

# Analisis Ambang Batas Curah Hujan Dengan Pendekatan Statistik Median di Daerah Rawan Longsor Samigaluh, Kulon Progo

Yudha Tintana Marganiswati dkk.



Volume 13, Issue 3, Pages 403–410, Dec. 2025













Diterima 19 Oktober 2025, Direvisi 29 November 2025, Disetujui 1 Desember 2025, Diterbitkan 3 Desember 2025

To Cite this Article : Y. T. Marganiswati dkk., “Analisis Ambang Batas Curah Hujan Dengan Pendekatan Statistik Median di Daerah Rawan Longsor Samigaluh, Kulon Progo”, *Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol.*, vol. 13, no. 3, pp. 403–410, 2025, <https://doi.org/10.37905/euler.v13i3.34962>

© 2025 by author(s)

## JOURNAL INFO • EULER : JURNAL ILMIAH MATEMATIKA, SAINS DAN TEKNOLOGI



	Homepage	:	<a href="http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/index">http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/index</a>
	Journal Abbreviation	:	Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol.
	Frequency	:	Three times a year
	Publication Language	:	English (preferable), Indonesia
	DOI	:	<a href="https://doi.org/10.37905/euler">https://doi.org/10.37905/euler</a>
	Online ISSN	:	2776-3706
	License	:	Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
	Publisher	:	Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo
	Country	:	Indonesia
	OAI Address	:	<a href="http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/oai">http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/oai</a>
	Google Scholar ID	:	QF_r-gAAAAJ
	Email	:	<a href="mailto:euler@ung.ac.id">euler@ung.ac.id</a>

## JAMBURA JOURNAL • FIND OUR OTHER JOURNALS



Jambura Journal of Biomathematics



Jambura Journal of Mathematics



Jambura Journal of Mathematics Education



Jambura Journal of Probability and Statistics

# Analisis Ambang Batas Curah Hujan Dengan Pendekatan Statistik Median di Daerah Rawan Longsor Samigaluh, Kulon Progo

Yudha Tintana Marganiswati<sup>1,2</sup>, Yohana Noradika Maharani<sup>2,\*</sup>, Tedy Agung Cahyadi<sup>2</sup>, Johan Danu Prasetya<sup>2</sup>, Widyawanto Prastistho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Stasiun Klimatologi Daerah Istimewa Yogyakarta, Yogyakarta 55285, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Magister Manajemen Bencana, UPN Veteran Yogyakarta, Yogyakarta 55283, Indonesia

## ARTICLE HISTORY

Diterima 19 Oktober 2025  
Direvisi 29 November 2025  
Disetujui 1 Desember 2025  
Diterbitkan 3 Desember 2025

## KATA KUNCI

Ambang batas curah hujan  
Longsor  
Median  
Proportion Correct  
Samigaluh

## KEYWORDS

Rainfall threshold  
Landslide  
Median  
Proportion Correct  
Samigaluh

**ABSTRAK.** Longsor di wilayah tropis kerap dipicu hujan intens dengan dampak signifikan. Penelitian ini menilai kelayakan ambang batas curah hujan untuk peringatan dini longsor di Kapanewon Samigaluh, Kulon Progo. Tujuan mencakup pencirian rezim hujan, pengujian keterkaitan hujan dan kejadian longsor, evaluasi konsistensi spasial terhadap peta kerawanan, serta penetapan dan verifikasi ambang operasional. Data kejadian longsor dari BPBD dan curah hujan harian BMKG diproses melalui penyelarasan tanggal dan pengecekan kualitas, kemudian dianalisis secara kuantitatif. Jumlah kejadian longsor yang dianalisis 197 kejadian, dan data curah hujan diperoleh dari satu stasiun pengukuran. Ambang ditetapkan dengan pendekatan median untuk curah hujan harian ( $CH_0$ ) dan tiga harian ( $CH_2$ ) dari deret 2014–2023. Verifikasi dilakukan pada 213 hari musim hujan 2024 menggunakan Proportion Correct. Karakterisasi menunjukkan pola monsoon yang konsisten dan variabilitas antartahun yang nyata. Terdapat kecenderungan positif antara akumulasi hujan tahunan dan frekuensi longsor. Secara spasial, sekitar 93% kejadian berada pada zona kerawanan tinggi. Ambang berbasis median yang diperoleh adalah 31 mm untuk  $CH_0$  dan 81 mm untuk  $CH_2$ . Verifikasi operasional menghasilkan PC 84,0% untuk  $CH_0$  dan 83,6% untuk  $CH_2$ , menandakan kinerja yang layak. Intensitas hujan pada hari kejadian efektif membedakan hari longsor dan tidak longsor, sementara hujan tiga harian memperbesar risiko melalui penjenjuran tanah. Temuan ini mendukung penerapan ambang lokal untuk memperkuat peringatan dini, dengan fokus pemantauan pada musim hujan. Namun, potensi false alarm terkait perbedaan kondisi geologi dan penggunaan lahan dapat mempengaruhi akurasi model. Selain itu, pemutakhiran ambang secara berkala sangat diperlukan untuk mengatasi ketidakpastian akibat perubahan kondisi hidrometeorological dan dinamika penggunaan lahan.

**ABSTRACT.** Landslides in tropical regions are often triggered by intense rainfall, causing significant impacts. This study assesses the feasibility of rainfall thresholds for landslide early warning in Kapanewon Samigaluh, Kulon Progo. The objectives include characterizing the rainfall regime, testing the relationship between rainfall and landslide events, evaluating spatial consistency with the landslide hazard map, and establishing and verifying operational thresholds. Landslide data from the BPBD and daily rainfall data from BMKG were processed by aligning the dates and performing quality checks, followed by quantitative analysis. The number of landslide events analysed was 197, with rainfall data collected from a single measurement station. Thresholds were set using the median approach for daily rainfall ( $CH_0$ ) and three-day accumulation ( $CH_2$ ) from the 2014–2023 series. Verification was conducted on 213 days of the 2024 rainy season using Proportion Correct. Characterization shows a consistent monsoonal pattern with notable interannual variability. A positive tendency is observed between annual rainfall accumulation and landslide frequency. Spatially, around 93% of events occur in high-hazard zones. The median-based thresholds obtained are 31 mm for  $CH_0$  and 81 mm for  $CH_2$ . Operational verification results in PC values of 84.0% for  $CH_0$  and 83.6% for  $CH_2$ , indicating acceptable performance. Physically, the intensity of rainfall on event days effectively distinguishes landslide from non-landslide days, while three-day rainfall accumulation increases risk through soil saturation. These findings support the implementation of locally calibrated thresholds for strengthening early warning, with a focus on monitoring during the rainy season. However, the potential for false alarms related to geological conditions and land-use variability may affect model accuracy. Furthermore, periodic recalibration of thresholds is necessary to address uncertainties resulting from changing hydrometeorological conditions and land-use dynamics.



