

PREDIKSI KEKERINGAN EKSTREM DI JAWA TIMUR MENGGUNAKAN GENERALIZED PARETO DISTRIBUTION (GPD)

Muhammad Khoirul Alim

Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

*e-mail: muhammadkhoirul.21051@mhs.unesa.ac.id

Dimas Avian Maulana

Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

Abstrak

Kekeringan ekstrem di Jawa Timur merupakan peristiwa yang berdampak signifikan terhadap sektor pertanian, ketersediaan air, serta kondisi sosial-ekonomi masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kekeringan ekstrem menggunakan *Standardized Precipitation Index* (SPI) dan memprediksi kejadian curah hujan ekstrem menggunakan *Generalized Pareto Distribution* (GPD) berdasarkan return level. Data yang digunakan merupakan data curah hujan bulanan selama periode 1990–2024 dari stasiun pengamatan BMKG di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Analisis SPI dilakukan untuk mengidentifikasi pola kekeringan berdasarkan curah hujan pada periode musim kemarau (April–September). Hasil analisis menunjukkan bahwa kekeringan ekstrem lebih sering terjadi pada akhir musim kemarau (Juli–September) dibandingkan awal musim kemarau (April–Juni), dengan beberapa tahun mengalami SPI dibawah -1.5, yang mengindikasikan kondisi kekeringan ekstrem. Data ekstrem diidentifikasi menggunakan metode *Peaks Over Threshold* (POT) dengan ambang batas sebesar 2.00 mm. Parameter distribusi GPD diestimasi menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), dengan hasil *shape* $\xi = 1.297$ dan *scale* $\sigma = 2.983$. Uji *Kolmogorov-Smirnov* menunjukkan bahwa data ekstrem sesuai dengan distribusi GPD (*p-value* = 0.301). Hasil prediksi return level menunjukkan bahwa dalam periode 1–10 tahun ke depan, curah hujan ekstrem cenderung meningkat seiring bertambahnya periode waktu, sehingga risiko kekeringan ekstrem berkurang. Akurasi prediksi dapat menurun pada periode yang lebih panjang karena ketidakpastian dalam estimasi nilai return level. Hasil penelitian ini memberikan wawasan mengenai pola kekeringan ekstrem di Jawa Timur serta potensi kejadian di masa mendatang. Temuan ini dapat menjadi referensi dalam perencanaan mitigasi kekeringan serta pengelolaan sumber daya air untuk mengurangi dampak negatifnya.

Kata Kunci: Kekeringan ekstrem, *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Generalized Pareto Distribution* (GPD).

Abstract

Extreme drought in East Java is an event that has a significant impact on the agricultural sector, water availability, and socio-economic conditions of the community. This study aims to analyze the characteristics of extreme drought using the *Standardized Precipitation Index* (SPI) and predict extreme rainfall events using the *Generalized Pareto Distribution* (GPD) based on the return level. The data used is monthly rainfall data for the period 1990–2024 from BMKG observation stations in Malang Regency, East Java. SPI analysis was conducted to identify drought patterns based on rainfall in the dry season period (April–September). The results of the analysis show that extreme drought occurs more frequently at the end of the dry season (July–September) than at the beginning of the dry season (April–June), with some years experiencing SPI below -1.5, indicating extreme drought conditions. Extreme data were identified using the *Peaks Over Threshold* (POT) method with a threshold of 2.00 mm. The parameters of the GPD distribution were estimated using *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), with the results of *shape* $\xi = 1.297$ and *scale* $\sigma = 2.983$. The *Kolmogorov-Smirnov* test showed that the extreme data fit the GPD distribution (*p-value* = 0.301). The prediction results show that in the next 1–10 years, extreme rainfall tends to increase as the time period increases, so the risk of extreme drought decreases. Prediction accuracy may decrease in longer periods due to uncertainty in the estimation of the return level value. The results of this study provide insight into the pattern of extreme drought in East Java and the potential for future occurrence. The findings can serve as a reference in drought mitigation planning and water resources management to reduce its negative impacts.

Keywords: Extreme drought, *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Generalized Pareto Distribution* (GPD)

PENDAHULUAN

Kekeringan merupakan salah satu bencana alam paling merusak karena berdampak luas terhadap sektor pertanian, ketersediaan air bersih, ekonomi, dan kehidupan sosial masyarakat. Di Indonesia, kekeringan ekstrem umumnya terjadi selama musim kemarau, terutama pada bulan April hingga September, dengan curah hujan yang jauh di bawah normal. Menurut data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), kondisi ini diukur melalui indikator Hari Tanpa Hujan (HTH), yaitu periode tanpa curah hujan signifikan selama 60 hari atau lebih. Kekeringan ekstrem kian sering terjadi dalam beberapa tahun terakhir seiring perubahan iklim global dan fenomena El Niño, yang turut memperburuk ketidakstabilan curah hujan dan ketersediaan air di berbagai wilayah.

Jawa Timur termasuk wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap kekeringan ekstrem. Data BMKG tahun 2024 menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah di Jawa Timur, seperti Tulungagung, Blitar, dan Banyuwangi, mengalami kekeringan ekstrem dengan intensitas curah hujan sangat rendah (kurang dari 50 mm per bulan) selama musim kemarau. Dampaknya sangat signifikan terhadap kehidupan sosial-ekonomi masyarakat. Hingga September 2024, tercatat 905 desa di 28 kabupaten/kota terdampak kekeringan, memengaruhi lebih dari 1,6 juta jiwa. Oleh karena itu, analisis pola kekeringan dan prediksi kejadiannya menjadi sangat penting untuk mendukung perencanaan mitigasi yang efektif.

