

EVALUASI DIAGNOSTIK KINERJA HIDROLOGIS DAN RANGKAIAN BAHAYA BANJIR BANDANG-LONGSOR PADA DAS WARJORI, PEGUNUNGAN ARFAK, PAPUA BARAT

Diagnostic Evaluation of Hydrological Performance and The Flash Flood-Landslide Hazard Chain in The Warjori Watershed, Arfak Mountains, West Papua

^{1*}Andi Munawir, ¹Rudi A. Maturbongs, ¹Bernadetta M. G. Sadsoeitoeboen,

Affiliation

1. Program Studi Magister Kehutanan,
Fakultas Kehutanan, Universitas Papua,
Manokwari

Corresponding author:

*munawirforester99@gmail.com

Submit: 2026-5-17

Accepted: 2026-6-20

COPYRIGHT © 2026 by Journal Eboni.

This Work is licenced under a Creative
Commons Attribution 4.0 International
License

Abstract

The Warjori Watershed is a tropical mountainous catchment in West Papua with important hydrological and ecological functions. This study presents an event-based diagnostic evaluation of hydrological performance and hydrogeomorphic hazard associated with the 16 May 2025 flash flood–landslide in Jim Village. The analysis integrated three available, non-contiguous NASA POWER daily rainfall estimates; official land-cover and critical-land datasets; slope and soil maps; secondary peak-discharge and channel-capacity values; preliminary landslide geometry; and post-event documentation. Rainfall estimates were 92.04, 123.44, and 52.16 mm day⁻¹ on 11, 14, and 16 May, respectively. Their sum (267.64 mm) was treated only as a descriptive total, not as a continuous antecedent-rainfall index. Primary and secondary dryland forest covered 86.16% of the watershed, while the aggregated Slightly Critical–Very Critical classes covered 95.28%; the latter was not interpreted as the formal critical-land indicator. Secondary values of $Q_p = 52.590 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $Q_c = 64.800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ yielded $Q_p/Q_c = 0.81$. Because their derivation was incompletely documented, the ratio was used as a screening metric. A sensitivity analysis showed that a 20% decline in effective channel capacity would increase the ratio to approximately 1.01. The evidence supports a plausible cascade involving wet antecedent conditions, steep terrain, slope failure, and channel obstruction by sediment and woody debris. Priority actions include continuous rainfall–water-level monitoring, channel surveys, sediment management, targeted slope and riparian rehabilitation, and locally calibrated early warning.

Keywords hydrological performance; flash flood; landslide; hydrogeomorphic hazard; channel capacity; Warjori Watershed

1. Pendahuluan

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan satuan bentang lahan yang mengintegrasikan proses iklim, tanah, vegetasi, topografi, geologi, dan aktivitas manusia ke dalam satu sistem hidrologis. Kinerja hidrologis DAS tercermin pada kemampuan kawasan tangkapan untuk menyimpan dan melepaskan air, mengatur debit, membatasi erosi-sedimentasi, serta mempertahankan kapasitas alur. Dalam konteks Indonesia, pemantauan dan evaluasi pengelolaan DAS diatur antara lain melalui Permenhut P.61/Menhut-II/2014; namun, indeks regulatif tersebut tidak serta-merta dapat diperlakukan sebagai indeks risiko bencana tanpa analisis paparan dan kerentanan. Perubahan kondisi lahan dan alur dapat mempercepat respons aliran dan meningkatkan konsekuensi kejadian hidrometeorologi (Asdak, 2023; Sugianto et al., 2022).

Risiko banjir bandang dan longsor pada DAS pegunungan umumnya terbentuk melalui interaksi antara hujan intensitas tinggi, hujan pendahulu, kondisi lereng, sifat tanah, tutupan lahan, dan gangguan antropogenik. Hujan pendahulu meningkatkan kelembapan tanah dan tekanan air pori, sedangkan hujan intensitas tinggi mempercepat limpasan permukaan dan dapat memicu kegagalan lereng. Dalam sistem hulu pegunungan, material longsor dapat masuk ke alur sungai, menyumbat kapasitas efektif alur, lalu menghasilkan banjir bandang atau aliran campuran air-sedimen-kayu yang bergerak cepat ke wilayah hilir (Borga et al., 2014; Gariano & Guzzetti, 2016; Segoni et al., 2018).

DAS pegunungan tropis di Papua Barat dicirikan oleh relief kuat, curah hujan tinggi, jaringan pengamatan yang relatif terbatas, dan ketergantungan masyarakat pada koridor sungai serta jalan pegunungan. Meskipun demikian, kajian berbasis kejadian yang menghubungkan konteks hujan, kondisi biofisik, perubahan kapasitas alur, dan suplai material longsor masih terbatas. Kesenjangan ini penting karena proses banjir bandang dan longsor pada sistem hulu dapat berkembang cepat dan tidak selalu dapat dijelaskan hanya oleh luas tutupan hutan atau satu indikator tunggal.

Pada 16 Mei 2025 terjadi banjir bandang dan tanah longsor di Kampung Jim, Distrik Catubouw, Kabupaten Pegunungan Arfak. Laporan Monitoring dan Evaluasi Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki (2025) mencatat korban jiwa, gangguan akses jalan, serta perubahan kondisi alur dan lereng di sekitar lokasi. Peristiwa tersebut menyediakan kasus penting untuk mengevaluasi bagaimana konteks hujan, topografi, kondisi lahan, suplai sedimen, dan kapasitas alur berinteraksi pada DAS pegunungan yang masih didominasi hutan.

Data penutupan lahan tahun 2024 menunjukkan dominasi hutan lahan kering primer sebesar 65,95% dan hutan lahan kering sekunder sebesar 20,21% (Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki, 2025). Pada saat yang sama, agregat kelas Agak Kritis, Kritis, dan Sangat Kritis mencapai 95,28%. Angka agregat tersebut digunakan sebagai statistik deskriptif untuk membaca tekanan struktural lahan dan tidak disamakan dengan Persentase Lahan Kritis formal dalam pedoman evaluasi DAS. Kontras ini menunjukkan bahwa dominasi hutan tidak cukup, secara tersendiri, untuk menjelaskan respons hidrogeomorfik pada lanskap yang curam dan rentan terhadap gangguan lokal.

