

Analisis Skenario Bahaya Banjir Berbasis Model Hidrodinamika 2D pada Kawasan Banyakan, Kabupaten Kediri

Srie Harnanda Bagus Rahmantyas*, Mohamad Bagus Ansori

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: harnandasrie@gmail.com*

Keywords:

Flood Hazard Zoning; HEC-RAS 2D; AIDR Guideline 7-3; Ungauged Watershed; Return Period.

Abstract

The Banyakan and Grogol areas in Kediri Regency are repeatedly inundated by the overflow of the Bendo Krosok and Bendo Mongal rivers. Both watersheds lack streamflow gauging stations, making flood hazard assessment entirely dependent on modeling. This study aims to develop flood hazard zones for 20-, 50-, and 100-year return periods while tracing how the increase in design discharge translates into downstream hazards. Upstream runoff was calculated using HEC-HMS (SCS Curve Number, SCS unit hydrograph, and Lag Routing) and inputted as a hydrograph into a HEC-RAS 2D model with a Diffusion Wave solver across a 27.01 km² downstream domain containing 230,205 computational cells. The model was calibrated against the December 23–24, 2024 flood event, yielding an RMSE of 0.0176 m and an NSE of 0.9854 at seven observation points. Hazard levels were classified according to AIDR Guideline 7-3 based on the product of flow depth and velocity. From T20 to T100, the combined peak discharge increased by 40.7% (171.8 to 241.8 m³/s), inundation area grew by 21.90% (618.08 to 753.45 ha), maximum depth rose by 16.20% (1.42 to 1.65 m), while the total hazardous area only expanded by 11.61% (1,199.31 to 1,338.53 ha). Although each sequential indicator grew slower than the previous one, medium hazard classes grew fastest (H2 at 32.13% and H3 at 39.98%), and the 0.5 to 1.5 m depth class area increased by 41.20%. Affected building units increased by 8.38%, with the H3 class surging by 45.24%. The primary threat during extreme return periods is the intensification of hazards in already inundated areas rather than the expansion of the affected region. Therefore, appropriate mitigation should involve targeted point interventions at priority locations.

Kata Kunci:

Zonasi Bahaya Banjir; HEC-RAS 2D; AIDR Guideline 7-3; DAS Tanpa Data Debit; Kala Ulang.

Abstrak

Kawasan Banyakan dan Grogol di Kabupaten Kediri berulang kali tergenang akibat luapan Sungai Bendo Krosok dan Bendo Mongal. Kedua DAS tidak memiliki stasiun ukur debit, sehingga penilaian bahaya banjirnya bergantung sepenuhnya pada pemodelan. Penelitian ini menyusun zonasi bahaya banjir pada kala ulang 20, 50, dan 100 tahun sekaligus menelusuri bagaimana kenaikan debit rancangan terkonversi menjadi bahaya di dataran hilir. Limpasan wilayah hulu dihitung menggunakan HEC-HMS dengan metode SCS Curve Number, hidrograf satuan SCS, dan Lag Routing, lalu dimasukkan sebagai hidrograf ke model HEC-RAS 2D bersolver Diffusion Wave pada domain hilir seluas 27,01 km² yang terdiri atas 230.205 sel komputasi. Model dikalibrasi terhadap kejadian banjir 23-24 Desember 2024 dan menghasilkan RMSE 0,0176 m serta NSE 0,9854 pada tujuh titik observasi. Tingkat bahaya diklasifikasikan menurut AIDR Guideline 7-3 berdasarkan hasil kali kedalaman dan kecepatan aliran. Dari T20 ke T100, debit puncak gabungan naik 40,7% dari 171,8 menjadi 241,8 m³/s, luas genangan bertambah

21,90% dari 618,08 menjadi 753,45 ha, kedalaman maksimum naik 16,20% dari 1,42 menjadi 1,65 m, sedangkan luas area berbahaya hanya bertambah 11,61% dari 1.199,31 menjadi 1.338,53 ha. Setiap indikator pada rantai tersebut tumbuh lebih lambat daripada indikator sebelumnya. Meskipun demikian, kelas bahaya menengah tumbuh paling cepat, yaitu H2 sebesar 32,13% dan H3 sebesar 39,98%, sedangkan luas kelas kedalaman 0,5 sampai 1,5 m bertambah 41,20%. Unit bangunan terdampak naik 8,38% dengan kelas H3 bertambah 45,24%. Ancaman utama pada kala ulang ekstrem berupa penguatan bahaya pada wilayah yang telah tergenang, bukan perluasan wilayah terdampak, sehingga mitigasi yang sesuai berbentuk intervensi titik pada lokasi prioritas.

PENDAHULUAN

Banjir merupakan bencana hidrometeorologi yang paling sering terjadi di Indonesia dan menimbulkan kerugian pada permukiman, infrastruktur, serta aktivitas ekonomi. Perubahan pola presipitasi ekstrem di wilayah Indonesia selama beberapa dekade terakhir menambah tekanan pada sistem pengaliran yang dirancang berdasarkan asumsi hidrologis lama (Supari et al., 2017). Tekanan tersebut bertambah pada wilayah yang sedang mengalami alih fungsi lahan cepat, karena berkurangnya kapasitas infiltrasi memindahkan sebagian volume hujan menjadi limpasan permukaan dalam waktu singkat.

Kawasan Banyak dan Grogol di Kabupaten Kediri, Jawa Timur, menghadapi kondisi tersebut. Sungai Bendo Krosok dan Bondo Mongal bertemu pada zona transisi lereng, dan luapannya merendam permukiman warga serta koridor jalan arteri Kediri sampai Nganjuk. Kejadian banjir 23 sampai 24 Desember 2024 yang dilaporkan BPBD Kabupaten Kediri menghasilkan genangan yang bertahan lebih dari 20 jam, dengan kedalaman 0,1 sampai 0,5 m pada delapan titik pengamatan pascakejadian. Kedua DAS tidak memiliki stasiun ukur debit, sehingga penilaian bahaya banjir di kawasan ini hanya dapat ditegakkan melalui pemodelan yang divalidasi terhadap jejak banjir lapangan.