Penelitian ini menggabungkan dua pendekatan statistik, yaitu analisis *Standardized Precipitation Index* (SPI) untuk mengidentifikasi karakteristik kekeringan berdasarkan data curah hujan, serta pendekatan *Generalized Pareto Distribution* (GPD) dalam kerangka *Extreme Value Theory* (EVT) untuk memodelkan dan memprediksi kejadian ekstrem menggunakan metode *Peaks Over Threshold* (POT). SPI telah ditetapkan oleh *World Meteorological Organization* (WMO) sebagai metode standar untuk mendeteksi kekeringan meteorologis, sedangkan GPD digunakan untuk memodelkan data ekstrem yang melampaui ambang batas tertentu. Estimasi parameter GPD dilakukan menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), dan validasi model dilakukan dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* serta

evaluasi akurasi prediksi dengan *Root Mean Square Error* (RMSE).

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah tingginya ketidakpastian prediksi kekeringan ekstrem dengan metode konvensional. SPI seringkali tidak cukup menangkap kejadian ekstrem yang berada di ekor distribusi data. Oleh karena itu, pendekatan EVT menjadi solusi yang lebih tepat untuk memahami dinamika ekstrem. Melalui pendekatan ini, model dapat memberikan estimasi return level kekeringan ekstrem pada periode ulang tertentu, yang sangat relevan untuk mendukung strategi mitigasi bencana jangka panjang di Jawa Timur.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik kekeringan ekstrem di Jawa Timur berdasarkan data historis curah hujan menggunakan SPI, serta memprediksi kekeringan ekstrem berdasarkan return level menggunakan pendekatan GPD. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan model prediktif kekeringan dan menjadi acuan bagi instansi terkait, seperti BMKG dan BPBD, dalam menyusun kebijakan mitigasi bencana berbasis data statistik.

KAJIAN TEORI

Kekeringan

Kekeringan adalah kondisi kekurangan curah hujan yang berlangsung dalam periode tertentu, berdampak pada ketersediaan air dan sektor penting lainnya. Berdasarkan BMKG (2024), kekeringan terbagi menjadi empat jenis:

1. Meteorologis, akibat curah hujan jauh di bawah normal.
2. Hidrologis, karena menurunnya debit sungai dan air tanah;
3. Agronomis, yang berdampak pada pertumbuhan tanaman; dan
4. Sosial-ekonomi, yang memengaruhi kehidupan masyarakat secara luas.

Penelitian ini fokus pada kekeringan meteorologis yang dianalisis menggunakan data curah hujan musiman di Jawa Timur.

Standardized Precipitation Index (SPI)

Langkah perhitungan SPI sebagai berikut:

1. Menentukan fungsi *Probability Density Function* (PDF) yang sesuai yaitu distribusi Gamma, didefinisikan sebagai:

$$g(x | a, \beta) = \frac{x^{a-1} e^{-x/\beta}}{\beta^a \Gamma(a)}, x > 0 \quad (1)$$

di mana:

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

2. Mengestimasi parameter α (*shape*) dan β (*scale*) distribusi Gamma menggunakan MLE.
3. Menghitung fungsi distribusi kumulatif (CDF) Gamma, didefinisikan sebagai:

$$G(x) = \frac{\gamma(a, \frac{x}{\beta})}{\Gamma(a)} \quad (3)$$

di mana:

$$\gamma(a, \frac{x}{\beta}) = \int_0^{\frac{x}{\beta}} t^{a-1} e^{-t} dt \quad (4)$$

4. Mengkonversi CDF ke distribusi normal standar $H(x)$

di mana:

- a. Jika tidak ada nilai nol dalam dataset curah hujan, maka:

$$H(x) = G(x)$$

- b. Jika ada nilai nol dalam dataset curah hujan, maka:

$$H(x) = q + (1-q)G(x)$$

dengan q adalah probabilitas kejadian tanpa hujan (jumlah bulan dengan curah hujan nol dibagi total bulan).

5. Menentukan nilai SPI sebagai:

$$SPI = \Phi^{-1}(H(x)) \quad (5)$$

dengan Φ^{-1} adalah fungsi *inverse* normal standar dan $H(x)$ adalah hasil transformasi CDF gamma ke distribusi normal standar.

6. Interpretasi SPI:

Tabel I. Tabel Klasifikasi SPI

Range SPI	Kategori
$SPI \leq -1.50$	Kekeringan Ekstrem
$-1.49 \leq SPI \leq -1.00$	Kekeringan Sedang
$-0.99 \leq SPI \leq 0.99$	Normal
$1.00 \leq SPI \leq 1.49$	Kebasahan Sedang
$SPI \geq 1.50$	Kebasahan Ekstrem

Generalized Pareto Distribution (GPD)

GPD adalah distribusi yang digunakan dalam analisis nilai ekstrem dengan pendekatan *Peaks Over Threshold* (POT). GPD memodelkan data yang melebihi ambang batas tertentu (*threshold*).