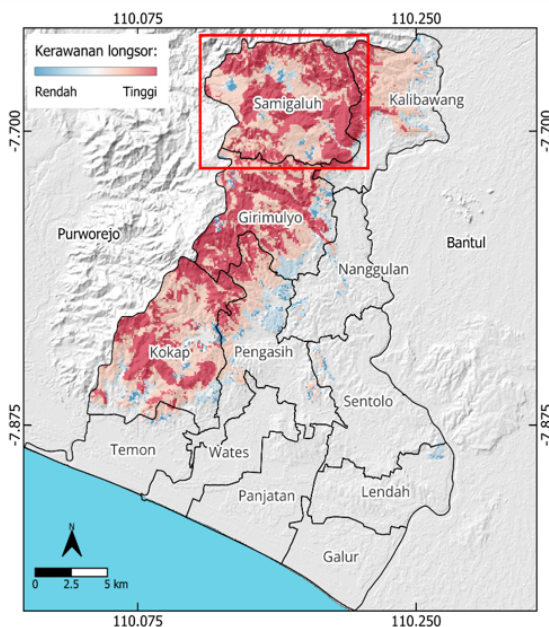
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. **Editorial of EULER:** Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo, Jln. Prof. Dr. Ing. B. J. Habibie, Bone Bolango 96554, Indonesia.

\*Penulis Korespondensi.

## 1. Pendahuluan

Longsor merupakan salah satu bencana alam paling merusak di dunia yang secara konsisten menyebabkan korban jiwa dan kerugian ekonomi setiap tahunnya [1]. Di wilayah tropis, di mana variabilitas iklim sangat tinggi dan kejadian hujan ekstrem sering terjadi, curah hujan dikenal sebagai pemicu paling umum terjadinya longsor [2]. Perubahan iklim diperkirakan akan memperburuk kondisi ini dengan meningkatkan intensitas dan frekuensi hujan lebat, sehingga memperbesar risiko longsor di wilayah yang rentan [3]. Indonesia termasuk dalam negara dengan indeks risiko bencana tertinggi di dunia karena kombinasi letak tropis, kondisi geologi yang kompleks, serta dinamika iklimnya [4]. Data nasional juga menegaskan kerentanan tersebut, dengan lebih dari 1.500 kejadian longsor tercatat setiap tahun, terutama di daerah pegunungan dengan topografi curam dan curah hujan tinggi [5, 6].

Di Indonesia, Kabupaten Kulon Progo di Daerah Istimewa Yogyakarta merupakan salah satu wilayah dengan tingkat kerawanan longsor yang tinggi. Kapanewon Samigaluh termasuk kawasan rawan longsor karena berada di Perbukitan Menoreh pada ketinggian 500–1.000 m di atas permukaan laut dengan karakter lereng curam, curah hujan intensif, serta pola penggunaan lahan yang kurang sesuai yang memperparah instabilitas lereng [7, 8]. Gambar 1 menunjukkan lokasi penelitian, fisiografi Perbukitan Menoreh, dan indikasi spasial kerawanan longsor di Kapanewon Samigaluh. Catatan kejadian bencana memperlihatkan bahwa longsor di Samigaluh kerap terjadi setelah periode hujan sedang hingga tinggi selama beberapa hari berturut-turut, sehingga indikator curah hujan tiga harian (CH-2) relevan dibandingkan hanya menggunakan curah hujan harian (CH0) [9].



**Gambar 1.** Peta lokasi penelitian dan indikasi kerawanan longsor di Kapanewon Samigaluh

Penentuan ambang curah hujan (*rainfall threshold*) telah lama digunakan sebagai pendekatan praktis dalam mendukung sistem peringatan dini longsor. Ambang batas ini didefinisikan sebagai nilai kritis curah hujan yang apabila terlampaui dalam peri-

ode tertentu, secara signifikan meningkatkan kemungkinan terjadinya longsor [10, 11]. Berbagai metode telah dikembangkan untuk menentukan ambang batas ini, mulai dari pendekatan empiris berbasis catatan historis longsor hingga metode statistik dan probabilistik, termasuk *quantile regression*, kerangka *Bayesian*, dan teknik berbasis *machine learning* [12–14]. Namun demikian, nilai ambang hujan bersifat sangat lokal. Efektivitasnya bergantung pada kondisi geologi, topografi, dan iklim setempat, sehingga nilai ambang yang ditetapkan di suatu wilayah tidak dapat langsung diterapkan di wilayah lain [15].

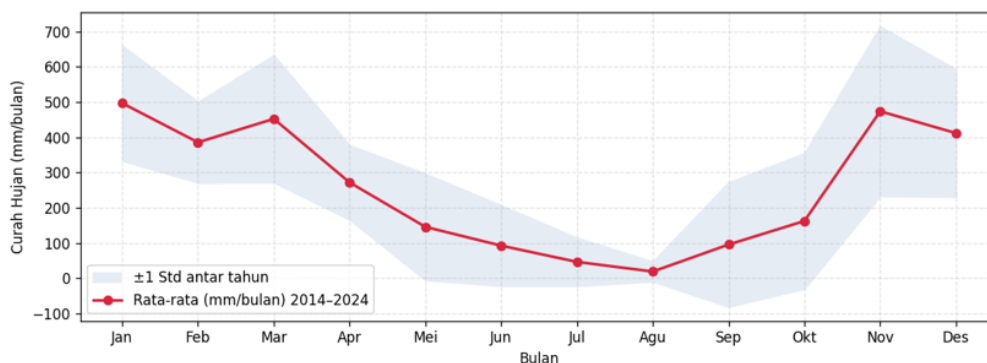
Di Indonesia, sistem peringatan dini nasional (ILEWS) saat ini menggunakan ambang curah hujan harian dan tiga harian sebagai indikator pemicu longsor [16]. Namun, meskipun berguna pada skala nasional, ambang yang ditetapkan oleh ILEWS tidak sepenuhnya representatif untuk daerah rawan tertentu seperti Samigaluh, yang memiliki kondisi geologi dan hidrometeorologis khas. Kekosongan pengetahuan ini menjadi kesenjangan penelitian yang penting, karena sistem peringatan dini yang ada masih cenderung bersifat reaktif daripada preventif, khususnya di tingkat lokal. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada kalibrasi lokal ambang batas curah hujan untuk meningkatkan efektivitas sistem peringatan dini di Samigaluh, dengan menyesuaikan ambang berdasarkan data hujan lokal yang lebih relevan dengan kondisi setempat.

