh model terbaik dari salah satu pendekatan.

KAJIAN TEORI

GEMPA BUMI

Gempa bumi adalah getaran yang bersumber dari dalam bumi yang merambat ke permukaan bumi

akibat lempeng bumi bergeser dengan keras. Penyebab gempa bumi dapat berupa dinamika bumi (tektonik), aktivitas gunungapi, akibat meteor jatuh, longsor (di bawah muka air laut), ledakan bom nuklir di bawah permukaan. Gempa bumi tektonik merupakan gempa bumi yang paling umum terjadi. Getaran pada saat gempa bumi dihasilkan dari peristiwa pematahan batuan yang diakibatkan oleh benturan dua lempeng secara perlahan-lahan. Akumulasi energi benturan kedua lempeng tersebut melampaui kekuatan batuan (Nur, 2010). Sebelum skala magnitudo (M) ini digunakan sejak 2018, ukuran terkait gempa yang banyak dikenal sebelumnya adalah skala *Richter* (SR). Ini diambil dari nama penemunya, ahli seismologi Amerika Serikat *Charles Francis Richter*, di tahun 1930-an sebagai sebuah cara untuk mengukur besarnya kekuatan sebuah gempa. Skala magnitudo bersifat objektif. Mengukur besarnya energi yang dilepaskan oleh gempa berdasar pengukuran amplitudo atau frekuensi getaran gempa yang terjadi, diukur menggunakan seismograf.

EXTREME VALUE THEORY

Extreme Value Theory (EVT) diusulkan untuk memodelkan risiko dan frekuensi kecelakaan. Salah satu yang membedakan analisis nilai ekstrem adalah kemampuan untuk memodelkan perilaku stokastik dari proses yang sifatnya sangat besar atau sangat kecil. Perilaku ekstrem ini biasanya sangat jarang terjadi dan tidak dapat diamati dalam jangka waktu pengumpulan data yang wajar. EVT sering kali melibatkan tantangan untuk memperkirakan kemungkinan kejadian ekstrem dalam jangka waktu yang lama mengingat data historis yang sangat singkat dan terbatas. Paradigma nilai ekstrem terdiri dari prinsip ekstrapolasi model berdasarkan penerapan batasan matematika sebagai pendekatan. Asumsi implisit utama dari EVT adalah bahwa perilaku stokastik yang menjadi dasar dari proses yang dimodelkan cukup mulus untuk memungkinkan ekstrapolasi ke tingkat yang tidak teramati (Coles, 2001).

EVT berkaitan dengan hukum statistik dari nilai ekstrem dari variabel acak dan didedikasikan untuk analisis statistik peristiwa langka. Pendekatan ini dapat secara efektif menggambarkan karakteristik ekor data dan melibatkan perhitungan sederhana. Teori nilai ekstrem merupakan alat yang sangat

diperlukan dalam studi bencana alam. Model ini merupakan model umum yang sesuai dengan distribusi data risiko bencana, dan digunakan secara luas di berbagai bidang, seperti hidrologi, meteorologi, dan ilmu bumi (Bai dkk., 2021)

Terdapat dua metode utama yang dapat dipakai untuk menganalisis data ekstrem, yaitu metode *Block Maxima* (BM) dan *Peaks Over Threshold* (POT). Metode *Block Maxima* (BM) memiliki fokus pada pengambilan nilai maksimum dari setiap blok waktu tertentu, sedangkan metode *Peaks Over Threshold* (POT) digunakan untuk mengamati nilai-nilai yang melebihi ambang batas yang telah ditentukan (Beirlant dkk., 2004). Metode yang dapat digunakan untuk data gempa bumi adalah POT karena kejadian gempa bumi bukan termasuk kejadian yang periodik atau dapat terjadi dalam waktu tertentu secara berkala.