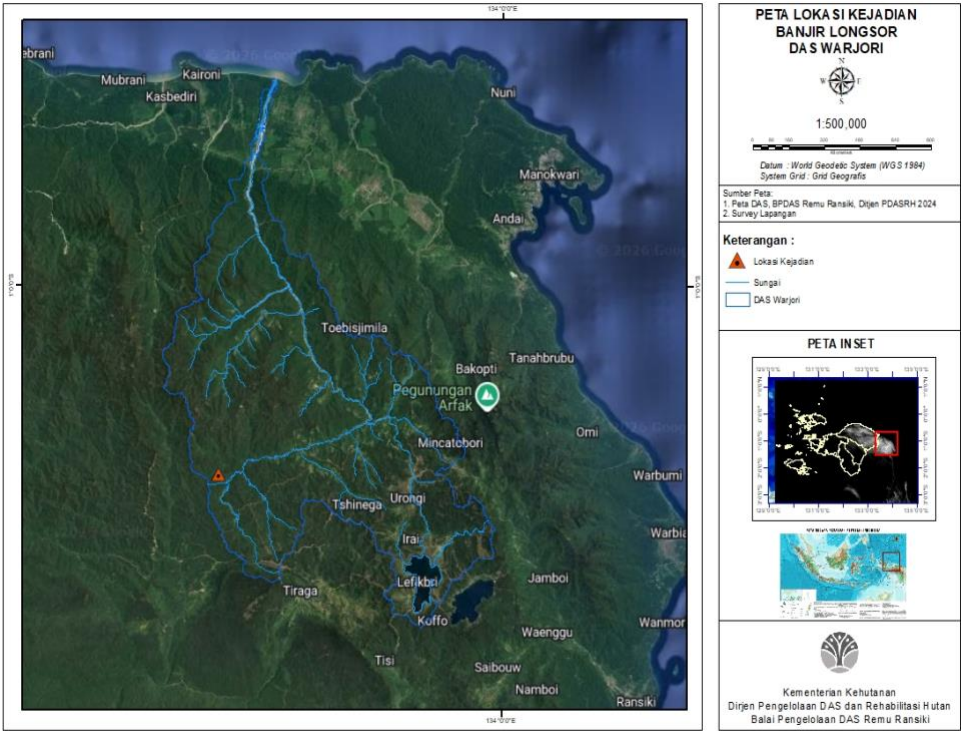
Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi diagnostik berbasis kejadian yang menghubungkan tiga kelompok bukti: konteks hidrometeorologi menjelang kejadian, kondisi biofisik dan penutup lahan DAS, serta kapasitas alur dan suplai material longsor. Kontribusi ilmiahnya bukan sekadar menggabungkan banyak indikator, tetapi menguji secara kritis apakah dominasi hutan dapat berjalan bersamaan dengan margin kapasitas alur yang terbatas dan kerentanan hidrogeomorfik pada DAS pegunungan tropis Papua Barat. Penelitian juga menyatakan ketidakpastian data secara eksplisit dan membedakan bukti yang terukur, data sekunder, serta informasi yang masih berupa laporan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi secara diagnostik kinerja hidrologis DAS Warjori dan menyusun sintesis bukti bahaya banjir bandang–longsor melalui analisis curah hujan yang tersedia, debit dan kapasitas alur, lereng, satuan tanah, penutupan lahan, lahan kritis, geometri longsor, serta gangguan antropogenik yang dilaporkan. Karena paparan penduduk, aset, dan kerentanan sosial tidak dianalisis secara kuantitatif, penelitian ini tidak mengklaim sebagai penilaian risiko bencana lengkap. Hasilnya diarahkan untuk mendukung prioritas monitoring, rehabilitasi DAS, pengendalian sedimen, dan mitigasi berbasis lokasi.

2. Metode

2.1. Tempat dan waktu penelitian

Penelitian dilaksanakan pada wilayah DAS Warjori, Provinsi Papua Barat, dengan fokus analisis kejadian pada Kampung Jim, Distrik Catubouw, Kabupaten Pegunungan Arfak, yang terdampak banjir bandang dan tanah longsor pada 16 Mei 2025. Kajian menggunakan desain deskriptif-kuantitatif berbasis kejadian (event-based diagnostic assessment), analisis spasial sekunder, analisis dokumen, dan interpretasi dokumentasi pascakejadian. Unit analisis mencakup: (1) konteks hujan pada tanggal yang tersedia; (2) kondisi biofisik DAS; (3) margin kapasitas alur; (4) suplai material longsor; dan (5) tekanan antropogenik yang dilaporkan.

Untuk menjaga keterlacakan, hanya metadata yang tersedia pada berkas sumber digunakan. Koordinat presisi titik kejadian, luas delineasi final, CRS/datum, resolusi beberapa layer, serta rincian algoritma derivasi debit dan kapasitas alur belum terdokumentasi lengkap dalam berkas yang tersedia. Nilai yang belum terverifikasi tidak diaproksimasi. Kekurangan metadata tersebut dinyatakan sebagai keterbatasan dan harus dilengkapi dari layer serta lembar kerja asal sebelum naskah diajukan untuk publikasi.



Gambar 1. Peta lokasi DAS Warjori dan lokasi kejadian banjir bandang–longsor Kampung Jim

Sumber: BPDAS Remu Ransiki dan Direktorat Jenderal Pengelolaan DAS dan Rehabilitasi Hutan (2024), hasil survei lapangan tahun 2025, serta citra dasar Google Satellite; diolah. Sistem Koordinat Geografis WGS 1984 (EPSG:4326), datum WGS 1984, skala peta 1:500.000, dengan resolusi spasial mengikuti resolusi layer sumber.

2.2. Sumber Data dan Fungsi Analisis

Data mencakup curah hujan harian terestimasi, penutupan lahan, lahan kritis, DEM/lereng/elevasi, satuan tanah, nilai debit dan kapasitas alur dari analisis dokumen, dokumentasi pascakejadian, serta informasi aktivitas manusia. Tabel 1 memisahkan fungsi analisis dari status metadata dan keterbatasan setiap sumber agar reproduksibilitas dan tingkat keyakinan interpretasi dapat ditelusuri.

Tabel 01. Sumber data, metadata teknis, fungsi analisis, dan status verifikasi

Jenis data	Tahun/periode	Sumber	Metadata teknis/status verifikasi	Fungsi Analisis
Curah hujan harian	11, 14, 16 Mei 2025	NASA POWER Data Access Viewer	Tiga tanggal tidak berurutan; titik ekstraksi/versi parameter perlu dicatat; belum tervalidasi pos hujan lokal	Konteks hujan di sekitar kejadian
Penutupan lahan	2024	BPKHTL Wilayah XVII/BPDAS Remu Ransiki	Produk kelas resmi; bukan klasifikasi baru penulis; CRS, resolusi, dan akurasi produk perlu dilengkapi	Komposisi penutup lahan
Lahan kritis	Tahun layer perlu dipastikan	BPDAS Remu Ransiki	Berbeda waktu dengan kejadian; metadata layer dan metode pembentukan kelas perlu diverifikasi	Tekanan struktural lahan; interpretasi deskriptif
DEM, lereng, elevasi	Kajian 2025/produk asal	Kajian Karakteristik DAS Warjori/BPDAS Remu Ransiki	Resolusi DEM, CRS/datum, unit slope, dan reklasifikasi belum terdokumentasi lengkap	Konteks topografi
Satuan tanah	Kajian 2025/produk asal	Kajian Karakteristik DAS Warjori/BPDAS Remu Ransiki	Satuan peta; bukan pengukuran langsung infiltrasi, regolit, atau tekanan air pori	Konteks pedologis