Penelitian ini bertujuan menilai kelayakan ambang batas curah hujan untuk peringatan dini longsor di Kapanewon Samigaluh, Kulon Progo. Sasaran utamanya mencakup pencirian rezim hujan dan pengujian keterkaitan kuantitatif antara akumulasi hujan tahunan dan frekuensi kejadian longsor, penilaian konsistensi spasial kejadian terhadap peta kerawanan, serta penetapan ambang batas curah hujan berbasis median untuk curah hujan harian (CH0) dan tiga harian (CH-2). Pendekatan median dipilih karena lebih tahan terhadap nilai ekstrem dan lebih representatif bagi distribusi hujan tropis yang umumnya tidak normal [17]. Kinerja ambang batas curah hujan kemudian diverifikasi pada seluruh hari musim hujan 2024 menggunakan metode *Proportion Correct (PC)* agar kelayakan operasionalnya dapat dinilai. Dengan mengkalibrasi ambang pada data hujan lokal dan memverifikasinya secara harian, penelitian ini diharapkan memberi dasar ilmiah yang kuat untuk strategi pengurangan risiko bencana serta memperkuat sistem peringatan dini longsor di tingkat lokal.

## 2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk menganalisis curah hujan dan menetapkan ambang batas curah hujan sebagai dasar evaluasi kelayakan peringatan dini longsor. Wilayah studi berada di Kapanewon Samigaluh, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan periode data 2014–2024. Total terdapat 197 kejadian longsor yang digunakan dalam penelitian ini. Dari jumlah tersebut, sebanyak 174 kejadian pada periode 2014–2023 digunakan untuk penurunan ambang, sedangkan pada musim hujan 2024 digunakan 23 hari dengan kejadian longsor serta 190 hari tanpa kejadian longsor untuk keperluan verifikasi. Kejadian longsor yang tercatat pada tanggal yang sama dihitung sebagai satu kejadian guna menghindari *bias* dalam analisis.

Data kejadian longsor yang memuat tanggal dan lokasi diperoleh dari BPBD D.I. Yogyakarta, sedangkan data curah hujan



Gambar 2. Kurva klimatologi curah hujan bulanan periode 2014–2024 di Kapanewon Samigaluh

harian diperoleh dari Stasiun Klimatologi BMKG Yogyakarta. Selain itu digunakan peta kerawanan dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) untuk keperluan analisis spasial [18]. Seluruh data terlebih dahulu diselaraskan berdasarkan tanggal agar keterkaitan temporal antara kejadian longsor dan kondisi hujan tercermin dengan benar, kemudian dilakukan pengecekan kualitas yang mencakup kesesuaian format tanggal, konsistensi rentang waktu, kelengkapan nilai, deteksi duplikasi, serta penilaian kewajaran angka. Ketidaksesuaian dan anomali yang terdeteksi ditelusuri kembali ke sumbernya dan diperbaiki. Setelah proses verifikasi ulang, tidak ditemukan data yang hilang atau tidak konsisten selama periode 2014–2024, sehingga dataset yang digunakan untuk analisis telah tervalidasi dan dapat digunakan tanpa memerlukan interpolasi atau penghapusan data.

Terkait dengan keterwakilan satu stasiun hujan, pos hujan yang digunakan dalam penelitian ini berada pada zona fisiografi yang sebanding dengan sebagian besar wilayah Kapanewon Samigaluh, sehingga secara praktis diasumsikan mewakili kondisi umum curah hujan di wilayah studi. Asumsi ini tidak meniadakan kemungkinan adanya heterogenitas spasial curah hujan dalam skala lokal, terutama pada kawasan perbukitan, namun jaringan pengamatan yang tersedia belum memungkinkan evaluasi lebih rinci. Dengan demikian, hasil yang diperoleh merefleksikan kondisi rata-rata wilayah dan dapat dikalibrasi ulang apabila data multi-station yang lebih rapat tersedia pada masa mendatang.

Karakteristik hujan dihitung melalui akumulasi tahunan dan klimatologi bulanan yang menyajikan ukuran pemusatan serta rentang variabilitas untuk menggambarkan pola monsun dan potensi kejadian ekstrem pada puncak musim hujan. Keterkaitan curah hujan dan kejadian longsor dianalisis secara kuantitatif menggunakan sebaran titik tahunan antara akumulasi hujan dan jumlah kejadian, disertai estimasi regresi linier sederhana. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi hubungan statistik antara dinamika curah hujan dan frekuensi kejadian longsor pada skala tahunan.

Analisis spasial dilakukan dengan menumpangtindihkan titik kejadian longsor pada kelas kerawanan longsor untuk memperoleh proporsi kejadian pada kelas rendah, sedang, dan tinggi. Langkah ini memungkinkan penilaian konsistensi antara pola kejadian aktual dan zonasi kerawanan longsor, serta memberikan dasar spasial bagi evaluasi kelayakan ambang hujan di wilayah studi.

Penetapan ambang batas curah hujan dilakukan dengan pendekatan statistik berbasis median menggunakan deret yang

berasosiasi dengan kejadian pada periode 2014–2023. Dua variabel operasional digunakan secara konsisten, yaitu  $CHO$  dan  $CH-2$ . Perhitungan dilaksanakan dengan kode Python (*pandas/numpy*) agar *reproducible*, meliputi pembentukan jendela akumulasi, penjumlahan dalam jendela tersebut, pengurutan deret, dan pengambilan median, yang dinyatakan pada pers. (1).

$$\text{median}(x) = \begin{cases} x_{(\frac{n+1}{2})}, & \text{jika } n \text{ ganjil,} \\ \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}, & \text{jika } n \text{ genap,} \end{cases} \quad (1)$$

dengan  $x = \{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}\}$  adalah deret yang sudah diurutkan menaik. Nilai median yang diperoleh kemudian ditetapkan sebagai ambang batas  $CHO$  dan  $CH-2$  karena lebih *robust* terhadap nilai ekstrem pada distribusi hujan tropis yang lazim tidak berdistribusi normal.

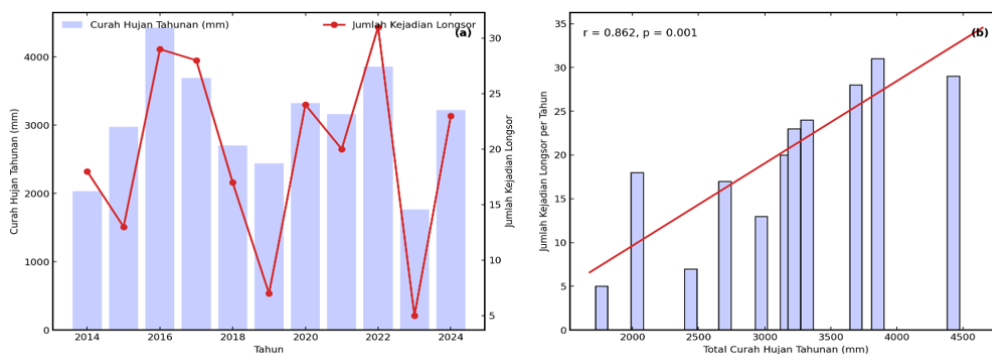
Verifikasi ambang dilakukan pada seluruh hari selama musim hujan 2024 (Januari hingga April serta Oktober hingga Desember). Untuk setiap hari dihitung  $CHO$  dan  $CH-2$  dengan jendela yang sesuai, lalu masing-masing dibandingkan dengan ambang hasil 2014–2023 untuk memberi label melewati ambang atau tidak melewati ambang. Status kejadian longsor diperoleh dari catatan BPBD pada tanggal yang sama. Hasil pelabelan harian disusun ke dalam tabel kontingensi untuk memperoleh *true positive (TP)*, *true negative (TN)*, *false positive (FP)*, dan *false negative (FN)*. Kinerja ambang dievaluasi menggunakan *Proportion Correct (PC)*, yaitu proporsi hari yang terklasifikasi benar terhadap seluruh hari verifikasi dan dinyatakan dalam persen, seperti pada pers. (2) [19, 20].