Fungsi distribusi kumulatif (CDF) GPD didefinisikan sebagai:

$$F(y_i; \xi, \sigma) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi y_i}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, & \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{y_i}{\sigma}\right), & \xi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Fungsi kepadatan peluang (PDF) GPD, didefinisikan sebagai:

$$F(y_i; \xi, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} - \left(1 + \frac{\xi y_i}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}-1}, & \xi \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{y_i}{\sigma}\right), & \xi = 0 \end{cases} \quad (7)$$

di mana $y > 0$, dan $1 + \frac{\xi y_i}{\sigma} > 0$, sedangkan ξ adalah parameter *shape* untuk bentuk ekor distribusi, dan σ adalah parameter *scale* untuk menentukan penyebaran data ekstrem.

Pada pendekatan POT, terutama dalam penentuan *threshold* dan data ekstrem, digunakan metode persentase 10% karena menurut (Guttman, 1999) menyatakan bahwa, 10% data teratas atau terbawah dapat merepresentasikan kejadian ekstrem secara statistik. Adapun langkah penentuan *threshold* dan data ekstrem sebagai berikut:

- a. Mengurutkan data mulai yang terbesar hingga terkecil.
- b. Menghitung jumlah data ekstrem atau k .

$$k = 10\% \times N$$

di mana k adalah jumlah data ekstrem dan N merupakan jumlah sampel data, sehingga bisa disimpulkan data yang ada di urutan 1 hingga k adalah nilai ekstrem.

- c. Menentukan nilai *threshold* (u)

$$u = k + 1$$

di mana nilai *threshold* didefinisikan sebagai nilai pada urutan $ke-(k + 1)$

Pada penelitian ini mendefinisikan data ekstrem sebagai 10% curah hujan minimum, sehingga untuk memenuhi asumsi POT, data tersebut dikalikan -1 agar nilai ekstrem berada di bagian atas distribusi dan tetap lebih besar dari *threshold* negatif. Setelah *threshold* ditentukan, data dikembalikan ke bentuk positif untuk proses analisis.

Maximum Likelihood Estimation (MLE)

MLE digunakan untuk mengestimasi parameter GPD berdasarkan data *excess*. Fungsi *likelihood* dibentuk dari data ekstrem dan dimaksimalkan untuk memperoleh nilai estimasi terbaik dari parameter ξ dan σ . Fungsi *log-likelihood* GPD didefinisikan sebagai:

$$\ln L(\xi, \sigma) = -n \ln \sigma - \left(\frac{1}{\xi} + 1\right) \sum_{i=1}^n \ln \left(1 + \frac{\xi y_i}{\sigma}\right) \quad (8)$$

di mana hasil estimasi parameter ξ dan σ yaitu:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \left(1 + \frac{\xi y_i}{\sigma} \right)}{(1+\xi) \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma + \xi y_i}} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{(1+\xi) \sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (10)$$

Persamaan tersebut tidak menghasilkan persamaan yang *closed-form* sehingga diperlukan metode tambahan seperti metode *Newton-Raphson* di mana iterasi dilakukan hingga konvergensi tercapai yaitu jika $|\theta_{n+1} - \theta_n| < \epsilon$ di mana $\epsilon = 10^{-6}$

Uji Kolmogorov-Smirnov

Uji KS digunakan untuk menguji kesesuaian antara distribusi empiris dan distribusi teoritis, di mana hipotesis didefinisikan sebagai:

H_0 = Data mengikuti distribusi teoritis

H_1 = Data tidak mengikuti distribusi teoritis

dengan menetapkan taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ di mana jika nilai $p\text{-value} \geq \alpha$, maka gagal menolak H_0 artinya data aktual mengikuti distribusi teoritis.

Return Level

Return level menggambarkan nilai curah hujan ekstrem yang diperkirakan terjadi sekali dalam periode tertentu.

Rumus *return level* untuk periode ulang T tahun:

$$z(T) = u + \left(\frac{\sigma}{\xi} \right) [(T \zeta u)^{\xi} - 1] \quad (11)$$

dengan ζ_u adalah proporsi data ekstrem per tahun, didefinisikan sebagai jumlah data yang melebihi *threshold* dibagi jumlah total data.

Evaluasi Model

Validasi model GPD dilakukan dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) untuk mengevaluasi keakuratan hasil prediksi *return level* dari model GPD terhadap data aktual curah hujan ekstrem. Rumus MAPE didefinisikan sebagai:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - z(T)_i}{x_i} \right| \quad (12)$$

di mana x_i = Nilai curah hujan minimum (mm), $z(T)_i$ = nilai prediksi *return level* (mm), dan n = jumlah observasi.

Adapun *range* nilai MAPE dapat diklasifikasikan pada tabel berikut:

Tabel 2. *Range* Nilai MAPE

Range MAPE	Interpretasi
< 10%	Sangat akurat
10% - 20%	Baik
20% - 50%	Cukup
> 50%	Kurang akurat

Nilai MAPE yang kecil menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi yang baik.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif studi kasus. Tujuan utamanya adalah menganalisis karakteristik kekeringan berdasarkan data historis serta memprediksi kejadian kekeringan ekstrem menggunakan model statistik. Objek yang dikaji dalam penelitian ini adalah data curah hujan bulanan di wilayah Kabupaten Malang, Jawa Timur, selama periode musim kemarau (April–September) dalam rentang waktu tahun 1990 hingga 2024. Kabupaten Malang dipilih sebagai lokasi penelitian karena memiliki data lengkap, tingkat kekeringan yang tinggi, dan letaknya strategis mewakili daerah rawan kekeringan di Jawa Timur.