Jenis data	Tahun/periode	Sumber	Metadata teknis/status verifikasi	Fungsi Analisis
Debit dan kapasitas alur	2025	Desk analysis DAS Warjori/BPDAS Remu Ransiki	Formula derivasi Qp/Qc, geometri, kekasaran, dan validasi belum tersedia lengkap	Rasio penyaringan dan sensitivitas kapasitas
Dokumentasi lapangan	Pascakejadian Mei 2025	Observasi lapangan/kamera/drone	Digunakan kualitatif; jumlah titik, koordinat, dan desain sampling perlu dilengkapi	Bukti kontekstual perubahan lereng/alur

2.3. Analisis Curah Hujan

Curah hujan dianalisis menggunakan tiga estimasi harian NASA POWER yang tersedia untuk 11, 14, dan 16 Mei 2025. Nilai harian dibaca menggunakan kategori hujan BMKG yang digunakan dalam naskah sumber, yaitu hujan lebat 50–100 mm hari⁻¹, sangat lebat 100–150 mm hari⁻¹, dan ekstrem >150 mm hari⁻¹. Nilai 123,44 mm hari⁻¹ karena itu disebut sangat lebat, bukan ekstrem.

Ketiga tanggal tidak membentuk seri harian kontinu. Oleh sebab itu, jumlah 267,64 mm hanya dihitung sebagai total deskriptif tiga observasi yang tersedia ($S_3 = P_{11} + P_{14} + P_{16}$) dan tidak diperlakukan sebagai indeks hujan pendahulu 3-, 5-, 7-, atau 10-hari, ambang longsor, maupun akumulasi sebelum kejadian. Analisis kejadian yang lebih kuat memerlukan seri harian kontinu dan validasi terhadap pos hujan BMKG atau produk satelit lain. Keterbatasan ini dipertahankan dalam interpretasi hasil.

2.4. Analisis Tutupan Lahan, Lahan Kritis, Lereng, dan Tanah

Penutupan lahan dianalisis dari komposisi kelas pada produk resmi BPKHTL Wilayah XVII/BPDAS Remu Ransiki tahun 2024; penelitian ini tidak mengklaim melakukan klasifikasi citra baru. Proporsi hutan primer dan sekunder digunakan sebagai indikator komposisi penutup lahan. Data lahan kritis dianalisis sebagai distribusi kelas resmi yang tersedia. Agregat Agak Kritis + Kritis + Sangat Kritis digunakan sebagai statistik deskriptif tambahan, bukan sebagai Persentase Lahan Kritis formal menurut Permenhut P.61/Menhut-II/2014.

Peta lereng digunakan untuk membaca konteks topografi lokasi tanpa mengklaim distribusi luas kelas lereng apabila metadata DEM, resolusi, dan prosedur reklasifikasi belum lengkap. Satuan peta tanah digunakan sebagai konteks mekanistik, bukan sebagai pengganti pengukuran infiltrasi, konduktivitas hidraulik, tekstur, kedalaman regolit, atau tekanan air pori di lapangan. Selain itu, penutupan lahan, lahan kritis, lereng, dan erosi dapat berbagi informasi pembentuk; karena itu hubungan antaraktor tidak ditafsirkan sebagai bukti kausal independen.

2.5. Analisis Kapasitas Hidrologis Sungai

Kapasitas hidrologis alur dianalisis sebagai indikator penyaringan menggunakan nilai sekunder debit puncak (Qp) dan kapasitas geometrik alur (Qc) yang tersedia dalam analisis dokumen. Karena formula derivasi Qp, geometri penampang, kemiringan energi, koefisien kekasaran, dan prosedur penetapan Qc belum terdokumentasi lengkap, nilai tersebut tidak diperlakukan sebagai hasil pemodelan hidraulika yang tervalidasi. Rasio dasar dihitung sebagai:

$R^c = Q_p / Q_c$

dengan R^c adalah rasio penyaringan kapasitas, Qp debit puncak, dan Qc kapasitas geometrik alur. Untuk menguji kepekaan terhadap penyempitan atau penyumbatan, dilakukan analisis sensitivitas sederhana dengan $Q_{c,ef} = (1 - r)Q_c$ dan $R^{c,ef} = Q_p/Q_{c,ef}$ untuk skenario penurunan kapasitas $r = 10\%$, 20% , dan 25% . Skenario ini bukan hasil observasi pascakejadian, melainkan uji sensitivitas untuk menunjukkan konsekuensi perubahan kapasitas efektif alur.

2.6. Estimasi geometri longsor

Estimasi geometri longsor ditelaah menggunakan hubungan $V_l = A_l \times \bar{d}$. Namun, berkas sumber telah menyediakan baik luas sekitar 2.400 m² maupun volume sekitar 3.600 m³. Karena itu, penelitian ini tidak menyajikan volume tersebut sebagai perhitungan independen; kedua angka hanya diuji konsistensi internal melalui kedalaman rata-rata tersirat.



$$\bar{d} = V_1 / A_1$$

Dengan V_1 sekitar 3.600 m³ dan A_1 sekitar 2.400 m², kedalaman rata-rata tersirat adalah sekitar 1,5 m. Nilai luas, volume, dan kedalaman tetap diperlakukan sebagai estimasi awal karena belum disertai DEM beda-waktu, survei topografi rinci, atau dokumentasi metode pengukuran yang lengkap.

2.7. Kerangka Sintesis Bukti dan Ketidakpastian

Penelitian tidak menggunakan skor risiko ad hoc. Skor total 1–5 dan penjumlahan parameter dihapus karena ambang tiap parameter, bobot, independensi indikator, serta hubungan dengan paparan dan kerentanan belum tervalidasi. Sebagai pengganti, setiap temuan disintesis dalam matriks bukti yang mencatat sumber, peran interpretatif, keterbatasan, dan tingkat keyakinan.

Tingkat keyakinan ditetapkan secara transparan sebagai tinggi, sedang, rendah, atau tidak dinilai. Penetapan didasarkan pada keterlacakan sumber, kesesuaian waktu dengan kejadian, kejelasan metode derivasi, dan keberadaan verifikasi independen. Kategori ini bukan probabilitas statistik dan bukan klasifikasi risiko resmi.

Karena paparan penduduk/aset dan kerentanan sosial-ekonomi tidak dianalisis, hasil penelitian disebut sintesis bahaya hidrogeomorfik dan evaluasi diagnostik kinerja hidrologis. Istilah risiko hanya digunakan untuk membahas implikasi pengelolaan secara umum, bukan sebagai keluaran kuantitatif penelitian.