PEAKS OVER THRESHOLD

Tujuan dari metode ini adalah untuk menentukan distribusi probabilitas nilai ekstrem yang melebihi ambang batas. Misalkan X_1, X_2, \dots, X_n menjadi independen dan terdistribusi secara identik variabel acak dengan fungsi distribusi kumulatif F . Pilih yang cukup besar nomor u sebagai ambang batas tetap. Semua variabel yang lebih besar dari u tergolong variabel ekstrem. Jika $X_i - u \geq 0, Y_i = X_i - u$ dikenal sebagai pelampauan. Fungsi kelebihan ambang batas diberikan sebagai berikut:

$$F_u(x) = P(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x+u) - F(u)}{1 - F(u)} \quad (1)$$

Metode ini optimal jika ambang batasnya cukup tinggi, dengan jumlah observasi yang banyak, seperti yang dijelaskan oleh teori Pickands (Pickands III, 1975). Pemilihan ambang batas adalah kunci POT. Jika ambang batas terlalu rendah, observasi akan lebih banyak, namun prediksi akan menjadi bias; jika ambang batas terlalu tinggi, observasi akan lebih sedikit, yang akan menyebabkan varians lebih besar dalam estimasi parameter.

Metode pemilihan ambang batas saat ini mencakup diagnostik grafis, metode heuristik, dan pemilihan ambang batas otomatis. Diagnostik grafis adalah metode tradisional yang secara visual memilih ambang batas melalui gambar, yang mencakup plot mean sisa life dan plot Hill (Coles, 2001). Metode heuristik meliputi aturan 10% atas, aturan akar kuadrat, dan aturan empiris (Scarrott dan MacDonald, 2012). Pemilihan ambang batas otomatis

meliputi uji stabilitas parameter bentuk menggunakan uji rasio kemungkinan dan uji skor (Northrop dan Coleman, 2014), pemilihan ambang batas berdasarkan *bootstrap* (Gomes dan Oliveira, 2002), dan prosedur pengurangan bias (Guillou dan Hall, 2001). Penelitian ini, menggunakan metode heuristik dalam penentuan ambang batas. Metode heuristik yang digunakan adalah metode dengan aturan 10% atau dapat disebut metode persentase. Berdasarkan Malika (2014) penentuan nilai ambang batas yang lebih mudah dan sering digunakan adalah dengan metode persentase.

Data yang berada di atas ambang batas, yaitu sekitar 10% dari data yang sudah diurutkan dari yang paling besar hingga yang terkecil, disarankan oleh Malika (2014) berdasarkan ChavesDermoulin (2004). Hal ini disebabkan oleh temuan penelitian analisis sensitivitas yang menyatakan bahwa dalam suatu kasus di mana ada perubahan kecil terhadap ambang, taksiran parameter yang dibuat tidak akan terpengaruh oleh perubahan tersebut

GENERALIZED PARETO DISTRIBUTION

Generalized Pareto Distribution (GPD) adalah distribusi probabilitas yang digunakan untuk memodelkan probabilitas kejadian ekstrem yang melebihi suatu ambang batas (Beirlant dkk., 2004). Data ekstrem yang sudah ditentukan dengan menggunakan metode POT, kemudian akan dilanjutkan analisis pemodelan data ekstrem menggunakan GPD.

Teori Pickands menyatakan bahwa distribusi batas eksek melebihi ambang batas ($F_u(x)$) dapat dilakukan pendekatan secara efektif dengan GPD, yang menggunakan tiga parameter: parameter lokasi (μ), parameter skala (σ), dan parameter bentuk (ξ). Distribusi kumulatif dari GPD dinyatakan dalam bentuk berikut:

$$F(x) = 1 - \left(1 + \frac{\xi(x-\mu)}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi}}, \quad \xi \neq 0 \quad (2)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{(x-\mu)}{\sigma}}, \quad \xi = 0$$

Jika $\xi \geq 0$, domainnya adalah $x \geq \mu$. Jika $\xi \leq 0$, domainnya adalah $\mu \leq x \leq \mu - \sigma \xi$. Jika $\xi = 0$, distribusi adalah distribusi eksponensial.

PROBABILITY WEIGHTED MOMENTS

Estimasi parameter *Generalized Pareto Distribution* (GPD) (ξ dan σ) menggunakan metode *Probability Weighted Moments* (PWM). Metode PWM didasarkan

pada penggunaan momen yang berbobot probabilitas dan memberikan pendekatan yang lebih stabil dalam situasi pada saat data ekstrem berjumlah kecil atau distribusi memiliki ekor yang panjang dan biasanya memiliki *outlier* (Beirlant dkk., 2004).