Data yang digunakan bersumber dari stasiun pengamatan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Data dikumpulkan dalam bentuk deret waktu curah hujan bulanan yang kemudian dijumlahkan dalam interval tiga bulan (SPI-3) untuk dianalisis karakteristik kekeringannya. Nilai SPI dihitung menggunakan distribusi gamma yang ditransformasikan ke distribusi normal standar. Nilai indeks SPI yang diperoleh digunakan untuk mengidentifikasi periode dan tingkat keparahan kekeringan, khususnya pada awal dan akhir musim kemarau.

Analisis data ekstrem dilakukan dengan pendekatan *Peaks Over Threshold* (POT), di mana data curah hujan yang berada di bawah *threshold* (ambang batas) tertentu diidentifikasi sebagai data ekstrem. Ambang batas ditentukan berdasarkan metode persentase 10% dari data curah hujan. Data yang melebihi ambang batas ini kemudian dimodelkan menggunakan distribusi *Generalized Pareto Distribution* (GPD). Estimasi parameter distribusi GPD dilakukan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Estimasi ini menghasilkan nilai parameter *shape* (ξ) dan *scale* (σ) yang menggambarkan bentuk serta sebaran data ekstrem.

Validasi model dilakukan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* (KS) untuk menguji kesesuaian antara distribusi teoretis dan data aktual. Setelah model dinyatakan sesuai, prediksi dilakukan dengan menghitung nilai *return level* untuk periode ulang 1

hingga 10 tahun ke depan. Hasil prediksi ini kemudian dibandingkan dengan data aktual periode uji (tahun 2015–2024) untuk menghitung nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), yang menunjukkan seberapa akurat model dalam memprediksi kejadian ekstrem di masa mendatang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Statistik Deskriptif

Hasil analisis statistik deskriptif disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. Statistik Deskriptif Curah Hujan (mm) Periode 1990 - 2024

Statistik	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep
<i>Mean</i>	180.65	80.59	47.21	20.34	25.83	21.26
<i>Std</i>	108.05	75.70	63.75	29.34	25.83	21.26
<i>Min</i>	32	3	0	0.90	1	1
<i>Max</i>	529	341	308	121	93	73

Hasil analisis statistik deskriptif menunjukkan bahwa curah hujan selama musim kemarau di periode 1990–2024 memiliki karakteristik yang bervariasi antar bulan. Bulan April memiliki rata-rata curah hujan tertinggi (180,65 mm) dan penyebaran terbesar, sementara bulan Juli hingga September memiliki curah hujan yang cenderung rendah dan stabil (rata-rata sekitar 19–21 mm). Nilai minimum mendekati nol pada bulan-bulan kering tersebut mengindikasikan potensi kekeringan ekstrem. Sebaliknya, nilai maksimum yang tinggi di bulan April (hingga 529 mm) mencerminkan variabilitas hujan yang besar di awal musim kemarau. Hasil ini menjadi dasar dalam analisis SPI dan prediksi return level menggunakan GPD.

Analisis Karakteristik Kekeringan Ekstrem menggunakan *Standardized Precipitation Index* (SPI)

Perhitungan nilai SPI dilakukan berdasarkan data curah hujan yang diakumulasi setiap tiga bulan, yaitu periode April–Juni dan Juli–September untuk setiap tahun.

1. Estimasi parameter Distribusi Gamma

Parameter α dan β diperoleh melalui perhitungan menggunakan python untuk kedua periode, disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4. Hasil Estimasi Parameter Periode Apr-Jun

Parameter	Nilai Estimasi
<i>Shape (α)</i>	4.618

<i>Scale (β)</i>	66.795
-----------------------------------	--------

Tabel 5. Hasil Estimasi Parameter Periode Jul-Sep

Parameter	Nilai Estimasi
<i>Shape (α)</i>	1.118
<i>Scale (β)</i>	55.068

Adapun hasil perhitungan dan penentuan SPI yang memenuhi kriteria sebagai kekeringan sedang dan kekeringan ekstrem untuk kedua periode disajikan pada tabel berikut:

Tabel 6. Hasil Perhitungan SPI Periode Apr-Jun

Tahun	Curah Hujan (mm)	CDF	H(x)	SPI
1997	144	0.099	0.099	-1.29
2003	155	0.122	0.122	-1.16
2004	150	0.111	0.111	-1.22
2008	131	0.074	0.074	-1.45
2012	107	0.038	0.038	-1.77
2017	105.4	0.036	0.036	-1.79
2018	156.1	0.125	0.125	-1.15

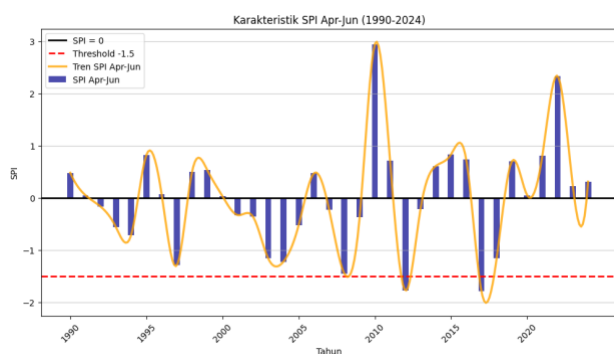
Tabel 7. Hasil Perhitungan SPI Periode Jul-Sep

Tahun	Curah Hujan (mm)	CDF	H(x)	SPI
1993	5.10	0.063	0.063	-1.53
1997	4.80	0.059	0.059	-1.56
2002	4.90	0.060	0.060	-1.55
2011	9.50	0.121	0.121	-1.17
2012	9.00	0.115	0.115	-1.20
2013	9.60	0.123	0.123	-1.16
2023	11.80	0.151	0.151	-1.03