Pemodelan hidrodinamika dua dimensi telah menjadi pendekatan baku untuk memetakan genangan pada dataran banjir (Néelz dan Pender, 2013; Brunner, 2026). Pada DAS tanpa data pengukuran, penerapan hujan langsung pada seluruh sel komputasi atau Rain-on-Grid banyak digunakan untuk mengatasi ketiadaan hidrograf masukan (Papaioannou et al., 2018; Zeiger dan Hubbart, 2021; Costabile et al., 2021). Pendekatan tersebut mempunyai batas penerapan pada DAS berkontras topografi tinggi, karena wilayah hulu berlereng curam didominasi transformasi hujan menjadi limpasan sedangkan wilayah hilir landai didominasi perambatan aliran dua dimensi (David dan Schmalz, 2020). Untuk wilayah studi ini, skema hibrida Hydrology–Rain-on-Grid yang membagi domain menurut proses dominannya telah diuji secara terkendali terhadap Rain-on-Grid penuh dan menunjukkan kinerja validasi yang lebih konsisten sekaligus beban komputasi yang lebih ringan (Rahmantyas dan Ansori, dalam penelaahan). Model terkalibrasi dari kajian tersebut menjadi mesin komputasi bagi penelitian ini.

Persoalan yang belum banyak dijawab terletak pada tahap sesudahnya. Sebagian besar studi zonasi bahaya melaporkan pertambahan luas genangan antar kala ulang sebagai indikator utama eskalasi risiko (Lazović dan Mulaomerović-Šeta, 2025; Kurnianingsih et al., 2026). Penilaian bahaya berbasis kombinasi kedalaman dan kecepatan aliran sebenarnya mengizinkan pembacaan yang lebih halus, karena genangan dangkal berkecepatan tinggi dan genangan

dalam berkecepatan rendah sama-sama berbahaya meskipun luas keduanya berbeda (AIDR, 2017). Yang jarang dikuantifikasi adalah bagaimana kenaikan debit rancangan tersalur secara berurutan menjadi luas genangan, kedalaman, dan akhirnya luas area berbahaya, serta pada tahap mana rantai konversi tersebut kehilangan proporsionalitasnya. Informasi ini berpengaruh langsung pada bentuk mitigasi yang dipilih, karena perluasan wilayah terdampak dan penguatan bahaya pada wilayah yang sama menuntut jenis intervensi yang berbeda.

Penelitian ini menyusun zonasi bahaya banjir Kawasan Hilir DAS Banyakan pada kala ulang 20, 50, dan 100 tahun, lalu menelusuri rantai konversi dari debit puncak sampai luas area berbahaya beserta perubahan komposisi kelas bahayanya. Analisis dilanjutkan pada tiga lapis keterpaparan, yaitu kawasan permukiman, unit bangunan, dan segmen jalan arteri, untuk menghasilkan peringkat prioritas penanganan pada sebelas desa terdampak.

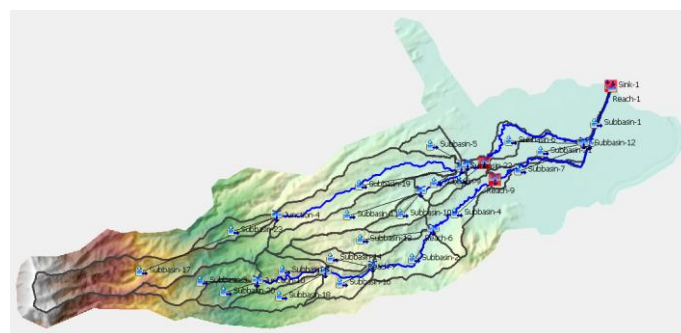
METODE PENELITIAN

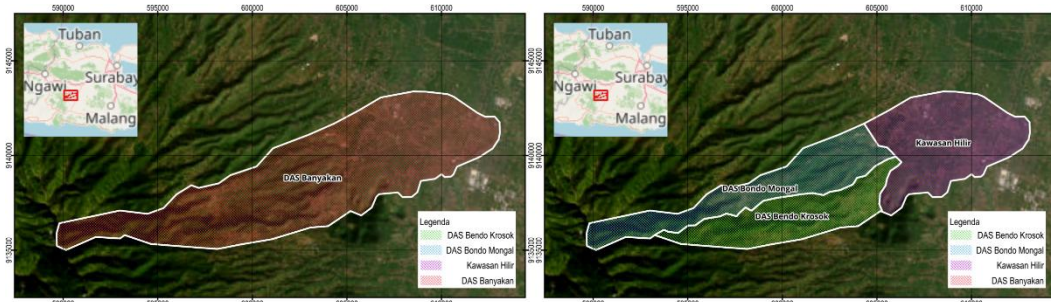
Wilayah studi

DAS Banyakan mencakup 52,59 km² yang tersusun atas DAS Bondo Mongal 26,05 km², DAS Bendo Krosok 22,01 km², dan Kawasan Hilir 4,53 km². Delineasi menghasilkan 23 subbasin dengan topologi 48 elemen komputasi, yaitu 23 subbasin, 12 reach, 12 junction, dan satu sink. Wilayah hulu berupa perbukitan hingga pegunungan dengan relief mencapai 1.925 m dan kemiringan lahan sampai 0,553 m/m, sedangkan wilayah hilir berupa dataran aluvial dengan kemiringan lahan terendah 0,010 m/m.

Tutupan lahan wilayah studi masih berkarakter agraris. Sawah menempati 22,29% dan hutan produksi beserta hutan produksi terbuka bersama-sama mencakup 34,97%, sedangkan kawasan terbangun mencapai 16,10%. Kelompok hidrologi tanah seluruhnya berada pada kelas berinfiltrasi rendah, dengan 82,10% wilayah masuk kelas berinfiltrasi paling rendah. Kombinasi tersebut menghasilkan Curve Number komposit 76,5 sampai 99,2 dengan nilai tertinggi terkonsentrasi pada subbasin Kawasan Hilir.

Analisis bahaya dilakukan pada domain hidrodinamika dua dimensi Kawasan Hilir seluas 27,01 km², yang mencakup sebelas desa administratif, yaitu Bakalan, Banyakan, Dermo, Gayam, Jabon, Jatirejo, Manyaran, Maron, Mrican, Ngablak, dan Sendang.





Gambar 1. Lokasi penelitian, batas DAS, jaringan sungai, dan domain pemodelan hidrodinamika 2D.