$$PC = \sum_{i=1}^k P(i, i), \quad (2)$$

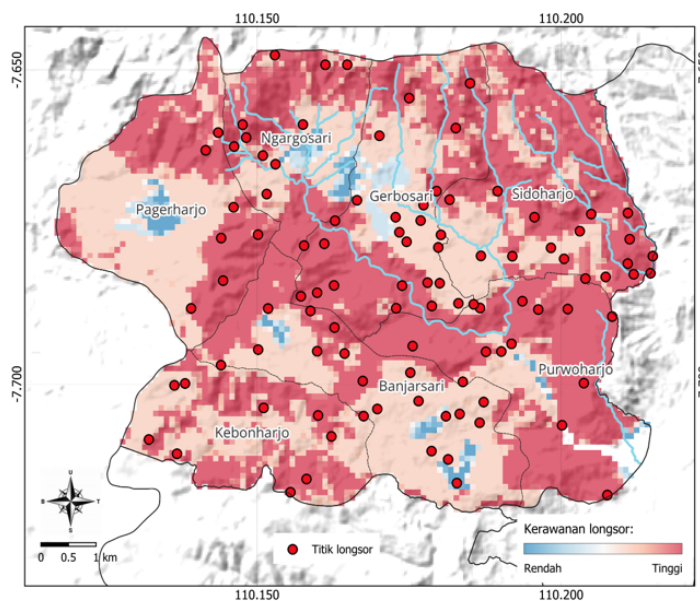
dengan  $P(i, i)$  adalah probabilitas prediksi yang sesuai dengan observasi pada kategori ke- $i$  dan  $k$  adalah jumlah kategori. Kriteria interpretasi yang digunakan adalah sebagai berikut: akurasi  $< 50\%$  dikategorikan tidak baik/tidak layak,  $50\text{--}75\%$  cukup baik/layak, dan  $> 75\%$  baik/layak sebagai dasar pembuatan peringatan dini tanah longsor [20].

### 3. Hasil dan Pembahasan

Untuk menilai kelayakan ambang hujan sebagai indikator operasional di Samigaluh, penyajian hasil mencakup karakterisasi curah hujan periode 2014–2024 guna menangkap variasi tahunan dan musiman yang berkaitan dengan pemicu longsor. Se-



**Gambar 3.** (a) Curah hujan tahunan dan kejadian longsor periode 2014–2024; (b) Hubungan linier antara curah hujan tahunan dan jumlah kejadian longsor tahunan dengan garis regresi



**Gambar 4.** Distribusi kejadian longsor menurut kelas kerawanan di Kapanewon Samigaluh berdasarkan peta BNPB

lanjutnya diuji hubungan kuantitatif antara curah hujan dan kejadian longsor, diikuti penilaian konsistensi spasial kejadian terhadap peta kerawanan. Setelah itu diturunkan ambang curah hujan berbasis median pada *CHO* dan *CH-2* serta diringkas distribusinya. Terakhir, kinerja ambang dievaluasi menggunakan metrik *Proportion Correct (PC)* pada musim hujan 2024 sebagai verifikasi operasional.

### 3.1. Karakteristik Curah Hujan Periode 2014–2024

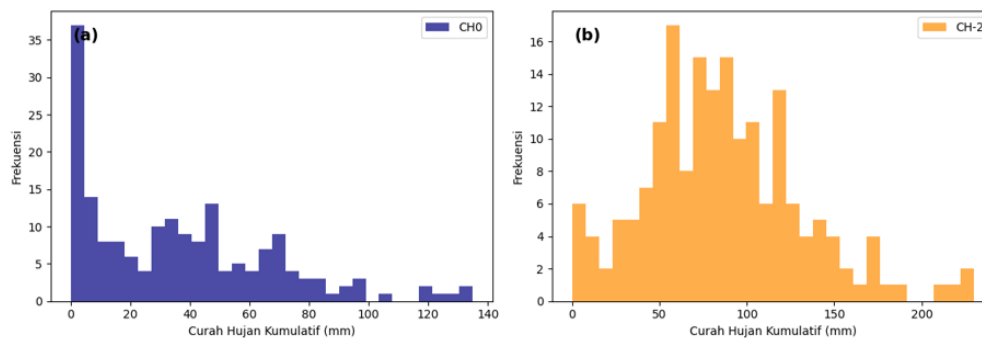
Pola klimatologi bulanan memperlihatkan karakteristik musiman yang konsisten sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Musim hujan berlangsung dari bulan Oktober hingga April, dengan rata-rata curah hujan bulanan tertinggi dan simpangan baku antar tahun yang relatif besar. Kondisi ini menunjukkan adanya potensi variasi curah hujan yang tinggi serta peluang kejadian hujan ekstrem pada periode puncak musim hujan. Sebaliknya, periode Mei hingga September merupakan musim kemarau dengan curah hujan yang rendah serta variabilitas antar tahun yang sempit, mencerminkan kondisi kering yang relatif stabil.

Pola klimatologi ini sejalan dengan karakteristik iklim *monsun tropis* Indonesia. Meskipun terdapat fluktuasi intensitas antar tahun akibat fenomena eksternal seperti *El Niño* dan *La Niña*,

bentuk pola musiman tetap konsisten [21, 22]. Informasi ini penting untuk memahami dinamika curah hujan dan potensi risiko bencana hidrometeorologi, termasuk tanah longsor di Kapanewon Samigaluh, Kulon Progo.

### 3.2. Curah Hujan dan Kejadian Longsor

Hubungan antara curah hujan tahunan dan jumlah kejadian longsor di Kapanewon Samigaluh periode 2014–2024 menunjukkan kecenderungan positif. Gambar 3a memperlihatkan tren akumulasi curah hujan tahunan beserta jumlah kejadian longsor, di mana tahun dengan akumulasi lebih tinggi umumnya diikuti peningkatan frekuensi kejadian, sedangkan tahun dengan akumulasi lebih rendah cenderung disertai jumlah kejadian yang lebih sedikit. Sebagai ilustrasi, 2016, 2022, dan 2024 mencatat akumulasi relatif tinggi dan beriringan dengan kejadian longsor yang lebih banyak, sementara 2015, 2019, dan 2023 menunjukkan pola sebaliknya. Gambar 3b menegaskan pola tersebut melalui regresi linier sederhana ( $r = 0,862; p < 0,001; n = 11$ ), yang menunjukkan hubungan positif yang kuat antara akumulasi curah hujan dan frekuensi kejadian longsor. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menempatkan curah hujan sebagai pemicu utama proses ketidakstabilan lereng di wilayah bertopo-



**Gambar 5.** Distribusi curah hujan yang berasosiasi dengan longsor: (a) curah hujan saat longsor (CH0), (b) curah hujan tiga harian (CH-2)

grafi curam, sehingga keterkaitan tahunan ini layak dijadikan dasar dalam penetapan ambang batas curah hujan untuk keperluan peringatan dini.