Momen berbobot probabilitas M_r untuk suatu distribusi adalah:

$$M_r = \sum_{i=1}^n p_i (x_i - u)^r \quad (3)$$

di mana p_i adalah probabilitas terkait dengan setiap data x_i yang melebihi ambang batas u dan r adalah urutan dari momen tersebut. Momen berbobot dapat menggunakan probabilitas yang dihitung berdasarkan urutan data ekstrem, sehingga

$$p_i = \frac{i}{n}, \text{ untuk data ke-} i$$

Pada distribusi GPD, estimasi parameter dapat dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$\xi = 2 - \frac{M_1}{M_2 - M_1}, \quad \sigma = \frac{M_1(2 - \xi)}{\xi} \quad (4)$$

RETURN PERIOD

Return period atau periode ulang merupakan rata-rata kejadian ekstrem yang lebih besar dari nilai tertentu (Berlant, 2005). *Return period* dapat digunakan untuk menentukan seberapa sering kejadian ekstrem akan terjadi dalam jangka waktu tertentu. Salah satu kejadian ekstrem yang paling mungkin terjadi adalah gempa bumi. Secara umum, *return period* $T(x)$ adalah kebalikan dari probabilitas kejadian ekstrem yang melebihi nilai tertentu x :

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (5)$$

dengan $F(x)$ adalah fungsi kumulatif dari GPD pada nilai x

Jika $F(x)$ adalah probabilitas kumulatif dari kejadian ekstrem yang lebih kecil atau sama dengan x , maka $1 - F(x)$ merepresentasikan probabilitas kejadian yang lebih besar dari x . *Return period* dapat memberikan rata-rata waktu kapan kejadian ekstrem yang lebih besar dari x akan terjadi.

Fungsi distribusi kumulatif $F(x)$ untuk GPD dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F(x) = 1 - \left(1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (6)$$

PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS

Analisis *seismic hazard* dilakukan untuk mengetahui tingkat guncangan tanah secara kuantitatif di suatu lokasi tertentu yang diakibatkan oleh suatu kejadian gempa. Analisis PSHA pada prinsipnya adalah analisis deterministik dengan

berbagai macam skenario dan didasarkan tidak hanya pada parameter gempa yang menghasilkan pergerakan tanah terbesar. Pada pendekatan PSHA, diperhitungkan seluruh parameter ketidakpastian yang meliputi magnitudo gempa, jarak hiposenter, dan frekuensi kejadian gempa. Metode ini memberikan kerangka kerja yang terarah sehingga faktor-faktor ketidakpastian tersebut dapat diidentifikasi, diperkirakan, dan kemudian digabungkan dengan metode pendekatan yang rasional untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kejadian gempa.

GUTENBERG-RITCHER

Proses kalkulasi tingkat bahaya gempa yang digunakan dalam metode PSHA difokuskan pada hubungan frekuensi dan magnitudo gempa bumi. Distribusi katalog tentang hubungan frekuensi dan magnitudo gempa bumi digambarkan oleh hubungan frekuensi dan magnitudo. Metode analisis statistika yang biasa digunakan adalah dengan menghitung logaritma jumlah gempa bumi yang telah terjadi di suatu wilayah pada waktu tertentu sebagai bentuk fungsi dari magnitudo. Rumus yang diturunkan oleh *Gutenberg* dan *Richter* adalah rumus empiris yang paling umum digunakan (Wahyuni dkk., 2020).

$$x = 10^{a-bM} \quad (7)$$

dimana x adalah jumlah kejadian gempa bumi.

Pada distribusi *Gutenberg-Richter*, perlu dilakukan estimasi parameter a dan b dengan tujuan untuk mendapatkan model statistik dari pola kejadian gempa bumi. Estimasi parameter dapat dilakukan dengan formula berikut:

- Parameter b dihitung dengan formula:

$$b = \frac{\log(e)}{M - \min(M)} \quad f(8)$$

- Parameter a dihitung dengan:

$$a = \log(x) + bM_{\min} \quad (9)$$

DISTRIBUSI POISSON

Setelah diperoleh model dari distribusi *Gutenberg-Richter* yang menghasilkan nilai x_M atau jumlah kejadian gempa bumi dengan magnitudo lebih besar dari $M_{threshold}$, maka dilakukan perhitungan Probabilitas *exceedance*. Probabilitas *exceedance* gempa bumi dapat dihitung menggunakan distribusi *Poisson*. Distribusi *Poisson* digunakan untuk menentukan peluang suatu kejadian dalam waktu dan lokasi tertentu dengan kejadian yang diharapkan

sangat jarang terjadi. Laju kejadian gempa (λ) dihitung sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{x_M}{\text{total tahun pengamatan}} \quad (10)$$

dimana x_M adalah jumlah kejadian gempa bumi diatas $M_{\text{threshold}}$

Selanjutnya, berdasarkan nilai laju kejadian gempa bumi yang telah diperoleh, probabilitas terjadi gempa bumi dapat dihitung dengan:

$$P = 1 - \lambda^{\frac{1}{T}} \quad (11)$$

AKAIKE INFORMATION CRITERION

Akaike Information Criterion (AIC) merupakan salah satu metode evaluasi model yang digunakan dalam pemilihan model terbaik dari sekumpulan model yang telah diestimasi. Tujuan utama AIC adalah memilih model yang mampu memprediksi data baru secara lebih akurat dengan mempertimbangkan kompleksitas parameter model (Beirlant dkk., 2004). Cara menghitung AIC dituliskan sebagai berikut:

$$AIC = -2 \ln(\hat{L}) + 2k \quad (12)$$

dengan:

- \hat{L} adalah nilai likelihood yang diperoleh dari estimasi model
- k adalah jumlah parameter dalam model

Fungsi AIC memperhitungkan dua komponen penting: *log-likelihood* dari model dan jumlah parameter. Model yang memiliki *likelihood* lebih tinggi akan memberikan kecocokan yang lebih baik terhadap data, namun jika jumlah parameter terlalu banyak, model akan menjadi terlalu rumit sehingga akan mempengaruhi kemampuan generalisasi model tersebut.

Model dengan nilai AIC lebih rendah dipilih sebagai model yang lebih baik, karena model tersebut mampu *memprediksi* data baru dengan lebih akurat tanpa overfitting. Model dengan nilai AIC terendah akan dipilih sebagai model yang lebih baik dalam memprediksi gempa bumi

METODE

JENIS ATAU DESAIN PENELITIAN

Penelitian ini termasuk ke dalam penelitian kuantitatif dengan menggunakan data sekunder. Penelitian kuantitatif ini bertujuan untuk membangun model berdasarkan perhitungan *Extreme Value Theory* (EVT) dan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) yang kemudian menentukan

model terbaik dari kedua metode dengan hasil berupa model prediksi gempa bumi. Studi literatur juga digunakan untuk memperkuat landasan teori yang digunakan dengan mengkaji berbagai literatur ilmiah dan buku nasional maupun internasional (Apriani dkk., 2014).

TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari *website* usgs.gov. Data yang digunakan adalah data kejadian gempa bumi dengan kekuatan 4.5 Magnitudo atau lebih di Provinsi Jawa Timur dengan periode tahun 2004 sampai tahun 2024.

TEKNIK PENGUMPULAN DATA

Data pada penelitian ini diperoleh melalui metode pengunduhan data yang berupa data sekunder dan diakses melalui *website* usgs.gov. Data yang digunakan mencakup informasi berupa waktu kejadian dan besaran gempa bumi (magnitudo) yang terjadi di Provinsi Jawa Timur dalam rentang waktu 2004 - 2024. Data ini diunduh dalam format Excel untuk dilakukan analisis lebih lanjut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

ANALISIS DESKRIPTIF

Pengambilan data gempa bumi di Provinsi Jawa Timur pada tahun 2004 - 2024 dengan magnitudo lebih dari sama dengan 4.5 didasarkan dengan besaran gempa yang menyebabkan kerusakan. Analisis deskriptif dilakukan untuk mendapatkan gambaran secara umum data sebagai informasi awal karakteristik data gempa bumi yang digunakan.