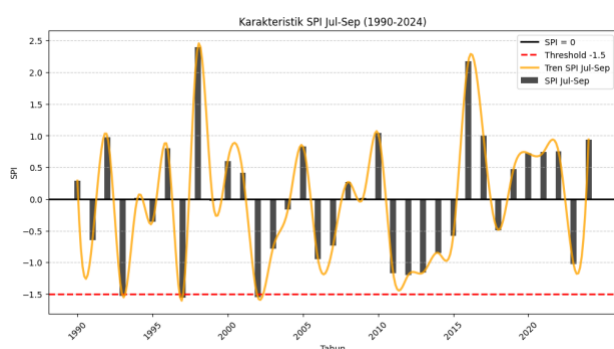
Berdasarkan kedua tabel tersebut, dapat diketahui periode Apr-Jun mengalami beberapa kejadian kekeringan ekstrem dengan $SPI < -1.5$, seperti pada tahun 2012 dan 2017 yang masing-masing memiliki SPI -1.77 dan -1.79. Selain itu, tahun-tahun seperti 1997, 2003, 2004, 2008, dan 2018 mengalami kekeringan dengan SPI berkisar antara -1.15 hingga -1.45, yang tergolong sebagai kekeringan sedang.

Pada periode Jul-Sep, pola kekeringan yang lebih ekstrem lebih sering terjadi dibandingkan dengan periode Apr-Jun. Kekeringan ekstrem tercatat pada tahun 1993, 1997, dan 2002, dengan nilai SPI masing-masing -1.53, -1.56, dan -1.55, mengindikasikan defisit curah hujan yang signifikan pada akhir musim kemarau di tahun-tahun tersebut. Selain itu, tahun 2011, 2013, dan 2023 juga mengalami kekeringan dengan nilai SPI antara -1.03 hingga -1.20, yang termasuk dalam kategori kekeringan sedang.

Tren kekeringan berdasarkan analisis SPI yang lebih rendah pada periode Jul-Sep dibandingkan Apr-Jun terlihat semakin jelas pada Gambar 1. dan Gambar 2. berikut:



Gambar 1. Karakteristik Kekeringan berdasarkan SPI Apr-Jun



Gambar 2. Karakteristik Kekeringan berdasarkan SPI Jul-Sep

Berdasarkan kedua grafik tersebut, kekeringan di Jawa Timur cenderung lebih sering pada akhir musim kemarau (Jul-Sep) dibandingkan awal musim kemarau (Apr-Jun). Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya kejadian SPI dengan nilai negatif ekstrem pada periode tersebut. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan meningkatnya defisit air tanah akibat penurunan curah hujan secara bertahap sejak awal musim kemarau. Akumulasi defisit tersebut menyebabkan kondisi kekeringan yang lebih parah di akhir musim kemarau, terutama pada tahun-tahun tertentu yang mengalami kekeringan ekstrem.

Hasil analisis ini menegaskan bahwa pemahaman pola kekeringan melalui SPI sangat penting dalam perencanaan sumber daya air, terutama dalam upaya mitigasi kekeringan dan penyesuaian strategi adaptasi di sektor pertanian serta pengelolaan air domestik. Kejadian kekeringan yang berulang dengan pola yang teridentifikasi juga dapat menjadi dasar dalam analisis prediksi jangka panjang, misalnya dengan distribusi GPD yang digunakan dalam penelitian ini.

Prediksi Kekeringan Ekstrem menggunakan *Generalized Pareto Distribution (GPD)* berdasarkan *Return Level*

1. Pembagian Data Penelitian

Data penelitian untuk prediksi dibagi menjadi 2 bagian yaitu 70% sebagai data latih sebanyak 150 data atau 25 tahun (1990 – 2014) dan 30% data uji sebanyak 60 data atau 10 tahun (2015 – 2024). Data latih digunakan untuk menyusun model distribusi ekstrem, dan data uji digunakan untuk mengevaluasi akurasi hasil prediksi model.

2. Penentuan *Threshold* dan Jumlah Data Ekstrem

Jumlah data ekstrem (k) ditentukan menggunakan metode persentase 10%, di mana jumlah total data $N = 150$, diperoleh ($k = 15$) melalui perhitungan berikut:

$$k = 100\% \times 150 = 15$$

Berdasarkan jumlah data ekstrem tersebut, *threshold* diperoleh dengan mengurutkan data secara keseluruhan dari yang terbesar ke terkecil (setelah dikalikan -1), lalu mengambil nilai ke- $(k + 1)$ yaitu data ke-16 yaitu ($u = -2.00$) atau ($u = 2.00$) dalam skala asli. Seluruh data yang lebih besar dari *threshold* ini dikategorikan sebagai data ekstrem dan digunakan dalam pemodelan GPD.