Penggunaan regresi linier sederhana memiliki keterbatasan karena data kejadian longsor merupakan data cacah dengan ukuran sampel tahunan yang relatif kecil. Model *Poisson* atau *negative binomial* secara teoritis lebih sesuai untuk menangani potensi *overdispersion* yang lazim pada data cacah. *Goodness-of-fit* dan perilaku residual tidak dievaluasi dalam penelitian ini, sehingga analisis lanjutan diperlukan untuk memastikan kecocokan model. Optimalisasi lebih lanjut, seperti penentuan jendela akumulasi yang lebih tepat, integrasi indikator *intensity–duration* hujan, serta evaluasi metrik kinerja tambahan, dapat meningkatkan ketelitian dan keandalan operasional sistem peringatan dini [13, 23, 24].

### 3.3. Analisis Spasial Kejadian Longsor dan Peta Kerawanan

**Gambar 4** menampilkan hasil tumpang-susun antara titik kejadian longsor di Kapanewon Samigaluh dan kelas kerawanan dari peta BNPB [18]. Distribusi menunjukkan bahwa sekitar 93% kejadian berada pada zona kerawanan tinggi, sekitar 6% pada kerawanan sedang, dan 1% pada kerawanan rendah. Pola ini mengindikasikan konsistensi yang kuat antara lokasi kejadian dan zonasi kerawanan, sekaligus menegaskan dominasi proses pemicu pada satuan lahan berlereng curam dan berintensitas hujan tinggi di wilayah studi.

Implikasinya, prioritas mitigasi perlu diarahkan pada zona kerawanan tinggi, mencakup penataan penggunaan lahan, stabilisasi lereng, peningkatan vegetasi penahan, serta penguatan sistem peringatan dini dan jalur evakuasi. Temuan ini juga memberikan dasar spasial bagi perencanaan pengurangan risiko bencana, termasuk penetapan fokus intervensi pada dusun/kelurahan yang berulang kali tercatat mengalami kejadian.

### 3.4. Statistik Distribusi Curah Hujan Terkait Longsor

Analisis distribusi curah hujan difokuskan pada dua kategori yang berasosiasi langsung dengan kejadian longsor, yaitu *CH0* dan *CH-2* pada periode 2014–2024, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 5**. Tujuannya untuk menggambarkan bentuk sebaran data hujan pemicu serta menyediakan dasar statistik bagi penetapan ambang pada tahap berikutnya.

**Gambar 5a** memperlihatkan bahwa distribusi *CH0* miring ke kanan (*positively skewed*). Sebagian besar kejadian terjadi pada intensitas harian rendah hingga sedang, namun terdapat nilai ekstrem hingga sekitar 130 mm yang membentuk ekor kanan.

Pola asimetris ini konsisten dengan karakter curah hujan harian yang umumnya mengikuti distribusi *gamma* atau *gamma-like* [17, 20, 25, 26]. Kondisi tersebut sekaligus mendukung penggunaan median sebagai batas kritis yang lebih *robust* terhadap nilai ekstrem. Secara fisik, hal ini mengindikasikan bahwa hujan harian berintensitas sedang dapat memicu longsor pada lereng yang labil, sementara hujan harian sangat tinggi muncul pada kasus tertentu.

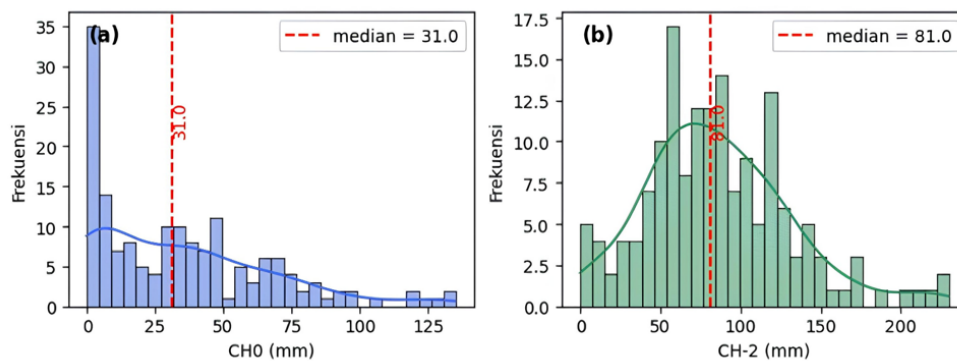
**Gambar 5b** menunjukkan distribusi *CH-2* yang lebih menyebar dengan puncak frekuensi pada kisaran 50–100 mm dan bentuk relatif lebih simetris dibandingkan *CH0*, menegaskan peran akumulasi multi-hari terhadap penjenjuran tanah dan kenaikan tekanan pori yang menurunkan kestabilan lereng. Dibandingkan ukuran pemusatan lain, median lebih representatif untuk kedua distribusi tersebut karena lebih *robust* terhadap nilai ekstrem dan sesuai untuk data hujan tropis yang kerap tidak berdistribusi normal [13, 23, 24].

Pendekatan optimasi ambang seperti *ROC*, *PSS*, atau *CSI* tidak diterapkan pada penelitian ini dikarenakan membutuhkan representasi kedua kelas (longsor dan tidak longsor) yang memadai untuk menghasilkan ambang yang stabil. *Dataset* pada studi ini hanya mencakup kelas kejadian dan memiliki ukuran sampel yang terbatas, sehingga metode optimasi tersebut berpotensi menghasilkan ambang yang tidak reliabel atau *bias*. Dalam kondisi tersebut, median memberikan estimasi pemusatan yang lebih stabil, dapat direproduksi, dan sesuai untuk penetapan ambang pada kejadian langka.

Temuan distribusi ini menjadi landasan statistik penetapan ambang median *CH0* dan median *CH-2* dipilih sebagai batas kritis, sementara informasi riwayat hujan beberapa hari sebelumnya tetap dipertimbangkan pada tahap aplikasi untuk meningkatkan reliabilitas peringatan [27–29].

### 3.5. Analisis Ambang Batas Curah Hujan

Penetapan ambang batas curah hujan dilakukan dengan pendekatan statistik berbasis median menggunakan deret yang berasosiasi dengan kejadian longsor periode 2014–2023, sedangkan musim hujan 2024 selama 213 hari digunakan untuk verifikasi kinerja di luar sampel. Data diklasifikasikan ke dalam dua kategori operasional, yakni curah hujan *CH0* dan *CH-2*. Pemilihan median dimaksudkan untuk memperoleh ukuran pemusatan yang lebih *robust* terhadap nilai ekstrem pada distribusi curah hujan tropis yang sering tidak berdistribusi normal, sehingga ambang yang dihasilkan lebih representatif secara operasional [17, 20].