Tabel 1. Hasil Statistik Deskriptif Data Kejadian Gempa Bumi di Jawa Timur Tahun 2004-2024

Statistik	Kekuatan
Rata-rata	4.8 Mag
Median	4.8 Mag
Modus	4.5 Mag
Standart Deviasi	0.4 Mag
Minimum	4.5 Mag
Maximum	7.0 Mag

Berdasarkan hasil uji statistik deskriptif pada Tabel 1, dapat dikatakan bahwa rata-rata kekuatan gempa bumi yang dirasakan oleh masyarakat Provinsi Jawa Timur pada tahun 2004 - 2024 sebesar 4.8 yang menandakan masih banyak gempa dengan magnitudo dibawah 5 magnitudo, pada hal ini kerusakan yang dirasakan juga tidak terlalu banyak. Pada data ini, magnitudo dengan nilai terendah

sebesar 4.5 magnitudo. Selain itu, pada hasil uji statistik deskriptif menunjukkan adanya modus atau nilai yang sering muncul pada data gempa bumi yaitu 4.5 magnitudo. Hasil ini diartikan bahwa sering terjadi gempa dengan kekuatan 4.5 magnitudo di Provinsi Jawa Timur. Dengan frekuensi gempa sebesar 4.5 magnitudo yang sangat banyak, maka dapat dikatakan bahwa banyak gempa yang kerusakannya tidak terlalu besar

PENENTUAN NILAI EKSTREM DENGAN POT

POT digunakan untuk menentukan nilai data ekstrem yang melebihi ambang batas. Langkah awal yang dilakukan dalam metode ini adalah penentuan ambang batas. Penentuan ambang batas dilakukan dengan aturan 10% atau metode persentase. Pemilihan ambang batas dengan metode persentase 10% merupakan metode yang memilih 10% data yang ada atau dapat dilakukan dengan memilih persentil 90% dalam data. Pemilihan persentil sebesar 90% menghasilkan ambang batas sebesar 5.2 magnitudo. Ambang batas ini menunjukkan bahwa yang disebut data ekstrem adalah data kejadian gempa bumi dengan besaran lebih dari 5.2 magnitudo.

Setelah mengetahui data esktrm dari hasil POT, yang dapat dilihat pada Lampiran B poin A bahwa terdapat 29 data ekstrem kejadian gempa bumi di Jawa Timur dari tahun 2004 - 2024. Banyaknya data ekstrem tersebut menunjukkan bahwa pada tahun 2004 hingga 2024 tidak banyak terjadi gempa bumi dengan kekuatan ekstrem di Jawa Timur. Data ekstrem yang diperoleh dari POT akan memiliki fungsi distribusi yang mendekati GPD (Gilli dan Kellezi, 2003). GPD adalah distribusi probabilitas yang digunakan dalam pemodelan probabilitas kejadian ekstrem yang melebihi suatu ambang batas yang telah ditentukan (Beirlant dkk., 2004). Selanjutnya, setelah data ekstrem yang diperoleh dari metode POT, data ekstrem kemudian divalidasi sesuai menggunakan GPD dengan dilakukan estimasi parameter GPD menggunakan metode PWM.

ESTIMASI PARAMETER DARI GPD

GPD secara umum memiliki tiga parameter, yaitu parameter lokasi (μ), parameter skala (σ) dan parameter bentuk (ξ). Namun, pada penelitian ini hanya digunakan dua parameter yaitu parameter

skala (σ) dan parameter bentuk (ξ) karena pada penelitian ini hanya mencari suatu model terbaik tanpa melakukan prediksi lokasi kejadian. Kedua parameter tersebut akan diestimasi menggunakan metode PWM untuk mendapatkan nilai parameternya. Estimasi parameter menggunakan PWM digunakan karena jumlah data ekstrem yang tergolong kecil atau tidak banyak.

Tabel 2. Nilai Estimasi Parameter GPD

Parameter	Nilai Estimasi
skala (σ)	-1.9779411
bentuk (ξ)	0.3356697

Berdasarkan Tabel 2, diperoleh model sebagai berikut.

$$F(x) = 1 - \left(1 + \frac{0.3356697(x)}{-1.9779411} \right)^{-\frac{1}{0.3356697}}$$

Parameter skala yang rendah mengindikasikan rendahnya penyebaran data dari nilai rata-rata. Parameter ini juga menunjukkan bahwa rendahnya variabilitas dalam data, yang dapat menggambarkan bahwa tidak beragamnya besaran kejadian serupa yang mungkin terjadi. Parameter bentuk yang bernilai positif menandakan bahwa distribusi memiliki ekor kanan yang panjang, semakin tingginya nilai parameter bentuk maka semakin besar pengaruhnya terhadap bentuk dan skala distribusi. Parameter ini juga menunjukkan bahwa tingginya probabilitas terjadinya gempa bumi.