Data dan sumber data

Data yang digunakan beserta sumbernya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data dan sumber data

Jenis data	Sumber	Spesifikasi
Curah hujan harian	Lima stasiun: Kediri, Besuki, Gading Parang, Kanyoran, Grogol	2000 sampai 2025
Topobatismetri sungai	BBWS Brantas	Bendo Krosok 12.500 m (233 penampang); Bendo Mongal 5.900 m (118 penampang)
Model elevasi digital	FABDEM V1.2, terkoreksi terhadap 880 titik kontrol	Resolusi keluaran 1 m
Tutupan lahan	Esri Sentinel-2 Land Cover 10 m (2017 sampai 2025), RBI 1:25.000	16 kelas
Tapak bangunan	Google Open Buildings v3 (Sirko et al., 2021)	38.111 unit pada 11 desa
Kelompok hidrologi tanah	HYSOGs250m	Resolusi 250 m
Jaringan jalan dan batas administrasi	OpenStreetMap, RBI	—
Observasi genangan	Survei pascakejadian, BPBD, dokumentasi warga	8 titik, 23 sampai 24 Desember 2024

Hujan rancangan

Analisis frekuensi dilakukan terhadap seri hujan harian maksimum tahunan selama 26 tahun menggunakan HEC-SSP dengan metode L-Moments (Hosking, 1990; Hosking dan Wallis, 1997). Delapan distribusi probabilitas diuji, dan Generalized Extreme Value memberikan nilai uji Kolmogorov-Smirnov serta Anderson-Darling terendah pada seluruh DAS. Untuk DAS Banyakan, parameter GEV yang diperoleh adalah location 70,61, scale 13,13, dan shape -0,10 dengan nilai uji 0,158.

Distribusi temporal hujan harian menjadi hietograf jam-jaman menggunakan Metode Sri Harto, yang disusun berdasarkan karakteristik hujan di Pulau Jawa (Sri Harto, 1993; Brotowiryatmo, 2016). Durasi hujan efektif ditetapkan 8 jam dengan intensitas puncak pada jam kedua sebesar 21,29% dari total hujan harian. Pola distribusi temporal dipertahankan sama

pada ketiga kala ulang, sehingga perbedaan respons banjir antar skenario bersumber sepenuhnya dari besaran hujan. Hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hujan rancangan DAS Banyakkan dan intensitas puncak jam-jaman

Kala ulang	Hujan rancangan (mm)	Intensitas puncak (mm)
20 tahun (T20)	116,26	24,75
50 tahun (T50)	133,72	28,47
100 tahun (T100)	147,96	31,50

Pemodelan hidrologi

Transformasi hujan menjadi limpasan dihitung pada HEC-HMS untuk 23 subbasin. Kehilangan air menggunakan metode SCS Curve Number dengan Abstraction Ratio 0,2 (USDA-SCS, 1986), transformasi menggunakan hidrograf satuan SCS dengan Peak Rate Factor 200 sampai 600 mengikuti kemiringan lahan, dan penelusuran aliran menggunakan Lag Routing. Lag Time subbasin berkisar 8 sampai 115 menit, sedangkan Lag Time reach dihitung dengan pendekatan Kirpich dan berkisar 6,65 sampai 80,06 menit. Interval komputasi ditetapkan 1 menit dengan rentang simulasi 24 jam.

Hujan rancangan DAS Banyakkan diterapkan seragam pada seluruh subbasin untuk ketiga skenario kala ulang. Nilai Curve Number dan persentase area kedap air dipertahankan konstan pada seluruh skenario, dan geometri model beserta tutupan lahan menggunakan kondisi eksisting tanpa penambahan struktur pengendali banjir. Perbedaan respons antar kala ulang karena itu bersumber semata-mata dari perubahan beban hujan.

Pemodelan hidrodinamika dua dimensi

Simulasi menggunakan skenario Hybrid Hydrology–Rain-on-Grid terkalibrasi. Hidrograf keluaran HEC-HMS dimasukkan pada dua Boundary Condition Line di batas hulu, yaitu Bondo Mongal US dengan Energy Gradient 0,00613 dan Bendo Krosok US dengan Energy Gradient 0,00789, sedangkan hujan langsung diterapkan pada domain hilir. Kondisi batas hilir menggunakan Normal Depth dengan kemiringan gesek 0,001.

Terrain model dibangun dari fusi DEM batimetri hasil survei, FABDEM V1.2 terkoreksi dengan interpolasi Multilevel B-Spline, dan terrain reconditioning berdasarkan jaringan sungai RBI, dengan resolusi keluaran 1 m. Koreksi terhadap 880 titik kontrol menurunkan RMSE elevasi dari 1,267 m menjadi 0,120 m, yaitu di bawah kedalaman genangan terukur terkecil sebesar 0,1 m. Prosedur ini mengikuti kerangka penilaian kelayakan DEM global untuk pemodelan hidrodinamika pada wilayah bermasalah data (Nandam dan Patel, 2024).

Diskretisasi spasial menggunakan mesh multi-zona dengan total 230.205 sel. Koridor sungai menggunakan elemen quadrilateral berukuran 6 m dengan penghalusan 3 m pada pertemuan sungai, kawasan permukiman menggunakan elemen triangle 15 m dengan penghalusan 6 m, badan jalan menggunakan elemen quadrilateral 6 m dengan penghalusan 4 m pada simpang, sedangkan dataran banjir non-permukiman menggunakan elemen Cartesian 30 m. Breaklines ditempatkan pada tepi sungai, badan jalan, dan tanggul agar batas sel komputasi sejajar dengan bentuk fisik infrastruktur.

Koefisien kekasaran Manning diterapkan secara terdistribusi melalui 17 kelas tutupan lahan dengan rentang 0,015 sampai 0,400. Kawasan terbangun tidak dimodelkan sebagai

penghalang pejal melainkan menggunakan pendekatan high-roughness cell, sehingga aliran tetap dapat melewati permukiman dengan hambatan yang lebih besar (Schubert dan Sanders, 2012). Kehilangan air per sel dihitung menggunakan Infiltration SCS Layer dengan Curve Number 65 sampai 100.