**Gambar 6.** Ambang batas curah hujan berbasis median yang diturunkan dari data berasosiasi dengan kejadian longsor periode 2014–2023: (a) saat kejadian ( $CH_0$ ) = 31 mm, (b) akumulasi tiga harian ( $CH-2$ ) = 81 mm. Garis median merah ditetapkan sebagai batas kritis operasional

Penggunaan median dipertahankan karena metode optimasi *threshold* seperti *ROC*, *PSS*, atau *CSI* mensyaratkan ketersediaan data kejadian–non-kejadian yang besar dan seimbang agar estimasi ambang tidak terpengaruh ketidakseimbangan sampel. Ketidakterpenuhan prasyarat tersebut pada *dataset* ini menyebabkan metode optimasi kurang sesuai diterapkan. Pemilihan median memberikan nilai ambang yang lebih tahan terhadap variasi sampel dan sesuai untuk kebutuhan penetapan ambang pada studi berbasis data terbatas.

Hasil penurunan ambang memberikan nilai ambang  $CH_0 = 31$  mm dan  $CH-2 = 81$  mm. Distribusi masing-masing kategori beserta garis median sebagai batas kritis ditunjukkan pada **Gambar 6**. Nilai median  $CH_0$  yang lebih rendah daripada  $CH-2$  mengindikasikan bahwa hujan harian tunggal berintensitas sedang sudah dapat berkontribusi terhadap terjadinya longsor, sementara akumulasi beberapa hari memberikan pengaruh tambahan melalui peningkatan kejenuhan tanah dan tekanan pori, yang pada gilirannya menurunkan kestabilan lereng. Temuan ini mendukung penggunaan  $CH_0$  sebagai indikator primer dan  $CH-2$  sebagai indikator pelengkap dalam kerangka peringatan dini berbasis ambang.

### 3.6. Verifikasi Ambang Batas dengan Metode Proportion Correct (PC)

Verifikasi ambang batas curah hujan untuk Kapanewon Samigaluh dilakukan pada musim hujan 2024 (Januari–April dan Oktober–Desember) dengan memasukkan seluruh hari pada periode tersebut, baik hari dengan kejadian maupun tanpa kejadian longsor. Evaluasi menggunakan *Proportion Correct (PC)* berbasis tabel kontingensi *true positive (TP)*, *true negative (TN)*, *false positive (FP)*, dan *false negative (FN)*, sehingga kemampuan ambang dalam membedakan hari berisiko dan tidak berisiko dapat ditaksir secara menyeluruh sekaligus menjadi dasar integrasi ke sistem peringatan dini. Hasil menunjukkan bahwa  $CH_0$  memberikan kinerja terbaik dengan  $TP = 16$ ,  $TN = 163$ ,  $FP = 27$ ,  $FN = 7$ , dan  $PC = 84,0\%$ , sedangkan  $CH-2$  sedikit lebih rendah dengan  $TP = 14$ ,  $TN = 164$ ,  $FP = 26$ ,  $FN = 9$ , dan  $PC = 83,6\%$ . Temuan ini menegaskan bahwa sinyal curah hujan pada hari kejadian ( $CH_0$ ) paling representatif untuk menangkap pemicu longsor di wilayah studi, sementara akumulasi tiga harian ( $CH-2$ ) relevan sebagai indikator pelengkap. Ringkasan hasil disajikan pada **Tabel 1** dan **Gambar 7**

memperlihatkan bahwa seluruh nilai *PC* melampaui 50% sehingga sistem memiliki keterampilan prediktif yang layak [20].

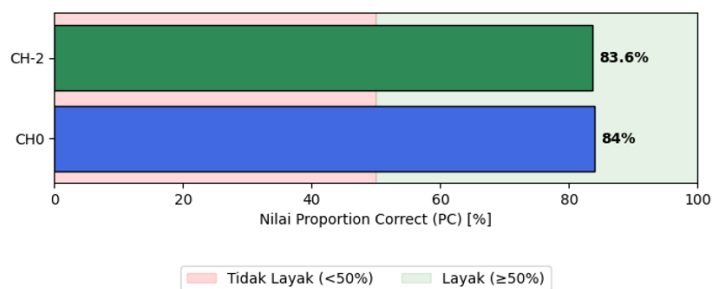
**Tabel 1.** Kontingensi frekuensi dan peluang hasil verifikasi  $CH_0$  dan  $CH-2$

Ambang	TP	FP	FN	TN	Total	PC (%)
$CH_0$	16	27	7	163	213	84.0
$CH-2$	14	26	9	164	213	83.6

Proporsi hari kejadian yang relatif kecil menyebabkan akurasi *PC* cenderung optimistis. Pada *dataset* kejadian langka, perubahan kecil pada *FN* atau *FP* dapat menghasilkan perubahan proporsional yang besar pada *recall*, *precision*, dan *false alarm ratio*. Satu tambahan *FN* langsung menurunkan *recall* secara signifikan, sementara sedikit peningkatan *FP* meningkatkan beban *false alarm* pada penerapan operasional. Ketimpangan kelas ini membatasi reliabilitas *PC* sebagai indikator tunggal, sehingga interpretasi performa membutuhkan metrik evaluasi yang lebih informatif.

Metrik berbasis *skill* menunjukkan karakteristik yang lebih stabil untuk mengevaluasi ambang median. Untuk  $CH_0 = 31$  mm, diperoleh *precision* = 0,372; *recall* = 0,696; *specificity* = 0,858; *FAR* = 0,628; *F1-score* = 0,485; *CSI* = 0,320; *balanced accuracy* = 0,777; *PSS* = 0,554; *MCC* = 0,428; dan *FB* = 1,87. Untuk  $CH-2 = 81$  mm, *precision* tercatat 0,350; *recall* = 0,609; *specificity* = 0,863; *FAR* = 0,650; *F1-score* = 0,444; *CSI* = 0,286; *balanced accuracy* = 0,736; *PSS* = 0,472; *MCC* = 0,375; dan *FB* = 1,74. Sebagian besar metrik menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap perubahan kecil pada *TP/FP/FN/TN*, suatu karakter umum pada verifikasi kejadian langka yang perlu diperhatikan dalam interpretasi operasional.