Tabel 02. Kriteria tingkat keyakinan bukti yang digunakan dalam sintesis

Tingkat keyakinan	Kriteria sumber dan metode	Penggunaan interpretative
Tinggi	Sumber primer/terlacak; waktu sesuai kejadian; metode eksplisit; ada verifikasi independen	Dapat menopang temuan utama dengan caveat minimal
Sedang	Sumber resmi/sekunder yang relevan; sebagian metadata atau validasi belum lengkap	Mendukung mekanisme atau pola, tetapi ketidakpastian harus dinyatakan
Rendah	Informasi laporan, asumsi, atau metode derivasi tidak terdokumentasi memadai	Hanya sebagai hipotesis/faktor potensial; tidak untuk atribusi kausal
Tidak dinilai	Data tidak tersedia atau tidak cukup untuk penilaian	Tidak ditarik Kesimpulan

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Hasil

3.1.1. Kejadian banjir bandang dan tanah longsor di Kampung Jim

Peristiwa 16 Mei 2025 ditafsirkan sebagai kejadian hidrogeomorfik berantai berdasarkan keterkaitan temporal dan spasial antara hujan tinggi pada tanggal yang tersedia, kondisi lereng, bukti longsor, serta perubahan alur yang dilaporkan. Pola interaksi antara hujan, kegagalan lereng, suplai sedimen, dan respons alur tersebut sejalan dengan karakteristik banjir bandang pada sistem hulu pegunungan (Borga et al., 2014). Interpretasi ini bersifat diagnostik dan tidak dimaksudkan sebagai atribusi kausal tunggal.

Dokumentasi pascakejadian menunjukkan bekas longsor pada lereng, perubahan morfologi alur, dan keberadaan sedimen serta kayu pada sistem sungai. Secara mekanistik, masuknya sedimen dan material kayu ke alur dapat mengurangi kapasitas efektif serta memperbesar energi aliran campuran air–sedimen (Borga et al., 2014). Namun, besarnya kontribusi masing-masing proses pada kejadian Warjori belum dapat dipisahkan tanpa survei penampang, inventaris sedimen, dan data waktu-kejadian yang lebih rinci.





Gambar 2. Kondisi pascakejadian banjir bandang dan tanah longsor di Kampung Jim

Sumber: Dokumentasi lapangan/Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki (2025).
Dokumentasi digunakan sebagai bukti kontekstual, bukan validasi kuantitatif.

3.1.2. Curah hujan sebagai pemicu utama

Estimasi curah hujan NASA POWER pada tanggal yang tersedia menunjukkan 92,04 mm hari⁻¹ pada 11 Mei 2025, 123,44 mm hari⁻¹ pada 14 Mei 2025, dan 52,16 mm hari⁻¹ pada 16 Mei 2025 (NASA POWER, 2026). Berdasarkan klasifikasi intensitas hujan yang digunakan, nilai tersebut masing-masing termasuk hujan lebat, sangat lebat, dan hujan lebat pada hari kejadian (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2022).

Tabel 03. Estimasi curah hujan pada tiga tanggal yang tersedia di sekitar kejadian.

Tanggal	Curah hujan (mm hari ⁻¹)	Interpretasi
11 Mei 2025	92,04	Hujan lebat menurut kategori yang digunakan
14 Mei 2025	123,44	Hujan sangat lebat menurut kategori yang digunakan
16 Mei 2025	52,16	Hujan lebat pada hari kejadian
Jumlah tiga tanggal tersedia	267,64	Statistik deskriptif; bukan akumulasi hujan pendahulu kontinu

Jumlah tiga observasi sebesar 267,64 mm menunjukkan konteks periode basah pada tanggal-tanggal yang tersedia, tetapi tidak boleh ditafsirkan sebagai akumulasi hujan pendahulu kontinu karena data 12, 13, dan 15 Mei serta hari-hari sebelumnya tidak tersedia dalam seri yang dianalisis. Penentuan ambang hujan pemicu longsor memerlukan seri kontinu dan kalibrasi terhadap kejadian lokal (Segoni et al., 2018; Giannecchini et al., 2024). Dengan demikian, mekanisme kejenuhan tanah tetap merupakan hipotesis yang masuk akal secara proses, tetapi belum diuji melalui indeks hujan pendahulu, kelembapan tanah, atau tekanan air pori.

3.1.3. Respons Hidrologis dan Kapasitas Sungai

Nilai sekunder dari analisis dokumen Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki (2025) menunjukkan debit rata-rata 21,036 m³ detik⁻¹, debit puncak 52,590 m³ detik⁻¹, dan kapasitas geometrik alur 64,800 m³ detik⁻¹. Rasio dasar Qp/Qc adalah 0,812 (dibulatkan 0,81). Penggunaan perbandingan debit dan kapasitas alur sebagai indikator awal konsisten dengan prinsip analisis hidrologi dan hidraulika saluran (Chow et al., 1988). Karena metode derivasi Qp dan Qc belum tersedia secara lengkap, hasil ini diperlakukan sebagai penyaringan, bukan klasifikasi kinerja hidraulik final.

Tabel 04. Nilai debit, kapasitas alur, dan analisis sensitivitas kapasitas efektif

Parameter/skenario	Nilai	Status interpretasi
Debit rata-rata	21,036 m ³ detik ⁻¹	Nilai sekunder; metode derivasi belum terdokumentasi lengkap
Debit puncak, Qp	52,590 m ³ detik ⁻¹	Nilai sekunder; dipakai untuk penyaringan
Kapasitas geometrik, Qc	64,800 m ³ detik ⁻¹	Nilai sekunder; bukan kapasitas efektif pascakejadian