Solver yang digunakan adalah Diffusion Wave dengan kondisi awal dry bed. Pemilihan solver ini sesuai dengan karakteristik aliran berubah lambat pada dataran banjir berlereng landai, dan pada kondisi tersebut hasilnya setara dengan skema momentum penuh sekaligus lebih stabil secara numerik (Costabile, Costanzo dan Macchione, 2017; Néelz dan Pender, 2013). Pengendalian langkah waktu menggunakan Advanced Time Step Control berbasis kriteria Courant dengan batas maksimum 2,0 dan minimum 0,45, sehingga interval komputasi menyesuaikan diri antara 0,03 dan 8,00 detik.

Kalibrasi dilakukan terhadap kejadian 23 sampai 24 Desember 2024 dengan koefisien Manning tapak bangunan sebagai satu-satunya parameter yang disesuaikan, dan menghasilkan nilai final $n = 0,400$. Evaluasi terhadap tujuh titik observasi menghasilkan RMSE 0,0176 m, MAE 0,0136 m, NSE 0,9854, PBIAS +0,95%, dan R^2 0,9903. Pada evaluasi delapan titik, nilainya adalah RMSE 0,0326 m, NSE 0,955, dan PBIAS -2,56%. Menurut kriteria Moriasi et al., (2007), kedua basis evaluasi termasuk kategori sangat baik. Perlu dicatat bahwa kedalaman genangan lapangan dicatat pada kelipatan 0,1 m, sehingga ketidakpastian pembulatannya setara simpangan baku 28,9 mm dan menjadi batas bawah teoretis bagi RMSE model. Rincian kalibrasi, dekomposisi galat, dan perbandingannya terhadap skema Rain-on-Grid penuh dilaporkan terpisah (Rahmantyas dan Ansori, dalam penelaahan).

Indeks bahaya dan klasifikasi

Indeks bahaya banjir dihitung sebagai hasil kali kedalaman genangan dan kecepatan rata-rata aliran permukaan:

$$FHI = d \times v$$

dengan FHI sebagai indeks bahaya banjir (m^2/s), d sebagai kedalaman genangan di atas permukaan tanah (m), dan v sebagai kecepatan aliran (m/s). Kedua parameter digunakan bersama karena tingkat bahaya tidak ditentukan kedalaman semata. Genangan dangkal berkecepatan tinggi maupun genangan dalam berkecepatan rendah sama-sama dapat membahayakan keselamatan dan bangunan, dan hanya perkalian keduanya yang memisahkan kedua kondisi tersebut.

Klasifikasi mengikuti AIDR Guideline 7-3 (AIDR, 2017) yang membagi tingkat bahaya menjadi enam kelas berdasarkan ambang kedalaman, kecepatan, dan hasil kalinya, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Klasifikasi kelas kedalaman genangan mengikuti kombinasi Permen PUPR Nomor 12/PRT/M/2014 dan Perka BNPB Nomor 2 Tahun 2012. Klasifikasi dieksekusi per sel komputasi menggunakan Raster Calculator pada perangkat lunak sistem informasi geografis.

Tabel 3. Kriteria kelas bahaya banjir menurut AIDR Guideline 7-3

Kelas	Ambang parameter	Kerentanan utama
H1	$d \leq 0,3 \text{ m}$; v rendah; $d \times v \leq 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$	Umumnya aman bagi manusia, kendaraan, dan bangunan
H2	$d \leq 0,5 \text{ m}$; $d \times v \leq 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$	Tidak aman bagi kendaraan kecil
H3	$d \leq 1,2 \text{ m}$; $d \times v \leq 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$	Tidak aman bagi kendaraan dan kelompok rentan
H4	$d \leq 2,0 \text{ m}$; $d \times v \leq 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Tidak aman bagi seluruh manusia dan kendaraan
H5	$d \leq 4,0 \text{ m}$; $d \times v \leq 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Berpotensi merusak bangunan ringan
H6	$d > 4,0 \text{ m}$ atau $d \times v > 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Berpotensi menyebabkan kegagalan struktur

Analisis keterpaparan

Keterpaparan dianalisis pada tiga lapis melalui overlay spasial antara peta zonasi bahaya dan data keruangan. Lapis pertama berupa kawasan permukiman yang dinyatakan dalam hektar. Lapis kedua berupa unit bangunan, dengan setiap poligon tapak bangunan diberi kelas bahaya menurut sel tempatnya berada. Lapis ketiga berupa segmen Jalan Raya Kediri sampai Nganjuk yang dinyatakan dalam meter panjang per kelas bahaya.

Penetapan prioritas penanganan mempertimbangkan empat kriteria secara bersamaan, yaitu kelas bahaya tertinggi yang teridentifikasi, rasio keterpaparan terhadap total luas atau jumlah unit tiap desa, luas absolut atau jumlah unit terdampak, dan laju pertumbuhan paparan dari T20 ke T100. Penggunaan keempatnya sekaligus memungkinkan identifikasi wilayah berpaparan luas maupun wilayah bertingkat bahaya tinggi yang luas absolutnya kecil.

Basis perhitungan luas

Penelitian ini melaporkan luas pada dua basis yang berbeda, dan perbedaannya perlu dinyatakan agar angka tidak terbaca saling menggantikan.

Analisis genangan menerapkan ambang kedalaman 0,05 m untuk memisahkan genangan yang berpengaruh hidraulik dari sisa numerik, lalu dibatasi pada daratan sebelas desa setelah badan sungai dikeluarkan. Basis ini menjawab pertanyaan mengenai luas wilayah permukiman dan lahan yang tergenang, dan menghasilkan 618,08 ha pada T20 sampai 753,45 ha pada T100.

Analisis zonasi bahaya tidak menerapkan ambang tersebut, karena penilaian AIDR menimbang kedalaman bersama kecepatan sehingga sel berkedalaman sangat kecil tetapi berkecepatan tinggi tetap memiliki nilai bahaya dan tidak dapat dibuang di awal. Basis ini menjawab pertanyaan mengenai cakupan penilaian bahaya, dan menghasilkan 1.199,31 ha pada T20 sampai 1.338,53 ha pada T100. Selisih terhadap basis pertama seluruhnya berupa sel berkedalaman di bawah 0,05 m yang masuk kelas H1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons hidrologi dan beban hidraulik

Debit puncak pada kedua titik hulu dan pada outlet gabungan disajikan pada Tabel 4. Junction 11 mewakili sub-sistem Sungai Bondo Mongal, Junction 12 mewakili Sungai Bendo Krosok, dan Sink 1 merupakan titik keluaran gabungan yang juga menerima limpasan langsung dari lima subbasin Kawasan Hilir.