Secara substantif, dominasi sinyal  $CH_0$  konsisten dengan mekanisme fisik pemicu longsor, yakni kontribusi intensitas hujan pada hari kejadian yang efektif memisahkan hari longsor dan tidak longsor, sementara  $CH-2$  merepresentasikan efek penjenhuan bertahap dan kenaikan tekanan pori. Variasi fisiografi, sifat tanah, vegetasi, penggunaan lahan, intensitas hujan lokal, serta aktivitas manusia memodulasi respons lereng, sehingga hujan harian tinggi tidak selalu memicu longsor tanpa dukungan akumulasi kelembapan yang memadai [30]. Hasil ini sejalan dengan literatur yang menekankan pentingnya ambang berbasis intensitas/durasi dekat waktu kejadian untuk peringatan dini yang efek-



**Gambar 7.** Verifikasi ambang batas curah hujan untuk kejadian longsor tahun 2024, dengan nilai PC > 50% menunjukkan keterampilan prediktif yang layak

tif, sekaligus perlunya optimasi ambang yang peka terhadap karakter hidroklimat setempat agar ketelitian terjaga tanpa lonjakan *false alarms* [9, 23, 31]. Rekomendasi *Indonesian Landslide Early Warning System (ILEWS)* untuk Jawa 30 mm (satu hari) dan 64 mm (tiga harian), dengan opsi 39 mm dan 81 mm sebagai rata-rata peristiwa [16], mendukung penempatan CHO sebagai indikator primer dan CH-2 sebagai indikator sekunder, konsisten dengan kinerja pada studi ini.

Ambang yang diuji menunjukkan kelayakan untuk kewaspadaan dini, namun belum memadai sebagai dasar keputusan berisiko tinggi tanpa dukungan informasi tambahan. Penyetelan ambang dapat dievaluasi dengan memaksimalkan *Peirce/True Skill Statistic (PSS/TSS)* atau dengan menargetkan *F1-score* dan *critical success index (CSI/TS)* sesuai prioritas pengurangan *false negative (FN)* atau penekanan *false positive (FP)*. Untuk implementasi operasional, skema bertingkat dipertimbangkan dengan urutan *Waspada*, *Siaga*, lalu *Awas*. Status *Waspada* dicirikan ketika salah satu ambang terlampaui, misalnya  $CH-2 \geq 81$  mm atau  $CHO \geq 31$  mm. Status *Siaga* dicirikan ketika  $CH-2 \geq 81$  mm sementara  $CHO < 31$  mm. Status *Awas* dicirikan ketika  $CH-2 \geq 81$  mm dan  $CHO \geq 31$  mm. Pendekatan ini pada umumnya meningkatkan *precision* pada level risiko tertinggi tanpa banyak mengurangi *recall* pada level kewaspadaan.

#### 4. Kesimpulan

Studi ini menilai kelayakan ambang batas curah hujan untuk peringatan dini longsor di Kapanewon Samigaluh melalui karakteristik hujan 2014–2024, pengujian keterkaitan hujan dan kejadian longsor, evaluasi konsistensi spasial terhadap peta kerawanan, serta penetapan dan verifikasi ambang batas curah hujan. Pola *monsun* konsisten dengan musim hujan yang berlangsung sekitar Oktober hingga April, dengan variabilitas antartahun yang nyata dan peluang hujan ekstrem pada puncak musim. Secara kuantitatif, terdapat kecenderungan positif antara akumulasi hujan tahunan dan frekuensi kejadian longsor, di mana tahun yang lebih basah cenderung diikuti lebih banyak kejadian. Secara spasial, sekitar 93% kejadian longsor berada pada zona kerawanan tinggi sehingga peta kerawanan relevan untuk penajaman prioritas mitigasi.

Ambang batas curah hujan berbasis median yang diturunkan dari deret kejadian 2014–2023 menghasilkan ambang CHO sebesar 31 mm dan CH-2 sebesar 81 mm. Verifikasi pada seluruh hari musim hujan 2024 menunjukkan PC 84,0% untuk CHO dan 83,6% untuk CH-2, yang mengindikasikan kinerja layak secara operasional. Ketimpangan kelas pada data kejadian menyebabkan nilai

PC bersifat optimistis, sehingga interpretasi performa disarankan ditunjang metrik berbasis *skill*. Evaluasi *precision–recall*, *CSI*, *PSS*, dan *MCC* menunjukkan bahwa ambang sensitif terhadap perubahan kecil pada *TP/FP/FN/TN* dan memiliki beban *false alarm* yang perlu dikelola dalam penerapan operasional.

Secara fisik, intensitas curah hujan pada hari kejadian (CHO) efektif membedakan hari longsor dan tidak longsor, sedangkan curah hujan tiga harian (CH-2) memperbesar risiko melalui penjeñuhan tanah. Temuan ini mendukung penempatan ambang batas curah hujan CHO sebagai indikator primer dan CH-2 sebagai indikator pelengkap dalam rantai peringatan dini setempat, dengan fokus pemantauan ambang pada periode Oktober hingga April. Ambang median memberikan batas yang stabil pada *dataset* dengan ketimpangan kelas tinggi, meskipun bukan merupakan ambang optimal secara metrik kinerja.

Keterbatasan satu penakar hujan, potensi *under-reporting* kejadian, dan variasi spasial dalam satu Kapanewon dapat memunculkan *bias* pada estimasi ambang. Selain itu, perubahan iklim yang non-stasioner dapat menggeser distribusi hujan ekstrem di masa depan, sehingga ambang yang diperoleh terutama relevan untuk periode pengamatan dan perlu dikalibrasi ulang secara berkala. Untuk meningkatkan reliabilitas sistem, pembaruan berkala, evaluasi sensitivitas ambang, serta integrasi informasi kondisi lahan dan faktor hidroklimat lain direkomendasikan untuk menekan *false alarm* dan mengurangi *mised event* dalam implementasi operasional.

**Kontribusi Penulis.** Yudha Tintana Marganiswati: Konseptualisasi, Metodologi, Perangkat lunak, Validasi, Analisis formal, Visualisasi, Penulisan – draf asli. Yohana Noradika Maharani, Tedy Agung Cahyadi: Supervisi, Penulisan – telaah dan penyuntingan. Johan Danu Prasetya, Widyawan-to Prastitho: Supervisi, Validasi. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi manuskrip yang diterbitkan.

**Ucapan Terima Kasih.** Penulis berterima kasih kepada seluruh institusi dan individu yang berkontribusi pada pelaksanaan penelitian serta penyusunan naskah. Kami menghargai komentar konstruktif dari editor dan para penelaah yang membantu meningkatkan kualitas artikel ini.