PENENTUAN PROBABILITAS EXCEEDANCE GEMPA BUMI DENGAN EVT

Setelah mengestimasi parameter GPD dari data gempa bumi, langkah berikutnya adalah menghitung return period dengan parameter yang telah diperoleh sebelumnya. Dalam penelitian ini, return period akan digunakan untuk memberikan probabilitas terjadinya gempa bumi dengan kekuatan tertentu dalam 1, 5, 15, 25, 50, dan 100 tahun yang akan datang. Periode tersebut dipilih untuk menguji bagaimana dampak data dengan dengan periode 20 tahun dengan probabilitas yang dihasilkan pada periode lebih dari 20 tahun yang akan datang. Berdasarkan hasil perhitungan dengan python probabilitas *exceedance* akan terjadi gempa bumi terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Probabilitas *Exceedance* Terjadi Gempa Bumi menggunakan EVT

Periode	Probabilitas
1 Tahun	9.24%
5 Tahun	1.92%
15 Tahun	0.64%
25 Tahun	0.39%
50 Tahun	0.19%
100 Tahun	0.10%

Berdasarkan Tabel 3, dapat dilihat bahwa probabilitas *exceedance* menurun seiring dengan bertambahnya periode. Hasil tersebut memiliki arti bahwa semakin lama periode yang dipakai, maka semakin rendah probabilitas setidaknya terjadi 1 gempa dengan kekuatan di atas ambang batas. Setelah mendapatkan probabilitas *exceedance* dengan EVT, data kejadian gempa bumi akan dilakukan pemodelan menggunakan PSHA untuk mengetahui hasil lain dari model kejadian gempa bumi.

ESTIMASI PARAMETER DISTRIBUSI GUTENBERG-RITCHER

Berdasarkan magnitudo dan frekuensi kejadian gempa bumi, pemodelan gempa bumi dapat ditentukan dengan pendekatan PSHA yang diawali dengan distribusi *Gutenberg-Richter*. Distribusi ini digunakan untuk mencari jumlah kejadian gempa bumi yang terjadi dengan magnitudo di atas ambang batas. Pada distribusi ini, digunakan ambang batas yang sama seperti pada metode POT yaitu 5.2 magnitudo. Distribusi *Gutenberg-Richter* diperlukan estimasi parameter a dan b . Nilai estimasi parameter distribusi *Gutenberg-Richter* dapat menentukan pola data yang ada. Hasil estimasi parameter distribusi *Gutenberg-Richter* dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Nilai Estimasi Parameter Distribusi *Gutenberg-Richter*

Parameter	Nilai Estimasi
a	8.1766
b	1.2669

Berdasarkan Tabel 4, substitusi parameter menghasilkan

$$F(x) = 10^{8.17659 - (1.2669)M}$$

Nilai parameter b yang cukup besar menunjukkan kemungkinan terjadinya gempa bumi dengan kekuatan kecil akan lebih besar dibandingkan gempa bumi dengan kekuatan besar. Selanjutnya parameter dihitung agar mendapatkan jumlah kejadian gempa bumi dengan besaran di atas ambang batas.

PENENTUAN PROBABILITAS EXCEEDANCE GEMPA BUMI DENGAN PSHA

Setelah distribusi *Gutenberg-Richter* mendapatkan jumlah kejadian gempa bumi dengan magnitudo melebihi ambang batas, maka dilakukan perhitungan laju kejadian gempa bumi (λ). Laju kejadian gempa bumi dapat dihitung menggunakan distribusi *Poisson*. Hasil perhitungan distribusi *Poisson* adalah laju kejadian gempa bumi (λ) sebesar 0.388028. Berdasarkan nilai laju kejadian gempa bumi (λ), maka dapat ditentukan hasil analisis PSHA dengan mencari probabilitas *exceedance* gempa bumi dalam periode yang sama dengan EVT yaitu 1, 5, 15, 25, 50, dan 100 tahun dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Probabilitas *exceedance* akan Terjadi Gempa Bumi dengan PSHA

Periode	Probabilitas
1 Tahun	9.24%
5 Tahun	1.92%
15 Tahun	0.64%
25 Tahun	0.39%
50 Tahun	0.19%
100 Tahun	0.10%

Berdasarkan Tabel 5, dapat dilihat bahwa probabilitas *exceedance* menurun seiring dengan bertambahnya periode. Hasil tersebut memiliki arti bahwa semakin lama periode yang dipakai, maka semakin rendah probabilitas setidaknya terjadi 1 gempa dengan kekuatan di atas ambang batas. Setelah diperoleh probabilitas *exceedance* terjadinya gempa pada *return period* tertentu dengan PSHA, hasil akan dibandingkan dengan hasil dari EVT menggunakan AIC yang bertujuan untuk menentukan model terbaik yang cocok dengan data.