Tabel 4. Debit puncak dan waktu puncak pada skenario kala ulang

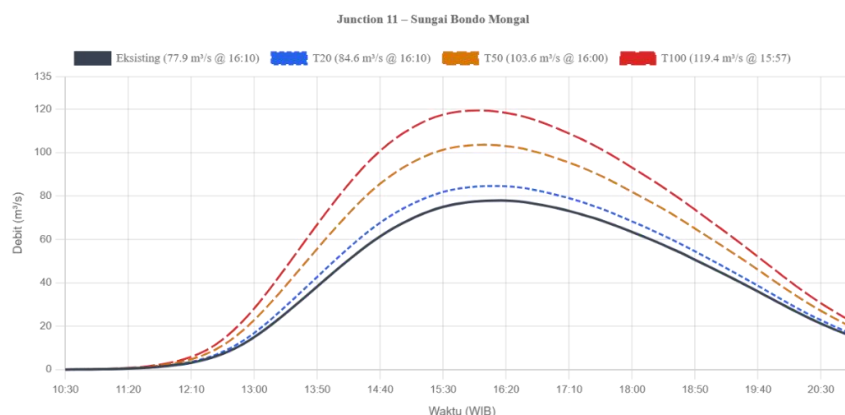
Skenario	Q Junction 11 (m ³ /s)	Q Junction 12 (m ³ /s)	Q Sink 1 (m ³ /s)
T20	84,6	76,1	171,8
T50	103,6	93,4	210,0
T100	119,4	107,8	241,8

Debit gabungan di Sink 1 naik 40,7% dari T20 ke T100. Kenaikan pada kedua cabang hulu hampir seragam, yaitu 41,1% pada Junction 11 dan 41,7% pada Junction 12, yang sesuai dengan penerapan hujan rancangan seragam pada seluruh subbasin.

Dua karakteristik pada Tabel 4 berpengaruh pada pembentukan genangan di hilir. Pertama, Junction 12 mencapai puncak lebih awal daripada Junction 11 pada seluruh skenario, dengan jeda 32 sampai 33 menit yang bertahan meskipun besaran hujan berubah. Kestabilan jeda ini menunjukkan perbedaan waktu tiba ditentukan geometri DAS, yaitu DAS Bendo Krosok yang berlereng lebih curam dan berlintasan lebih pendek, bukan oleh besarnya masukan hujan. Kedua puncak hulu karena itu tidak pernah bertemu secara serentak di hilir.

Kedua, superposisi di outlet bersifat memperkuat. Pada T100, penjumlahan aritmetik kedua puncak hulu sebesar 227,2 m³/s, sedangkan hasil komputasi Sink 1 mencatat 241,8 m³/s. Selisihnya berasal dari lima subbasin Kawasan Hilir yang mengalir langsung ke outlet tanpa melalui kedua junction. Tambahan limpasan lokal dataran hilir dengan demikian lebih besar daripada peredaman akibat jeda waktu rambatan hulu. Puncak gabungan tiba 1 jam 48 menit sampai 2 jam 25 menit setelah puncak kedua junction, sehingga rentang waktu antara respons hidrologis hulu dan beban puncak di kawasan terbangun tergolong singkat.

Konsekuensi praktisnya, evaluasi kapasitas penampang dan tinggi jagaan di wilayah hilir perlu menggunakan debit gabungan di Sink 1 sebagai debit acuan, bukan debit masing-masing cabang.



Gambar 2. Hidrograf banjir rancangan pada Junction 11 dan Junction 12 untuk skenario T20, T50, dan T100.

Verifikasi kualitas simulasi

Pemeriksaan pascakomputasi dilakukan sebelum hasil digunakan untuk pemetaan bahaya. Overall Volume Accounting Error pada akhir simulasi tercatat 0,000644% untuk T20, 0,000587% untuk T50, dan 0,000529% untuk T100, dengan volume galat 35,90 m³, 39,59 m³, dan 40,84 m³. Seluruh galat relatif berada jauh di bawah 1%, sehingga konservasi volume selama simulasi terjaga. Volume galat absolut bertambah seiring kala ulang, tetapi galat relatifnya justru menurun karena volume total yang disimulasikan bertambah lebih cepat daripada galatnya.

Ketiga skenario terselesaikan hingga akhir tanpa indikasi kegagalan komputasi pada computational log. Luas genangan, kedalaman maksimum, dan elevasi muka air ketiganya meningkat searah dengan bertambahnya beban hidrologis, sehingga model konsisten terhadap hubungan fisis yang diharapkan.

Luas dan sebaran genangan

Luas genangan pada daratan sebelas desa bertambah dari 618,08 ha pada T20 menjadi 696,68 ha pada T50 dan 753,45 ha pada T100. Terhadap total wilayah analisis seluas 2.846,89 ha, angka tersebut mencakup 21,71%, 24,47%, dan 26,47% secara berurutan. Rinciannya per desa disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Luas genangan per desa berdasarkan kala ulang

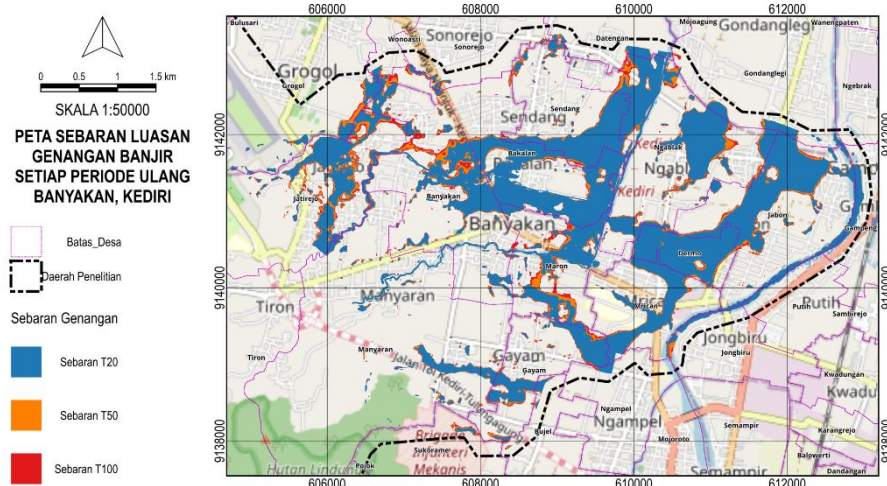
Desa	Wilayah (ha)	T20 (ha)	T50 (ha)	T100 (ha)	Rasio T100 (%)
Ngablak	311,71	96,97	110,53	119,09	38,20
Jabon	249,08	80,64	87,53	92,15	37,00
Bakalan	214,32	88,83	94,42	98,24	45,84
Banyakan	295,19	56,08	69,51	80,15	27,15
Jatirejo	400,79	50,26	63,15	72,21	18,02
Dermo	69,78	59,10	61,06	62,12	89,02
Maron	149,64	40,69	50,05	57,79	38,62
Sendang	162,14	52,41	56,67	60,02	37,02
Mrican	143,25	39,60	42,41	44,38	30,98
Gayam	135,34	32,78	36,83	40,15	29,66
Manyaran	715,64	20,71	24,50	27,15	3,79
Total	2.846,89	618,08	696,68	753,45	26,47