**Pembiayaan.** Penelitian ini tidak menerima pendanaan dari pihak eksternal.

**Konflik Kepentingan.** Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan yang terkait dengan artikel ini.

**Ketersediaan Data.** Tidak tersedia.

## Referensi

- [1] M. J. Froude and D. N. Petley, "Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 8, pp. 2161–2181, Aug. 2018, doi: [10.5194/nhess-18-2161-2018](https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018).
- [2] F. Guzzetti, "Invited perspectives: Landslide populations - Can they be predicted?" *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 5, pp. 1467–1471, May 2021, doi: [10.5194/nhess-21-1467-2021](https://doi.org/10.5194/nhess-21-1467-2021).
- [3] S. L. Gariano and F. Guzzetti, "Landslides in a changing climate," Elsevier B.V., Nov. 2016, doi: [10.1016/j.earscirev.2016.08.011](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011).
- [4] Bündnis Entwicklung Hilft and IFHV, *WorldRiskReport 2021 Focus: Social Protection*, 2021.
- [5] N. Sekarlangit, T. F. Fathani, and W. Wilopo, "Landslide susceptibility mapping of Menoreh Mountain using logistic regression," *Journal of Applied Geology*, vol. 7, no. 1, p. 51, Jun. 2022, doi: [10.22146/jag.72067](https://doi.org/10.22146/jag.72067).
- [6] E. Erzagian, W. Wilopo, and T. F. Fathani, "Landslide susceptibility zonation using GIS-based frequency ratio approach in the Kulon Progo Mountains Area, Indonesia," in *Progress in Landslide Research and Technology*, Springer Nature, 2023, pp. 115–126, doi: [10.1007/978-3-031-44296-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44296-4_3).
- [7] R. Susatio *et al.*, "Improving landslide susceptibility using groundwater parameter in Samigaluh and Kalibawang Subdistricts," *Journal of Applied Geology*, vol. 10, no. 1, p. 14, Aug. 2025, doi: [10.22146/jag.106054](https://doi.org/10.22146/jag.106054).
- [8] D. S. Hadmoko *et al.*, "Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia," *Natural Hazards*, vol. 54, no. 3, pp. 623–642, 2010, doi: [10.1007/s11069-009-9490-0](https://doi.org/10.1007/s11069-009-9490-0).
- [9] R. Satyaningsih *et al.*, "Dynamic rainfall thresholds for landslide early warning in Progo Catchment, Java, Indonesia," *Natural Hazards*, vol. 119, no. 3, pp. 2133–2158, Dec. 2023, doi: [10.1007/s11069-023-06208-2](https://doi.org/10.1007/s11069-023-06208-2).
- [10] F. Guzzetti *et al.*, "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 98, no. 3–4, pp. 239–267, Dec. 2007, doi: [10.1007/s00703-007-0262-7](https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7).
- [11] M. T. Brunetti *et al.*, "Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy," 2010. [Online]. Available: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/447/2010/>
- [12] S. Segoni, L. Piciullo, and S. L. Gariano, "A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence," Springer, Aug. 2018, doi: [10.1007/s10346-018-0966-4](https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4).
- [13] F. Guzzetti, M. Melillo, and A. C. Mondini, "Landslide predictions through combined rainfall threshold models," *Landslides*, 2024, doi: [10.1007/s10346-024-02340-7](https://doi.org/10.1007/s10346-024-02340-7).
- [14] Y. Sun *et al.*, "Probabilistic thresholds for regional rainfall induced landslides," *Computers and Geotechnics*, vol. 166, Feb. 2024, doi: [10.1016/j.compgeo.2023.106040](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.106040).
- [15] B. Zhao *et al.*, "Rainfall thresholds for shallow landslides considering rainfall temporal patterns," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 84, no. 3, Mar. 2025, doi: [10.1007/s10064-025-04144-y](https://doi.org/10.1007/s10064-025-04144-y).
- [16] R. A. Yuniawan *et al.*, "Revised rainfall threshold in the Indonesian landslide early warning system," *Geosciences*, vol. 12, no. 3, Mar. 2022, doi: [10.3390/geosciences12030129](https://doi.org/10.3390/geosciences12030129).
- [17] Supari *et al.*, "ENSO modulation of seasonal rainfall and extremes in Indonesia," *Climate Dynamics*, vol. 51, no. 7–8, pp. 2559–2580, Oct. 2018, doi: [10.1007/s00382-017-4028-8](https://doi.org/10.1007/s00382-017-4028-8).
- [18] BNPB, *IRBI Indeks Risiko Bencana Indonesia Tahun 2024*, Jakarta, 2024.
- [19] I. T. Jolliffe and D. B. Stephenson, *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, 2nd ed. Wiley, 2012.
- [20] D. S. Wilks, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th ed. Elsevier, 2011.
- [21] S. Zehri *et al.*, "Diverse impact of 2023 El Niño on weather patterns over the Indonesian Maritime Continent," *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, vol. 75, no. 2, Jun. 2025, doi: [10.1071/ES25005](https://doi.org/10.1071/ES25005).
- [22] J. L. McBride, M. R. Haylock, and N. Nicholls, "Relationships between the Maritime Continent Heat Source and the El Niño–Southern Oscillation phenomenon," *Journal of Climate*, vol. 16, no. 17, 2003.
- [23] F. C. G. Gonzalez *et al.*, "A systematic review on rainfall thresholds for landslides occurrence," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, Jan. 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e23247](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23247).
- [24] N. Nocentini *et al.*, "Optimization of rainfall thresholds for landslide early warning through false alarm reduction and a multi-source validation," *Landslides*, vol. 21, no. 3, pp. 557–571, Mar. 2024, doi: [10.1007/s10346-023-02176-7](https://doi.org/10.1007/s10346-023-02176-7).
- [25] C. Martinez-Villalobos and J. D. Neelin, "Why do precipitation intensities tend to follow gamma distributions?" *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 76, no. 11, pp. 3611–3631, 2019, doi: [10.1175/JAS-D-18](https://doi.org/10.1175/JAS-D-18).
- [26] A. M. A. M. Maturidi *et al.*, "Rainfall-induced landslide thresholds development by considering different rainfall parameters: A review," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 10, pp. 85–97, 2021, doi: [10.12911/22998993/142183](https://doi.org/10.12911/22998993/142183).
- [27] S. Zhang *et al.*, "Integrating rainfall severity and soil saturation indices to define hydro-meteorological thresholds for landslides," *Journal of Hydrology*, vol. 654, Jun. 2025, doi: [10.1016/j.jhydrol.2025.132873](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132873).
- [28] B. B. Mirus *et al.*, "Integrating hydrologic information into the next generation of landslide early warning systems," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 25, no. 1, pp. 169–182, Jan. 2025, doi: [10.5194/nhess-25-169-2025](https://doi.org/10.5194/nhess-25-169-2025).
- [29] I. Fustos-Toribio *et al.*, "Rainfall-induced landslide early warning system based on corrected mesoscale numerical models," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 6, pp. 2169–2183, Jun. 2022, doi: [10.5194/nhess-22-2169-2022](https://doi.org/10.5194/nhess-22-2169-2022).
- [30] B. B. Mirus *et al.*, "Integrating real-time subsurface hydrologic monitoring with empirical rainfall thresholds to improve landslide early warning," *Landslides*, vol. 15, no. 10, pp. 1909–1919, Oct. 2018, doi: [10.1007/s10346-018-0995-z](https://doi.org/10.1007/s10346-018-0995-z).
- [31] B. Peng and X. Wu, "Optimizing rainfall-triggered landslide thresholds for daily landslide hazard warning in the Three Gorges Reservoir area," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 11, pp. 3991–4013, 2024, doi: [10.5194/nhess-24-3991-2024](https://doi.org/10.5194/nhess-24-3991-2024).