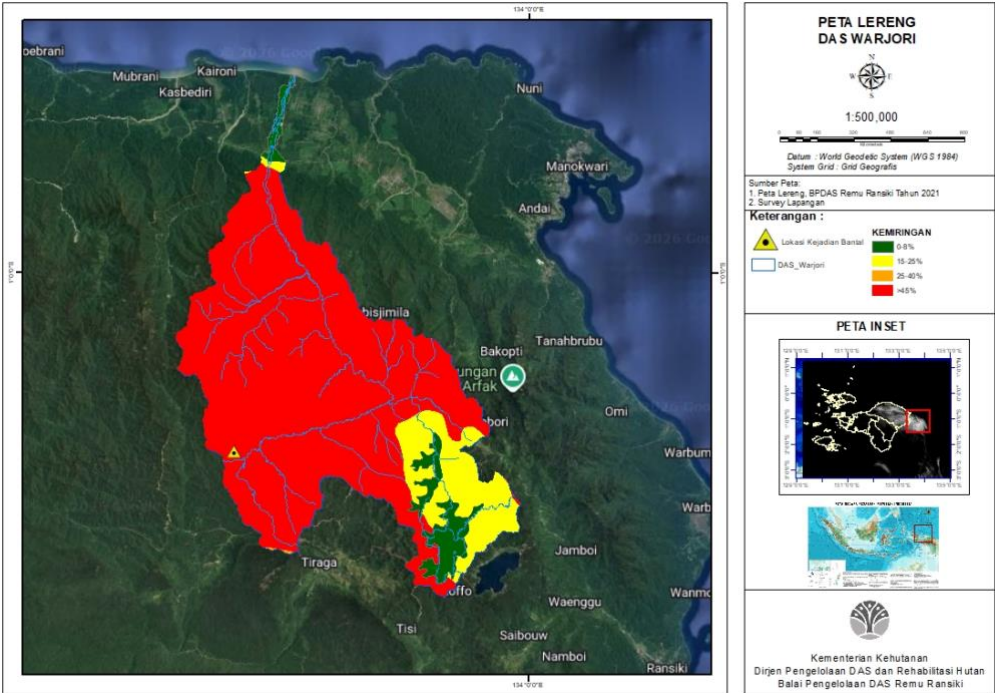


Parameter/skenario	Nilai	Status interpretasi
Rasio dasar Qp/Qc	0,812 (≈0,81)	Margin kapasitas terbatas; bukan klasifikasi risiko
Skenario Qc efektif turun 10%	Qc,ef = 58,320 m ³ detik ⁻¹ ; rasio ≈0,90	Uji sensitivitas; bukan kondisi teramati
Skenario Qc efektif turun 20%	Qc,ef = 51,840 m ³ detik ⁻¹ ; rasio ≈1,01	Debit puncak melampaui kapasitas scenario
Skenario Qc efektif turun 25%	Qc,ef = 48,600 m ³ detik ⁻¹ ; rasio ≈1,08	Kelebihan terhadap kapasitas skenario meningkat

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pengurangan kapasitas sebesar 10% menaikkan rasio menjadi sekitar 0,90; pengurangan 20% menghasilkan rasio sekitar 1,01; dan pengurangan 25% menghasilkan rasio sekitar 1,08. Secara hidraulik, penyempitan penampang dan peningkatan hambatan aliran dapat menurunkan kapasitas efektif alur (Chow et al., 1988). Berdasarkan angka dasar Warjori, penurunan kapasitas efektif sekitar seperlima sudah cukup untuk membuat debit puncak melampaui kapasitas skenario. Hasil ini tidak membuktikan bahwa pengurangan 20% benar-benar terjadi, tetapi menunjukkan pentingnya survei pascakejadian terhadap penampang, endapan, kayu, dan penyempitan lokal.

3.1.4. Kondisi topografi dan kemiringan lereng

Peta yang tersedia menunjukkan relief berbukit hingga pegunungan dan mengindikasikan lereng curam—sangat curam di sekitar wilayah terdampak. Kemiringan lereng merupakan salah satu pengontrol utama gaya pendorong dan ketidakstabilan massa tanah (Gariano & Guzzetti, 2016; Standar Nasional Indonesia, 2017). Namun, karena metadata DEM, resolusi, unit kemiringan, dan prosedur reklasifikasi belum terdokumentasi lengkap, penelitian ini tidak menyatakan proporsi luas tiap kelas lereng atau dominasi kuantitatif kelas tertentu. Interpretasi dibatasi pada peran mekanistik kemiringan terhadap percepatan aliran dan kestabilan lereng.



Gambar 3. Peta kemiringan lereng dan ketinggian DAS Warjori.

Tabel 05. Kelas lereng dan interpretasi mekanistik dalam analisis kejadian

Kelas lereng	Kemiringan (%)	Penggunaan dalam analisis	Interpretasi mekanistik
Datar	0–8	Kelas referensi	Energi gravitasi dan percepatan limpasan relatif lebih rendah

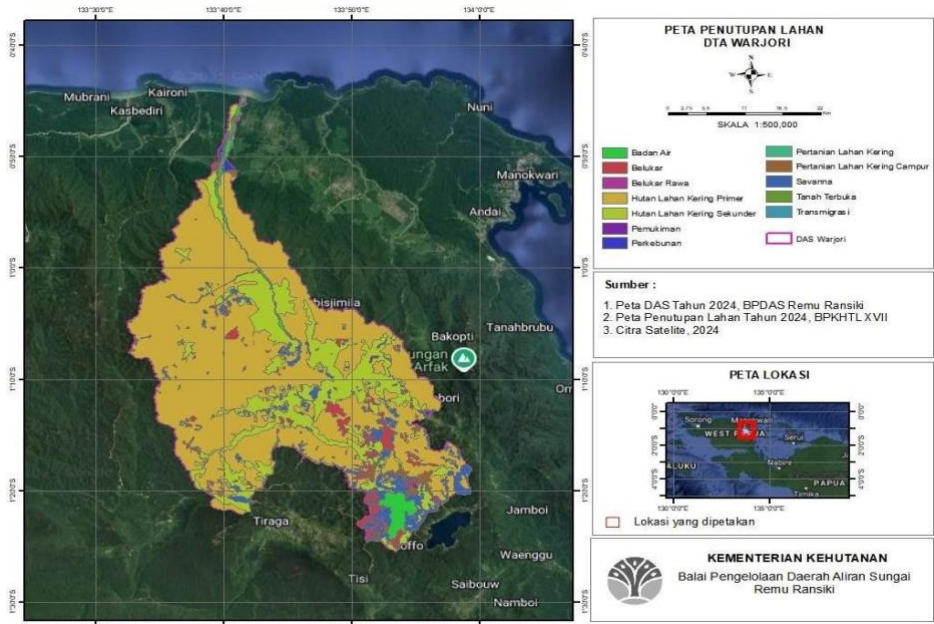


Sumber: Kajian Karakteristik DAS Warjori/Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki (2025).

Angka luas longsor sekitar 2.400 m² dan volume sekitar 3.600 m³ menghasilkan kedalaman rata-rata tersirat 1,5 m. Konsistensi aritmetika ini tidak menggantikan validasi geometri. Tanpa batas poligon longsor yang terdokumentasi, DEM sebelum–sesudah, atau survei penampang, volume tetap merupakan estimasi awal. Meski demikian, material longsor yang terhubung ke jaringan sungai dapat meningkatkan suplai sedimen dan peluang penyempitan alur pada sistem hulu (Borga et al., 2014).

3.1.6. Kontras Tutupan Hutan dan Kelas Lahan Kritis

Komposisi penutupan lahan menunjukkan hutan lahan kering primer 65,95% dan hutan lahan kering sekunder 20,21%, sehingga keduanya mencakup 86,16% wilayah DAS (Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki, 2025). Dominasi hutan secara teoritis mendukung intersepsi, perlindungan permukaan, dan stabilitas tanah (Asdak, 2023), tetapi tidak menjamin bahwa seluruh unit lahan memiliki respons hidrologis yang sama, khususnya pada lereng curam, koridor alur, dan lokasi yang terganggu; respons DAS juga dipengaruhi konfigurasi perubahan penutup lahan dan konektivitas hidrologisnya (Banjara et al., 2024).