Pertambahan luas berlangsung dengan tambahan yang mengecil. Dari T20 ke T50 luas bertambah 78,60 ha atau 12,72%, sedangkan dari T50 ke T100 hanya 56,77 ha atau 8,15%. Perbandingan terhadap kenaikan debit memperjelas polanya: pada segmen pertama debit tumbuh 22,2% sementara luas hanya 12,59%, dan pada segmen kedua debit tumbuh 15,1% sementara luas 8,09%. Perluasan area berlangsung lebih lambat daripada kenaikan debit pada kedua segmen.

Keterpaparan antardesa sangat timpang. Berdasarkan luas absolut pada T100, Ngablak, Bakalan, dan Jabon menyumbang 309,48 ha atau 41,07% dari total genangan. Peringkatnya berubah bila ditinjau dari proporsi terhadap luas wilayah: Dermo mencatat 89,02% wilayahnya tergenang, sedangkan Manyaran hanya 3,79% meskipun wilayahnya terluas. Laju pertambahan

tertinggi terdapat di Jatirejo sebesar 43,67%, Banyak 42,92%, dan Maron 42,03%, atau sekitar dua kali laju rata-rata wilayah studi.

Overlay peta genangan menunjukkan perluasan dari T20 ke T100 tidak menyebar merata ke segala arah, melainkan berkembang dari sekitar jaringan sungai menuju wilayah berelevasi lebih rendah, terutama di utara Simpang Banyak, barat laut Desa Jatirejo, serta sebagian Bakalan dan Maron.



Gambar 3. Peta sebaran genangan banjir rencana pada skenario T20, T50, dan T100.

Kedalaman genangan

Distribusi luas genangan menurut kelas kedalaman disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Distribusi luas genangan berdasarkan kelas kedalaman

Kelas kedalaman	T20 (ha)	T20 (%)	T50 (ha)	T50 (%)	T100 (ha)	T100 (%)
0,05 sampai <0,10 m	174,04	28,15	182,82	26,23	187,83	24,93
0,10 sampai <0,20 m	177,30	28,68	194,92	27,98	208,13	27,62
0,20 sampai <0,30 m	96,66	15,64	114,41	16,42	126,03	16,73
0,30 sampai <0,50 m	95,79	15,50	112,65	16,17	126,38	16,77
0,50 sampai <0,75 m	51,53	8,34	60,31	8,66	67,44	8,95
0,75 sampai ≤1,50 m	22,83	3,69	31,62	4,54	37,56	4,99
> 1,50 m	0,00	0,00	0,02	0,00	0,07	0,01
Total	618,15	100,00	696,75	100,00	753,45	100,00

Genangan didominasi kedalaman dangkal. Kelas kurang dari 0,5 m mencakup 87,97% luas genangan pada T20 dan masih 86,05% pada T100, sedangkan kelas lebih dari 1,5 m praktis tidak terbentuk dengan hanya 0,07 ha pada T100.

Perubahan yang lebih tajam terjadi pada kelas menengah. Luas area berkedalaman 0,5 sampai 1,5 m bertambah dari 74,36 ha menjadi 105,00 ha atau 41,20%, hampir dua kali laju pertambahan luas genangan total dan mendekati laju kenaikan debit. Tambahan air pada kala ulang ekstrem dengan demikian lebih banyak menaikkan kedalaman pada area yang sudah tergenang dangkal daripada memperluas jangkauan.

Kedalaman maksimum di luar palung sungai tercatat 1,65 m di Jatirejo, 1,53 m di Maron, dan 1,40 m di Bakalan pada T100. Nilai Jatirejo naik dari 1,42 m pada T20, atau 16,20%. Kontras terhadap kedalaman rata-rata Jatirejo yang hanya 0,22 m menunjukkan genangan dalam di desa tersebut sangat terlokalisasi. Maron dan Bakalan naik jauh lebih kecil, dari 1,48 m dan 1,36 m, yang menandakan titik terdalamnya sudah hampir terisi penuh sejak T20.

Median kedalaman pada sebagian besar desa lebih rendah daripada rata-ratanya. Selisih terbesar terdapat di Jatirejo pada T100, dengan rata-rata 0,22 m dan median 0,12 m. Sebagian besar area tergenang karena itu berkedalaman dangkal, sedangkan sebagian kecil lokasi jauh lebih dalam dan menarik nilai rata-rata ke atas.

Kecepatan aliran

Kecepatan maksimum pada palung sungai utama disajikan pada Tabel 7.