3. Penentuan Data Ekstrem

Data ekstrem ditentukan berdasarkan nilai curah hujan yang lebih besar dari *threshold* yang telah dihitung sebelumnya, yaitu $u = -2.00$ mm. Data curah hujan yang telah diidentifikasi sebagai nilai ekstrem disajikan pada tabel berikut:

Tabel 8. Data Ekstrem

Tahun	Data Ekstrem (mm)
1991	0.0
1991	1.1
1991	1.4
1993	1.0
1993	1.7
1994	1.3
1995	1.34
1997	0.9
1997	1.8
2002	1.7
2002	1.0
2004	1.3
2007	1.0
2008	1.8
2011	1.5

4. Pemodelan *Generalized Pareto Distribution (GPD)*

a. Fungsi Distribusi GPD

Fungsi distribusi kumulatif (CDF) dari GPD digunakan dalam analisis ini karena menunjukkan probabilitas kumulatif yang diperlukan untuk menghitung *return level*. Oleh karena itu, CDF digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *return level* untuk memperkirakan probabilitas terjadinya curah hujan ekstrem di masa mendatang.

b. Estimasi Parameter dengan MLE

Estimasi parameter dihitung secara numerik menggunakan Python dan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil Estimasi Parameter GPD

Parameter	Nilai
Shape (ξ)	1.889
Scale (σ)	3.401

Hasil estimasi parameter *shape* ($\xi = 1.889$) menunjukkan bahwa distribusi data ekstrem bersifat *heavy-tail*, yang berarti curah hujan ekstrem minimum cenderung sering terjadi dengan variasi yang tinggi. Nilai *scale* ($\sigma = 3.401$) menggambarkan sebaran data ekstrem yang cukup besar. Pemilihan *threshold* sebesar 2 mm berperan dalam menentukan data ekstrem yang dianalisis melalui pendekatan POT. Secara keseluruhan, parameter GPD menunjukkan bahwa curah hujan minimum di Jawa Timur memiliki potensi kejadian ekstrem yang signifikan dan bervariasi.

Berdasarkan parameter GPD yang telah diestimasi, diperoleh persamaan CDF dari GPD berikut:

$$F(y) = 1 - \left(1 + \frac{1.889(y)}{3.401}\right)^{-\frac{1}{1.889}} \quad (13)$$

5. Uji Kolmogorov-Smirnov (KS)

Uji KS digunakan untuk menguji apakah data ekstrem curah hujan mengikuti distribusi GPD. Hasil uji KS menggunakan Python disajikan pada tabel berikut:

Tabel 10. Hasil Uji KS

Statistik	Nilai
KS Statistik	0.240
P-value	0.301

Hasil uji KS pada tabel tersebut menunjukkan nilai statistik sebesar 0,240 dengan p-value 0,301, yang lebih besar dari taraf signifikansi 0,05. Ini berarti tidak ada cukup bukti untuk menolak hipotesis nol (H_0)

sehingga distribusi GPD dapat diterima sebagai model yang sesuai untuk data ekstrem curah hujan. Oleh karena itu, distribusi GPD dianggap tepat untuk menggambarkan fenomena curah hujan ekstrem di Jawa Timur dan dapat digunakan prediksi *return level*.

6. Prediksi *Return Level* Periode 1 – 10 Tahun

Prediksi *return level* digunakan untuk memperkirakan curah hujan ekstrem yang kemungkinan terjadi sekali dalam periode tertentu, yaitu antara 1 hingga 10 tahun. Perhitungannya dilakukan menggunakan distribusi GPD berdasarkan parameter yang diperoleh dari estimasi MLE. Jika diketahui proporsi data ekstrem ($\zeta_u = 15 / 150 = 0.1$), maka diperoleh persamaan *return level* sebagai berikut:

$$z(T) = 2.00 + \left(\frac{3.401}{1.889}\right) [(T \cdot 0.1)^{1.889} - 1] \quad (14)$$

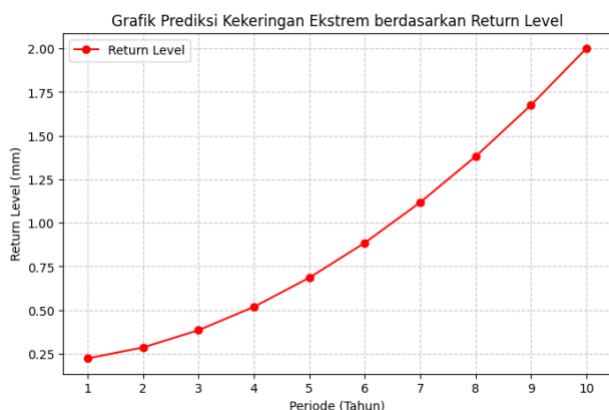
Adapun hasil prediksi *return level* untuk periode 1 hingga 10 tahun dihitung menggunakan python disajikan pada tabel berikut:

Tabel 11. Hasil Prediksi *Return Level* 1 – 10 Tahun

Periode (Tahun)	Return Level (mm)
1	0.223224
2	0.286036
3	0.385088
4	0.518734
5	0.685875
6	0.885685
7	1.117509
8	1.380801
9	1.675099
10	2.000000

Hasil prediksi menunjukkan bahwa nilai *return level* meningkat seiring bertambahnya periode waktu. Pada periode 1 tahun, nilainya sebesar 0,223 mm, dan meningkat hingga 2,000 mm pada periode 10 tahun. Selama periode 1 hingga 9 tahun, nilai *return level* masih berada di bawah *threshold* 2,00 mm, yang mengindikasikan bahwa curah hujan ekstrem dengan intensitas sangat rendah masih mungkin terjadi. Pada tahun ke-10, nilai *return level* mencapai ambang ekstrem, menunjukkan bahwa kejadian kering ekstrem masih berpotensi terjadi, meskipun semakin jarang seiring bertambahnya periode ulang.