PENENTUAN MODEL TERBAIK DENGAN AIC

Setelah diperoleh model menggunakan EVT dan PSHA, selanjutnya adalah membandingkan kedua model dan mencari model terbaik yang cocok dengan data menggunakan AIC. Perhitungan nilai AIC diperoleh dari jumlah parameter model dan nilai *ln-likelihood*. Pada metode EVT jumlah parameter model sebanyak 2 dan nilai *ln-likelihood* adalah -10.21. Kemudian Pada metode PSHA jumlah parameter model sebanyak 2 dan nilai *ln-likelihood* adalah 1405.435. Hasil hitung AIC dari masing-masing pendekatan dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Nilai AIC

Pendekatan	Nilai AIC
EVT	24.42
PSHA	-2806.87

Berdasarkan hasil perhitungan AIC dari masing-masing metode, dapat dilihat bahwa nilai AIC dari EVT adalah 24.42 dan nilai AIC dari PSHA adalah -2806.87. Nilai AIC dari PSHA lebih rendah daripada EVT, maka dapat disimpulkan bahwa hasil model dari metode PSHA lebih baik dibandingkan EVT.

PENUTUP

SIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada hasil dan pembahasan, dapat ditarik kesimpulan bahwa model terbaik berdasarkan kejadian gempa bumi di Jawa Timur adalah pemodelan menggunakan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai AIC dari PSHA sebesar -2806.87.

SARAN

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk memperoleh hasil yang lebih maksimum. Salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah menambahkan metode lain yang mengarahkan penelitian menjadi prediksi gempa bumi. Hasil yang berupa model hanyalah penentuan probabilitas akan terjadi gempa dalam jangka waktu tertentu, namun ketika penelitian berupa prediksi maka akan diperoleh probabilitas terjadi gempa bumi yang disertai dengan lokasi akan terjadinya gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- TV, M. (2024). MetroTV : BMKG Sebut Gempa Tuban Tak Lazim. *Metrotvnews.Com*. <https://www.metrotvnews.com/play/KRXC5da3-bmkg-sebut-gempa-tuban-tak-lazim>
- Gomes, M. I., & Oliveira, O. (2002). The Bootstrap Methodology in Statistics of Extremes – Choice of the Optimal Sample Fraction. *Extremes*, 4, 331–358. <https://doi.org/10.1023/A>
- Guillou, A., & Hall, P. (2001). A diagnostic for selecting the threshold in extreme value analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology*, 63(2), 293–305. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00286>
- Hilbe, J. M. (2007). Negative binomial regression. *Negative Binomial Regression*, 1–251. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811852>
- Parameter estimation of the generalized Pareto