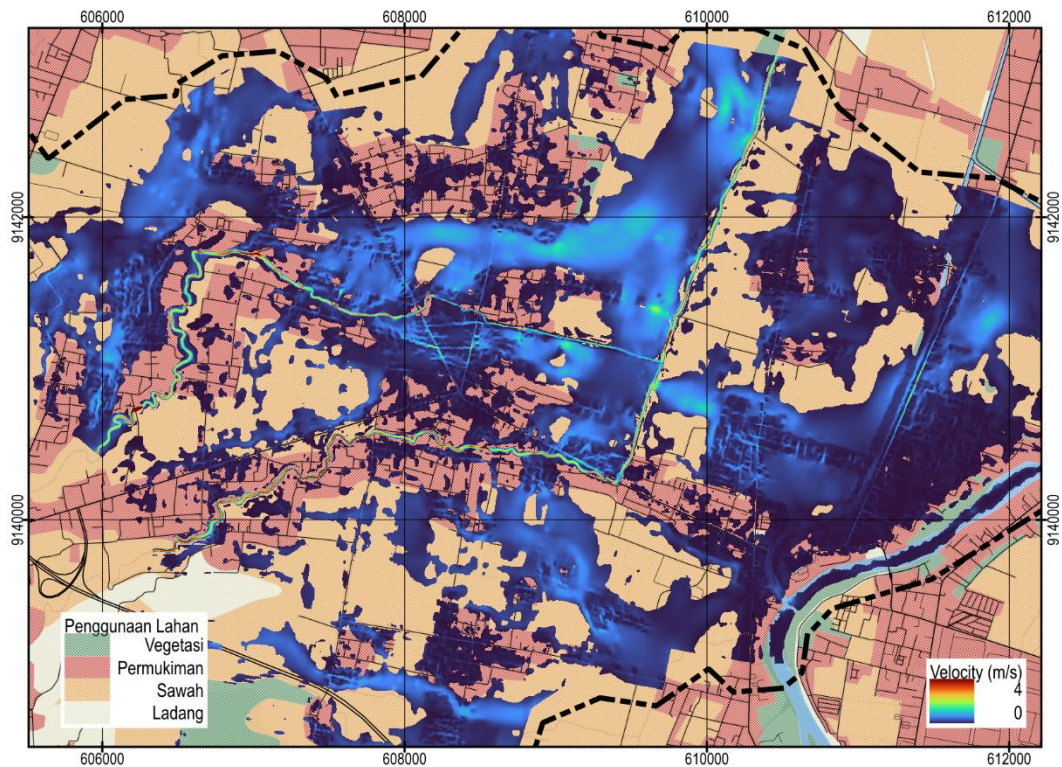
Tabel 7. Kecepatan aliran maksimum pada palung sungai

Sungai	Segmen (STA)	T20 (m/s)	T50 (m/s)	T100 (m/s)	Karakteristik
Bendo Krosok	Hulu (0+000)	3,81	4,07	4,26	Lereng relatif terjal
Bendo Krosok	Hilir (4+846)	1,77	1,75	1,72	Konfluens, kemiringan landai
Bondo Mongal	Bottleneck (4+092)	3,39	3,80	4,11	Penyempitan penampang
Bondo Mongal	Hilir (5+776)	1,46	1,44	1,41	Konfluens, kemiringan landai

Kecepatan naik pada segmen hulu dan lokasi penyempitan seiring bertambahnya kala ulang, tetapi justru menurun pada segmen hilir kedua sungai. Penurunan tersebut berkaitan dengan naiknya muka air dan bertambahnya volume genangan di bagian hilir. Bertambahnya kedalaman memperbesar luas penampang aliran, sehingga menurut hubungan kontinuitas kecepatan rata-rata dapat menurun apabila pertambahan luas penampang melampaui pertambahan debit. Gejala ini konsisten dengan kenaikan elevasi muka air di titik pertemuan sungai dari 68,05 m pada T20 menjadi 68,12 m pada T100, dan dapat diasosiasikan dengan efek bendung balik.

Kenaikan muka air sebesar 0,07 m tersebut jauh lebih kecil daripada pertambahan luas genangan pada periode yang sama. Tambahan volume air karena itu lebih banyak tersalur menjadi perluasan lateral daripada peninggian muka air di titik pertemuan.

Pada dataran banjir dan kawasan permukiman, kecepatan menurun tajam setelah aliran keluar dari koridor sungai. Koefisien Manning 0,400 pada kawasan terbangun, yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh kelas tutupan lahan, mendisipasi energi aliran sehingga air melambat dan terakumulasi pada cekungan topografi. Zona berkecepatan melebihi 1,5 m/s terkonsentrasi pada palung sungai, lokasi pelimpasan dari koridor sungai menuju dataran banjir, dan koridor jalan di kawasan Simpang Banyak tempat permukaan perkerasan yang relatif halus membentuk aliran dangkal berkecepatan relatif tinggi.



Gambar 4. Sebaran spasial kecepatan aliran pada skenario T100 beserta profil memanjang kecepatan pada kedua sungai utama.

Keterpaparan kawasan permukiman

Luas permukiman terdampak bertambah dari 481,20 ha pada T20 menjadi 513,50 ha pada T50 dan 538,20 ha pada T100. Distribusinya menurut kelas bahaya disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Luas paparan bahaya pada kawasan permukiman

Kelas bahaya	T20 (ha)	T50 (ha)	T100 (ha)	Eskalasi (%)
H1	433,99	452,67	467,37	+7,69
H2	35,11	42,23	46,78	+33,24
H3	11,48	17,64	22,77	+98,34
H4 sampai H5	0,68	0,96	1,28	+88,24
Total	481,20	513,50	538,20	+11,85

Pertambahan luas total sebesar 11,85% jauh lebih kecil daripada perubahan pada kelas bahaya yang lebih tinggi. Kelas H3 meningkat hampir dua kali lipat pada 98,34% dan kelas H4 sampai H5 meningkat 88,24%, sedangkan H1 hanya 7,69%. Kawasan permukimannya yang sudah berada dalam zona genangan pada T20 dapat naik kelas bahayanya pada T100 tanpa perubahan luas yang berarti, sehingga evaluasi keterpaparan tidak cukup berdasarkan luas genangan dan perlu menelusuri perubahan kelas bahaya secara spasial.

Tingkat keterpaparan berbeda tajam antardesa. Desa Banyak memiliki luas permukiman terdampak terbesar, yaitu 97,20 ha, sedangkan Dermo memiliki rasio tertinggi dengan 99,66% kawasan permukimannya terdampak. Di ujung lain, Jatirejo hanya 27,96% meskipun luas permukimannya 154,99 ha, hampir sama dengan Banyak. Bakalan dan Maron

menyumbang 50,9% luas permukiman berkelas H3 meskipun keduanya hanya mencakup 17,5% total luas permukiman wilayah studi.