Gambar 05. Peta penutupan lahan dan peta lahan kritis DAS Warjori

Tabel 07. Distribusi kelas lahan kritis dan interpretasi agregat

Kategori lahan kritis	Persentase (%)	Interpretasi
Agak Kritis	81,86	Kelas dominan dalam produk yang tersedia; bukan otomatis bukti kerusakan berat
Kritis	13,27	Menunjukkan unit yang memerlukan perhatian rehabilitasi
Potensial Kritis	1,97	Tekanan dapat meningkat bila pengelolaan memburuk
Sangat Kritis	0,15	Prioritas verifikasi dan rehabilitasi pada unit terkait
Tidak Kritis	2,75	Kondisi relatif lebih stabil menurut produk yang tersedia
Agak Kritis + Kritis + Sangat Kritis	95,28	Statistik agregat deskriptif; bukan Persentase Lahan Kritis formal

Sumber: Analisis Peta Penutupan Lahan BPKHTL Wilayah XVII Manokwari Tahun 2024, Peta Batas DAS BPDAS Remu Ransiki Tahun 2024, dan citra satelit tahun 2024.

Agregat Agak Kritis + Kritis + Sangat Kritis sebesar 95,28% merupakan statistik deskriptif yang menunjukkan luasnya kelas tekanan lahan dalam produk yang tersedia (Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki, 2025). Angka tersebut tidak disamakan dengan indikator formal



Persentase Lahan Kritis, yang memiliki definisi operasional tersendiri dalam pedoman evaluasi DAS (Kementerian Kehutanan Republik Indonesia, 2014). Kelas lahan kritis juga dapat dibentuk dari variabel yang berkaitan dengan lereng, tutupan, erosi, produktivitas, dan pengelolaan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2023). Karena itu, kontras antara tutupan hutan dan lahan kritis harus dibaca sebagai sinyal untuk investigasi unit lahan, bukan bukti kausal yang independen.

3.1.7. Pengaruh Aktivitas Manusia

Laporan monitoring lapangan Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki (2025) mengindikasikan adanya aktivitas penambangan emas tanpa izin pada bagian tertentu DAS. Informasi tersebut diperlakukan sebagai tekanan antropogenik yang dilaporkan, bukan sebagai penyebab bencana yang telah dibuktikan. Klaim kausal memerlukan bukti lokasi, waktu, luas gangguan, perubahan tutupan sebelum–sesudah, hubungan dengan jaringan alur, dan dokumentasi institusional yang dapat diverifikasi.

Secara mekanistik, penggalian dan pembukaan lahan tanpa kaidah konservasi dapat meningkatkan erosi, mobilisasi sedimen, perubahan morfologi alur, dan kerentanan lereng (Diringer et al., 2020; Etui, 2024). Namun, penerapan mekanisme umum tersebut pada DAS Warjori tetap bersifat hipotesis sampai data spasial dan temporal lokasi tambang tersedia. Karena itu, aktivitas penambangan tidak digunakan sebagai komponen skor atau sebagai penjelas tunggal kejadian.

3.1.8. Sintesis Bukti Pemicu dan Faktor Penguat

Matriks bukti banjir bandang menunjukkan bahwa konteks hujan, margin kapasitas alur, topografi, dan suplai debris saling mendukung interpretasi rangkaian hidrogeomorfik. Penggunaan sintesis beberapa kelompok bukti sesuai dengan pemahaman bahwa banjir bandang hulu terbentuk melalui interaksi hujan, topografi, sedimen, dan kondisi alur (Borga et al., 2014). Tingkat keyakinan berbeda antarindikator karena mutu sumber dan keterlacakan metode tidak sama. Tidak ada penjumlahan skor total.

Tabel 08. Matriks bukti terkait bahaya banjir bandang

Indikator	Bukti pada DAS Warjori	Peran interpretatif	Keyakinan
Curah hujan tanggal tersedia	92,04; 123,44; 52,16 mm hari ⁻¹ pada 11, 14, 16 Mei; seri tidak kontinu	Mendukung konteks periode basah/hujan tinggi, bukan indeks antecedent formal	Sedang
Rasio Qp/Qc	Nilai sekunder 0,81; metode derivasi belum lengkap	Menunjukkan margin kapasitas terbatas sebagai indikator penyaringan	Rendah–sedang
Sensitivitas kapasitas	Penurunan Qc efektif 20% menghasilkan rasio ≈1,01	Menunjukkan kerentanan hasil terhadap penyempitan/penyumbatan	Sedang
Topografi	Relief pegunungan; lereng curam terindikasi dekat lokasi	Mendukung respons aliran cepat dan konektivitas sedimen	Sedang
Debris/material longsor	Dokumentasi perubahan alur, sedimen, dan kayu	Mendukung mekanisme pengurangan kapasitas efektif	Sedang

Untuk longsor, bukti paling relevan berasal dari konteks hujan pada tanggal yang tersedia, kemiringan lereng di sekitar lokasi, dokumentasi kegagalan lereng, dan geometri awal. Pemilihan kelompok bukti tersebut konsisten dengan kajian ambang hujan dan pengontrol kejadian longsor (Segoni et al., 2018; Gariano & Guzzetti, 2016). Satuan tanah serta gangguan antropogenik diperlakukan lebih hati-hati karena pengukuran sifat tanah dan bukti kausal lokasi gangguan belum memadai.



Tabel 09. Matriks bukti terkait bahaya longsor

Indikator	Bukti pada DAS Warjori	Peran interpretatif	Keyakinan
Curah hujan tanggal tersedia	Hujan lebat–sangat lebat pada tiga tanggal yang tersedia	Konteks kebasahan; belum membentuk ambang longsor	Sedang
Kemiringan lereng	Lereng curam–sangat curam terindikasi di sekitar lokasi	Mendukung peningkatan gaya pendorong	Sedang
Satuan tanah/regolit	Kompleks Podsolik; regolit dangkal dilaporkan	Hipotesis kerentanan; sifat hidrolik belum diukur	Rendah–sedang
Geometri longsor	±2.400 m ² dan ±3.600 m ³ ; kedalaman tersirat ±1,5 m	Mendukung adanya suplai material besar; geometri masih awal	Sedang
Gangguan antropogenik	Aktivitas tambang/penggalian dilaporkan	Faktor potensial lokal; hubungan kausal belum dibuktikan	Rendah

3.2. Pembahasan

3.2.1. Mekanisme Rangkaian Hidrogeomorfik Banjir–Longsor

Hasil penelitian mendukung interpretasi bahwa kejadian di Kampung Jim merupakan rangkaian hidrogeomorfik yang masuk akal, bukan sekadar banjir air. Dalam rangkaian ini, kondisi basah pada periode menjelang kejadian dapat meningkatkan respons limpasan dan kelembapan lereng; kegagalan lereng kemudian memasok sedimen, batu, dan kayu ke alur; material tersebut berpotensi memperkecil kapasitas efektif dan mempercepat luapan. Urutan proses ini konsisten dengan dokumentasi yang tersedia, tetapi kekuatan kontribusi setiap tahapan belum dapat dikuantifikasi.