Tren peningkatan prediksi *return level* ini juga dapat diamati pada gambar berikut:



Gambar tersebut menunjukkan grafik hubungan antara periode ulang dan nilai *return level*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang periode waktu yang diprediksi, nilai *return level* juga semakin besar. Prediksi untuk periode yang lebih panjang memiliki tingkat ketidakpastian lebih tinggi, karena kejadian ekstrem yang sangat jarang terjadi lebih sulit diperkirakan secara akurat. Akibatnya, akurasi model dalam memprediksi curah hujan ekstrem cenderung menurun seiring bertambahnya periode waktu. Hasil prediksi ini memiliki relevansi penting dalam mitigasi risiko bencana kekeringan oleh lembaga terkait, karena dapat memberikan gambaran tentang kemungkinan terjadinya kekeringan ekstrem di masa mendatang.

7. Evaluasi Hasil Prediksi menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE)

Akurasi model GPD dalam memprediksi *return level* dievaluasi menggunakan MAPE, yaitu metrik yang mengukur rata-rata kesalahan antara hasil prediksi dan data aktual curah hujan minimum periode 2015–2024. Nilai kesalahan dinyatakan dalam persentase terhadap data aktual. Perbandingan antara hasil prediksi *return level* dan data aktual disajikan pada tabel berikut:

Tabel 12. Perbandingan Nilai Prediksi dan Data Aktual

Periode (Tahun)	Nilai Aktual x_i (mm)	Return Level (mm)
1	5.0	0.223224
2	5.0	0.286036
3	5.0	0.385088
4	3.7	0.518734
5	3.4	0.685875
6	3.2	0.885685
7	3.2	1.117509
8	3.2	1.380801
9	2.6	1.675099
10	2.6	2.000000

Nilai MAPE dihitung untuk mengukur seberapa besar tingkat kesalahan rata-rata prediksi dalam bentuk persentase. Hasil perhitungan MAPE menggunakan python disajikan pada tabel berikut:

Tabel 13. Nilai MAPE

MAPE (%)
70.08

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai MAPE total mencapai 70,08%, yang tergolong tinggi dan mengindikasikan adanya selisih cukup besar antara hasil prediksi dan data aktual. Namun, karena data aktual merupakan curah hujan minimum yang rata-rata berada di bawah 5 mm, selisih kecil saja sudah menghasilkan persentase kesalahan yang besar. Oleh karena itu, tingginya nilai MAPE tidak sepenuhnya mencerminkan bahwa model gagal, melainkan menunjukkan bahwa karakteristik data yang sangat kecil memengaruhi nilai kesalahan secara signifikan.

Beberapa faktor yang kemungkinan menyebabkan tingginya nilai MAPE antara lain:

- Data aktual berada pada rentang yang sangat kecil (2–5 mm), sehingga sedikit perbedaan saja menghasilkan persentase error yang besar.
- Nilai prediksi *return level* dari GPD cenderung lebih rendah pada periode pendek dan baru mendekati data aktual pada periode yang lebih panjang.
- Data ekstrem kekeringan memiliki sifat yang tidak stabil dari tahun ke tahun akibat pengaruh variabilitas iklim global, sehingga sulit dimodelkan secara akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Matematika FMIPA Universitas Negeri Surabaya atas dukungan dalam proses penelitian dan publikasi karya ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada BMKG dan BPBD yang telah menyediakan data curah hujan yang sangat berguna dalam mendukung kelancaran dan keberhasilan penelitian ini.

PENUTUP

SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk memahami karakteristik kekeringan di Jawa Timur menggunakan SPI serta memprediksi kekeringan ekstrem dengan pendekatan GPD berdasarkan *return*

level. Hasil analisis SPI menunjukkan bahwa kekeringan cenderung lebih parah pada akhir musim kemarau, khususnya pada bulan Juli hingga September, dengan beberapa tahun seperti 1993, 1997, dan 2002 tercatat mengalami kekeringan ekstrem dengan nilai SPI di bawah -1,5.

Pemodelan menggunakan GPD menunjukkan bahwa data curah hujan ekstrem memiliki sebaran *heavy-tail*, ditandai dengan nilai parameter *shape* sebesar 1,889. Ini mengindikasikan bahwa meskipun kejadian kekeringan ekstrem jarang terjadi, probabilitas terjadinya tetap signifikan dan tidak bisa diabaikan. Nilai *return level* yang meningkat seiring bertambahnya periode waktu menunjukkan bahwa risiko kekeringan ekstrem tetap ada dalam jangka panjang. Prediksi *return level* selama 1 hingga 10 tahun ke depan menunjukkan bahwa curah hujan sangat rendah bahkan mendekati kondisi hari tanpa hujan (HTH) masih mungkin terjadi, karena nilai prediksi berada di bawah atau sama dengan *threshold* yang ditentukan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan gambaran tentang pola dan potensi kekeringan ekstrem di masa mendatang, terutama pada akhir musim kemarau. Temuan ini menekankan pentingnya upaya mitigasi dan kebijakan adaptif dalam pengelolaan sumber daya air di Jawa Timur.

SARAN

Penelitian ini masih dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi prediksi kejadian ekstrem. Salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah dengan memilih ambang batas (*threshold*) yang lebih optimal dalam pendekatan POT sehingga dapat memengaruhi hasil estimasi parameter GPD serta meningkatkan akurasi hasil prediksi *return level*. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan faktor-faktor klimatologis lain, seperti suhu dan kelembapan dalam prediksi kekeringan. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mencakup analisis geospasial untuk mengetahui sebaran wilayah terdampak kekeringan ekstrem, serta memperkirakan potensi kerugian ekonomi akibat kejadian tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Apriani, F., Setianingsih, Y. D., Arum, U. M. P., Susanti, K. A.,
Wicaksono, S. I., dan Faruk, A., 2014. Analisis curah hujan sebagai upaya meminimalisasi dampak

kekeringan di kabupaten gunung kidul tahun 2014. Khazanah: Jurnal Mahasiswa, (hal. 13–22).