- distribution – Part I. (n.d.). [%0A10.1016/j.jspi.2008.11.019](https://doi.org/10.1016/j.jspi.2008.11.019)
- Verstappen, H. (2000). Outline of the Geomorphology of Indonesia: A Case Study on Tropical Geomorphology of a Tectogene Region. ITC Publication.
- Sudjana. (2005). Metode Statistika. Bandung: Tarsito.
- de Zea Bermudez, P., & Kotz, S. (2010). Parameter estimation of the generalized Pareto distribution – Part I. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 140(6), 1353–1373. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2008.11.019>
- Dutfoy, A. (2021). Earthquake Recurrence Model Based on the Generalized Pareto Distribution for Unequal Observation Periods and Imprecise Magnitudes. *Pure and Applied Geophysics*, 178(5), 1549–1561. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02712-3>
- Beirlant, J., Geoghebeur, Y., Teugels, J., & Segers, J. (2004). Statistics of Extremes. In *Statistics of Extremes*. <https://doi.org/10.7312/gumb92958>
- Bai, Y., Ma, N., & Meng, S. (2021). Return period evaluation of the largest possible earthquake magnitudes in mainland china based on extreme value theory. *Sensors*, 21(10). <https://doi.org/10.3390/s21103519>
- Northrop, P. J., & Coleman, C. L. (2014). Improved threshold diagnostic plots for extreme value analyses. *Extremes*, 17(2), 289–303. <https://doi.org/10.1007/s10687-014-0183-z>
- Habiburrahman. (2019). Analisis Seismic Hazard Di Batuan Dasar Untuk Kota Makassar Menggunakan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Skripsi. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Muslih Purwana, Y., Harya D.H.I, R., Setiawan, B., & Aulawi, N. (2019). Seismic hazard analysis for Sutami Dam using probabilistic method. *MATEC Web of Conferences*, 276, 05012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927605012>
- Pickands III, J. (1975). Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. *The Annals of Statistics*, 3(1), 119–131.
- Nur, A. M. (2010). GEMPA BUMI, TSUNAMI DAN MITIGASINYA Arief. *Jurnal Geografi*, 7(1).
- Kumoro, R. N., Fattima, A. S., Susatyo, W. H., & Fudholi, D. R. (n.d.). Analysis and Prediction of the Occurrence of an Earthquake Using ARIMA and Statistical Tests.
- Permana, M. A., & Faisal, M. (2023). Uji Performa Prediksi Gempa Bumi di Jawa Timur dengan Artificial Neural Network. *Euler : Jurnal Ilmiah Matematika, Sains Dan Teknologi*, 11(1), 44–54. <https://doi.org/10.34312/euler.v11i1.19291>

- Rahmadani, F. A., & Oktaviana, P. P. (2022). Pemodelan Magnitude Gempa Bumi di Indonesia Menggunakan Generalized Extreme Value (GEV) Berbasis Simulasi Markov Chain Monte Carlo (MCMC) [Institut Teknologi Sepuluh Nopember].
<https://doi.org/10.12962/j23373520.v11i6.92341>
- Gilli, M., & Kellezi, E. (2003). An Application of Extreme Value Theory for Measuring Risk. Elsevier Science.
<https://doi.org/10.1007/s40745-020-00294-w>
- Nurasiah. (2019). Generalized Pareto Untuk Pendugaan Curah Hujan Ekstrim Di 4 Stasiun Bmkg Provinsi Lampung.
- Zakaria, Z., & Sidarto. (2015). Aktifitas Tektonik di Sulawesi dan Sekitarnya Sejak Mesozoikum Hingga Kini Sebagai Akibat Interaksi Aktifitas Tektonik Lempeng Tektonik Utama di Sekitarnya. Agustus, 16(3), 115-127.
- Wahyuni, D., Keumala Intan, P., & Hendrastuti, N. (2020). Analisis Seismotektonik dan Periode Ulang Gempa Bumi pada Wilayah Jawa Timur Menggunakan Relasi Gutenberg-Richter. Jurnal Mahasiswa Matematika ALGEBRA, 1(1), 22-32.
- Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. In Springer.
<https://doi.org/10.1198/tech.2002.s73>
- Scarrott, C., & MacDonald, A. (2012). A review of extreme value threshold estimation and uncertainty quantification. REVSTAT-Statistical Journal, 10(1), 33-60.
- Purbandini, P., Santosa, B. J., & Sunardi, B. (2017). Analisis Bahaya Kegempaan di Wilayah Malang Menggunakan Pendekatan Probabilistik. Jurnal Sains Dan Seni ITS, 6(2).
<https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i2.25221>
- Martins, E. S., & Stedinger, J. R. (2000). Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. Water Resources Research, 36(3), 737-744.
- Malika, R. S. (2014). Declustering Peaks Over Threshold Pada Data Curah Hujan Ekstrim Dependen di Sentra Produksi Padi Jawa Timur. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Munandar, A., Suhardjo, Lestariningsih, D. S., & Hardi, O. S. (2019). Peningkatan Kesiapsiagaan Siswa Sekolah Dasar Dalam Menghadapi Bencana Gempa Bumi dan Kebakaran. Jurnal Solma, 8(2), 210-218.
<https://doi.org/10.29405/solma.v8i2.2892>
ISSN