Interpretasi tersebut sejalan dengan literatur tentang respons hidrogeomorfik pada sistem hulu, di mana banjir bandang dan aliran debris berkembang cepat serta dipengaruhi interaksi hujan, topografi, suplai sedimen, dan perubahan alur (Borga et al., 2014). Kekuatan studi Warjori adalah penyatuan bukti kejadian, sedangkan keterbatasannya adalah belum tersedianya seri hujan kontinu, survei hidrolik rinci, dan rekonstruksi waktu proses.

3.2.2. Peran Hujan Pendahulu dan Ambang Longsor

Nilai 92,04; 123,44; dan 52,16 mm hari⁻¹ menunjukkan bahwa beberapa tanggal di sekitar kejadian mengalami hujan tinggi hingga sangat lebat. Namun, karena seri tidak kontinu, penelitian ini tidak dapat menghitung ambang hujan pendahulu atau menyatakan 267,64 mm sebagai akumulasi pra-kejadian. Hipotesis kejenuhan tanah tetap relevan secara mekanistik, tetapi harus diuji dengan data hujan harian kontinu, kelembapan tanah, atau indikator hidrologis lain (Segoni et al., 2018; Giannecchini et al., 2024).

NASA POWER berguna sebagai sumber eksploratif pada wilayah dengan keterbatasan stasiun, tetapi akurasi kejadian harian ekstrem perlu diuji terhadap pengamatan lokal atau produk independen (Dharmayasa et al., 2022; NASA POWER, 2026). Untuk pengembangan peringatan dini, penelitian lanjutan perlu membangun seri kontinu dan mengkalibrasi ambang berdasarkan kejadian lokal; data dalam penelitian ini belum cukup untuk menetapkan ambang operasional.

3.2.3. Kontras Tutupan Hutan dan Lahan Kritis

Temuan penting penelitian adalah kontras antara tutupan hutan primer–sekunder sebesar 86,16% dan agregat kelas Agak Kritis hingga Sangat Kritis sebesar 95,28%. Kontras tersebut tidak otomatis merupakan paradoks kausal karena kedua indikator memiliki definisi, tahun data, skala, dan kemungkinan variabel pembentuk yang berbeda. Kelas lahan kritis dapat mencerminkan pengaruh lereng, erosi, produktivitas, dan pengelolaan, sehingga nilai tinggi dapat muncul pada wilayah yang tetap berhutan.

Implikasinya, rehabilitasi DAS tidak cukup dirumuskan sebagai penanaman pohon secara umum. Prioritas perlu ditetapkan pada unit lahan dan koridor proses: lereng curam dekat alur, lokasi bekas longsor, tebing tererosi, zona akumulasi sedimen, riparian yang terganggu, serta lokasi tekanan antropogenik yang telah diverifikasi. Pendekatan tersebut juga mengurangi risiko double counting antarindikator dalam penetapan prioritas.



3.2.4. Kapasitas Efektif Sungai dan Pentingnya Pengelolaan Sedimen

Rasio dasar Q_p/Q_c sebesar 0,81 menunjukkan margin kapasitas yang terbatas berdasarkan nilai sekunder yang tersedia, tetapi tidak cukup untuk menyatakan tingkat risiko atau keamanan alur. Analisis sensitivitas memperlihatkan bahwa penurunan kapasitas efektif 20% akan menghasilkan rasio sekitar 1,01. Karena penyumbatan lokal oleh sedimen, batu, dan kayu dapat mengubah kapasitas dengan cepat, survei penampang pascakejadian merupakan kebutuhan utama.

Pengelolaan sedimen perlu mencakup inventarisasi titik penyempitan, pemetaan endapan, dokumentasi kayu/debris, pemantauan elevasi dasar, dan penilaian konektivitas sedimen dari lereng ke alur. Intervensi fisik seperti pembersihan material atau bangunan pengendali hanya dapat dipilih setelah evaluasi teknis, dampak ekologis, dan keselamatan; rekomendasi ini tidak dimaksudkan sebagai desain struktur tanpa survei.

3.2.5. Implikasi Pengelolaan DAS dan Mitigasi Bencana

Mitigasi di DAS Warjori memerlukan pendekatan berlapis. Pertama, jaringan monitoring perlu menggabungkan curah hujan kontinu, tinggi muka air, dokumentasi kejadian, dan pelaporan masyarakat. Data penelitian ini belum cukup untuk menetapkan ambang operasional seperti satu nilai mm hari^{-1} ; ambang peringatan harus dikalibrasi menggunakan seri lokal dan riwayat kejadian. Kedua, rehabilitasi perlu diarahkan pada zona prioritas yang telah diverifikasi melalui overlay spasial dan survei: lokasi bekas longsor, lereng curam yang terhubung ke alur, sempadan sungai, titik akumulasi sedimen, dan area gangguan antropogenik. Ketiga, dugaan penambangan tanpa izin perlu ditangani melalui verifikasi lapangan, pemantauan perubahan tutupan, dan penegakan hukum sesuai kewenangan, tanpa menjadikannya penyebab bencana sebelum bukti kausal tersedia. Keempat, instansi teknis perlu melengkapi metadata layer, metode debit, geometri penampang, dan seri sedimen agar evaluasi dapat direplikasi. Kelima, masyarakat adat dan pemerintah kampung perlu dilibatkan dalam pemantauan perubahan alur, retakan lereng, kekeruhan, kayu tersangkut, dan hujan lokal. Pengetahuan lokal dapat mempercepat deteksi anomali, tetapi harus diintegrasikan dengan prosedur komunikasi risiko dan instrumen pengamatan yang terdokumentasi.