- Beirlant, J., Goegebeur, Y., Segers, J., dan Teugels, J. L., 2006. Statistics of extremes: theory and applications. John Wiley & Sons.
- Bendi, M. I., dan Kaesmetan, Y. R., 2024. Informasi peringatan dini potensi kekeringan meteorologis provinsi nusa tenggara timur. Jurnal Ilmu Komputer dan Sistem Informasi (JIKOMSI), 7(1), 46–54.
- BMKG, I., 2024. Prediksi musim - iklim - bmkg. URL <https://www.bmkg.go.id/iklim/prediksi-musim>
- BMKG, K., 2019. Potensi kekeringan meteorologis di beberapa wilayah di indonesia - klimatologi - bmkg. URL <https://www.bmkg.go.id/iklim/potensi-kekeringan-meteorologis-di-beberapa-wilayah-di-indon>
- BPBD, D. I., 2023. Kekeringan. URL <https://bpbd.jogjapro.go.id/kekeringan-1#:~:text=Kekeringan%20adalah%20salah%20satu%20bencana%20alam%20yang%20terjadi,la ma%20hingga%20musim%20hujan%20tiba%20dan%20berdampak%20luas.>
- Chaves-Dermoulin, V., dan Embrechts, P., 2002. Smooth external models for operational risk. Financial Valuation and Risk Management Working Paper Series, 135.
- Coles, S., 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer.
- Davison, A. C., dan Hinkley, D. V., 1997. Bootstrap Methods and Their Applications. Cambridge University Press.
- Efron, B., dan Tibshirani, R. J., 1993. An Introduction to the Bootstrap. Chapman & Hall/CRC.
- Falk, M., , 2019. Multivariate extreme value theory and D-norms. Springer.
- Firdaus, D. N., 2023. Strategi Badan penanggulangan bencana Daerah Dalam Mitigasi Bencana Alam Kekeringan Di Kabupaten Sumenep Provinsi Jawa Timur. Disertasi, IPDN.
- Guttman, N. B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 35(2), 311–322.
- Harijanto, F. D., Kuntjoro, K., Saptarita, S., dan Aziz, S. K., 2012. Analisis pola hujan dan musim di jawa timur sebagai Jurnal Aplikasi Teknik Sipil, 10(2), 95–104.
- Inas, R., 2017. Pemetaan Risiko Kekeringan Di Nusa Tenggara Timur Berdasarkan Prediksi Return Period. Disertasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kotz, S., dan Nadarajah, S., 2000. Extreme value

- distributions: theory and applications. world scientific.
- Kuswanto, H., Ramadhan, E., dan Rahadiyuza, D., 2018. Active zones detection of sea surface temperature for drought events in east nusa tenggara indonesia using bootstrap. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(10), 3542–3548. Publisher Copyright: © 2006–2018 Asian Research Publishing Network (ARPN).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., dan Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Dalam *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, (hal. 179–183). American Meteorological Society.
- Michailidis, G., dan Stoev, S., 2007. Extreme value theory: An introduction.
- Nursamsiah, N., Sugianto, D. N., dan Suprijanto, J., 2017. Analisis data ekstrim tinggi gelombang di perairan utara semarang menggunakan generalized pareto distribution.
- Parkhurst, H., 2023. Analisis karakteristik kekeringan di nusa tenggara menggunakan pengukuran return period. *Journal Economic Excellence Ibnu Sina*, 1(4), 325–335.
- Purnomo, S., Halik, G., Dhokhikah, Y., Absari, R. U., dan Salsa, A., 2021. Penilaian bencana kekeringan dan strategi penyediaan air bersih di wilayah utara kabupaten lumajang. *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(2), 92–103.
- Rinaldi, A., 2016. Sebaran generalized extreme value (gev) dan generalized pareto (gp) untuk pendugaan curah hujan ekstrim di wilayah dki jakarta. *Al-Jabar: Jurnal Pendidikan Matematika*, 7(1), 75–84.
- Sari, Y., 2013. Estimasi parameter generalized pareto distribution pada kasus identifikasi perubahan iklim di sentra produksi padi jawa timur. Skripsi: Jurusan Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sholichah, I., Kuswanto, H., dan Sutijo, B., 2015. Studi simulasi parameter distribusi generalized extreme value (gev) dengan pendekatan l-moments dan mle. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains (SNIPS)*, (hal.177–180).
- Singirankabo, E., dan Iyamuremye, E., 2022. Modelling extreme rainfall events in kigali city using generalized pareto distribution. *Meteorological Applications*, 29(4), e2076.
- Smith, R. L., 1990. Extreme value theory. *Handbook of applicable mathematics*, 7(437–471), 18.
- Wahyudi, dan Sutikno, 2016. Identifikasi curah hujan ekstrem di kabupaten ngawi menggunakan generalized extreme value dan generalized pareto distribution.
- Wilks, D. S., 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Oxford, UK: Academic Press, 3rd ed.
- Yuliatin, I. L., 2017. *Pemodelan Kekeringan di Wilayah Nusa Tenggara Timur (NTT) dengan Metode Statistical Downscaling Pra-Pemroses PCA*. Disertasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.