4. KESIMPULAN

Evaluasi berbasis kejadian menunjukkan bahwa bencana pada 16 Mei 2025 paling tepat dipahami sebagai rangkaian proses hidrogeomorfik yang melibatkan curah hujan tinggi, lereng curam, kegagalan lereng, suplai sedimen atau debris, serta kemungkinan penurunan kapasitas efektif alur, meskipun kesimpulan ini merupakan sintesis diagnostik dan bukan atribusi kausal tunggal. Estimasi curah hujan pada tiga tanggal yang tersedia masing-masing sebesar 92,04; 123,44; dan 52,16 mm hari^{-1} , sedangkan jumlah 267,64 mm hanya merupakan total deskriptif dari tiga tanggal yang tidak berurutan sehingga tidak dapat diperlakukan sebagai indeks hujan pendahulu kontinu maupun ambang longsor tanpa validasi menggunakan seri harian lokal. Nilai sekunder debit puncak (Q_p) sebesar 52,590 $\text{m}^3 \text{detik}^{-1}$ dan kapasitas alur (Q_c) sebesar 64,800 $\text{m}^3 \text{detik}^{-1}$ menghasilkan rasio 0,81, tetapi analisis sensitivitas menunjukkan bahwa penurunan kapasitas efektif alur sebesar 20% dapat meningkatkan rasio tersebut menjadi sekitar 1,01. Temuan ini menegaskan pentingnya survei kapasitas alur, tetapi belum dapat digunakan untuk menetapkan klasifikasi risiko akhir karena metode derivasi Q_p dan Q_c , geometri penampang, kekasaran alur, serta prosedur validasinya belum terdokumentasi secara lengkap. Tutupan hutan primer dan sekunder mencapai 86,16%, sementara agregat kelas Agak Kritis hingga Sangat Kritis mencapai 95,28%; namun, angka 95,28% merupakan statistik interpretatif dan bukan Persentase Lahan Kritis formal. Kontras kedua indikator tersebut menunjukkan perlunya analisis berbasis unit lahan dan koridor proses, bukan kesimpulan bahwa dominasi hutan otomatis menjamin stabilitas hidrologis atau bahwa tingginya kelas lahan kritis secara langsung menyebabkan kejadian. Prioritas pengelolaan meliputi pelengkapan metadata spasial dan metode derivasi debit serta kapasitas alur, pembangunan seri pemantauan hujan dan tinggi muka air secara kontinu, pemetaan titik penyempitan alur, endapan, dan konektivitas sedimen, rehabilitasi lokasi bekas longsor, sempadan sungai, dan lereng yang terhubung dengan alur berdasarkan verifikasi lapangan, serta verifikasi dan pengendalian gangguan antropogenik sesuai bukti. Penelitian ini terbatas oleh penggunaan data hujan dari tiga tanggal yang tidak berurutan dan belum tervalidasi terhadap pos hujan lokal, belum lengkapnya dokumentasi koordinat presisi, luas delineasi akhir, sistem referensi

koordinat, datum, resolusi layer, dan prosedur prapemrosesan, serta belum pastinya tahun dan metadata layer lahan kritis. Selain itu, nilai debit puncak dan kapasitas alur berasal dari dokumen sekunder, nama satuan peta tanah belum cukup untuk membuktikan infiltrasi rendah atau kejenuhan, geometri longsor masih bersifat estimatif, dugaan gangguan pertambangan belum didukung bukti kausal spasial-temporal yang memadai, dan aspek paparan serta kerentanan belum dianalisis. Oleh karena itu, penelitian ini hanya menilai kinerja hidrologis secara diagnostik dan bahaya hidrogeomorfik, bukan risiko bencana secara lengkap, sedangkan penelitian lanjutan perlu mengembangkan pemantauan hujan–debit kontinu, survei hidraulik, analisis DEM beda waktu, inventarisasi sedimen, pemetaan gangguan multitemporal, pengukuran sifat fisik dan hidraulik tanah, serta analisis bahaya, paparan, dan kerentanan secara terintegrasi.

PERNYATAAN KETERSEDIAAN DATA

Data curah hujan terestimasi berasal dari NASA POWER, sedangkan layer penutupan lahan, lahan kritis, topografi, satuan tanah, nilai hidrologis sekunder, dan dokumentasi kejadian berasal dari sumber institusional yang disebutkan dalam naskah. Akses terhadap beberapa layer mentah mengikuti kebijakan pemilik data. Untuk reproduksibilitas penuh, penulis perlu menyertakan versi layer, tanggal akses, CRS/datum, resolusi, parameter ekstraksi, dan lembar kerja derivasi Qp/Qc pada saat submit atau melalui repositori yang diizinkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada BPDAS Remu Ransiki dan pihak terkait yang menyediakan data monitoring serta dokumentasi kejadian DAS Warjori tahun 2025. Apresiasi juga disampaikan kepada masyarakat Kampung Jim dan aparat setempat atas informasi lapangan. Penggunaan data institusional tetap mengikuti ketentuan akses dan verifikasi metadata dari pemilik data.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, S. (2021). *Konservasi tanah dan air* (Edisi Revisi). IPB Press.
- Asdak, C. (2023). *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai* (Edisi Revisi). Gadjah Mada University Press.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2022). *Buletin hujan bulanan edisi Juli 2022*. BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2024). *Data Informasi Bencana Indonesia tahun 2024*. BNPB Republik Indonesia.
- Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Remu Ransiki. (2025). *Laporan monitoring dan evaluasi banjir dan tanah longsor DAS Warjori tahun 2025*. BPDAS Remu Ransiki.
- Banjara, M., Bhusal, A., Kalra, A., & Ahmad, S. (2024). Impact of land use and land cover change on hydrological response in a fast transitioning watershed. *Geosciences*, 14(2), 40. <https://doi.org/10.3390/geosciences14020040>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Dharmayasa, I. G. N. P., Adnyana, I. W. S., & Arthana, I. W. (2022). NASA POWER as an alternative rainfall data resource for hydrology research in Bali Island, Indonesia. *Journal of Infrastructure Planning and Engineering*, 1(1), 1–9.
- Diringer, S. E., Berky, A. J., Marani, M., Ortiz, E. J., Karatum, O., Plata, D. L., Pan, W. K., & Hsu-Kim, H. (2020). Deforestation due to artisanal and small-scale gold mining exacerbates soil and mercury mobilization in Madre de Dios, Peru. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 286–296. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06620>
- Etui, I. M. D. (2024). *Artisanal and small-scale gold mining and biodiversity: A global literature review*. planetGOLD/UNEP.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>

- Gianneccchini, R., D'Amato Avanzi, G., Galanti, Y., & Nardi, L. (2024). An update on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Water*, 16(5), 624. <https://doi.org/10.3390/w16050624>
- Hardjowigeno, S. (2020). Ilmu tanah. Akademika Pressindo.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2023). Status lahan kritis Indonesia tahun 2023. Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Rehabilitasi Hutan.
- NASA POWER. (2026). POWER Data Access Viewer and parameter dictionary. National Aeronautics and Space Administration.
- Kementerian Kehutanan Republik Indonesia. (2014). Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.61/Menhut-II/2014 tentang Monitoring dan Evaluasi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai.
- Satyaningsih, R., Hidayat, R., Hadi, T. W., & Lestari, S. (2023). Dynamic rainfall thresholds for landslide early warning in Progo Catchment, Indonesia. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06208-2>
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483–1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Standar Nasional Indonesia. (2017). SNI 8182:2017 tentang tata cara penentuan tingkat kerentanan gerakan tanah. Badan Standardisasi Nasional.
- Sugianto, S., Deli, A., Miswar, E., Rusdi, M., & Irham, M. (2022). The effect of land use and land cover changes on flood occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*, 11(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Suripin. (2004). Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan. Andi Offset. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air.