Unit bangunan

Analisis mencakup 38.111 unit bangunan pada sebelas desa. Distribusi kelas bahayanya disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Distribusi kelas bahaya pada unit bangunan

Kelas bahaya	T20	T50	T100	Perubahan (%)
H1	22.023	22.843	23.361	+6,07
H2	1.831	2.115	2.262	+23,53
H3	599	710	870	+45,24
H4	21	22	28	+33,33
H5 sampai H6	1	4	7	+600,00
Total terdampak	24.475	25.694	26.528	+8,38
Tidak tergenang	13.636	12.417	11.583	-15,05

Pola yang sama berulang pada tingkat unit bangunan. Jumlah bangunan terdampak naik 8,38%, sedangkan sebarannya bergeser ke kelas yang lebih tinggi dengan H3 bertambah 45,24% dan H5 sampai H6 bertambah dari 1 menjadi 7 unit.

Tingkat keterpaparan tidak selalu sejalan dengan tingkat bahayanya. Dermo memiliki keterpaparan tertinggi dengan rasio 99,80% dan 679 bangunan pada kelas H2, tetapi tidak memiliki bangunan pada H4 maupun H5 sampai H6. Bakalan dan Maron sebaliknya memusatkan bangunan pada kelas yang lebih berbahaya, yaitu 322 unit H3 dan 17 unit H4 di Bakalan serta 183 unit H3, 8 unit H4, dan 3 unit H5 sampai H6 di Maron. Kedua desa tersebut menampung 58,0% seluruh bangunan berkelas H3 dan 89,3% bangunan berkelas H4 di wilayah studi. Hasil pemodelan tidak menyatakan bangunan akan runtuh, sehingga tujuh unit pada kelas H5 sampai H6 memerlukan pemeriksaan lapangan dan evaluasi kondisi struktur sebelum kesimpulan teknis ditegakkan.

Keterpaparan infrastruktur transportasi

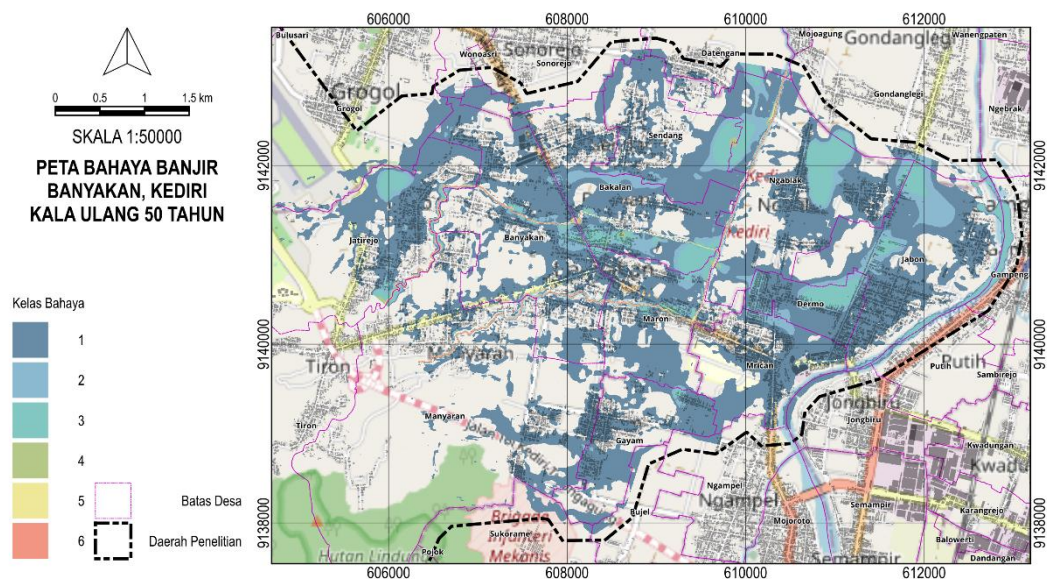
Keterpaparan Jalan Raya Kediri sampai Nganjuk pada skenario T100 disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Keterpaparan segmen Jalan Raya Kediri sampai Nganjuk pada skenario T100

Segmen	Kelas bahaya	Panjang tergenang (m)
Desa Banyakan	H1	461,20
Desa Banyakan	H2	176,50
Desa Banyakan	H4	99,10
Desa Maron	H1	84,00
Desa Maron	H2	62,30
Desa Maron	H3	39,60
Desa Maron	H4	69,90
Desa Maron	H5	49,50

Banyakan memiliki segmen terdampak lebih panjang, yaitu 736,80 m berbanding 305,30 m di Maron, tetapi Maron memiliki sebaran kelas yang lebih berat dengan 52% segmennya berada pada kelas H3 ke atas. Segmen H5 sepanjang 49,50 m di Maron merupakan satu-satunya segmen jalan berkelas H5 di seluruh kawasan analisis, dan berpotensi mengalami kerusakan perkerasan, erosi badan jalan, serta gangguan fondasi. Segmen H4 sepanjang 99,10 m di Banyakan berpotensi menghentikan pergerakan kendaraan pada jalur evakuasi dan distribusi logistik.

Ketiadaan kelas H3 pada ruas jalan Desa Banyakan bukan kejanggalan data melainkan konsekuensi sebaran spasialnya, karena kelas H3 di desa tersebut terbentuk pada area bangunan dan permukiman, bukan pada badan jalan.



Gambar 6. Peta overlay keterpaparan permukiman, unit bangunan, dan segmen jalan arteri terhadap zonasi bahaya pada skenario T100.

Peredaman berjenjang antar indikator bahaya

Sintesis seluruh hasil di atas menghasilkan temuan utama penelitian ini. Rantai konversi dari beban hidrologis menuju bahaya disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Rantai konversi dari debit puncak menuju luas area berbahaya, T20 ke T100

Indikator	T20	T100	Perubahan (%)
Debit puncak gabungan Sink 1	171,8 m ³ /s	241,8 m ³ /s	+40,7
Luas genangan pada daratan 11 desa	618,08 ha	753,45 ha	+21,90
Kedalaman maksimum di luar palung	1,42 m	1,65 m	+16,20
Luas area berbahaya (AIDR)	1.199,31 ha	1.338,53 ha	+11,61
Luas permukiman terdampak	481,20 ha	538,20 ha	+11,85
Unit bangunan terdampak	24.475 unit	26.528 unit	+8,38

Setiap indikator pada rantai tersebut tumbuh lebih lambat daripada indikator sebelumnya. Kenaikan debit sebesar 40,7% hanya terkonversi menjadi 21,90% perluasan genangan, lalu menjadi 16,20% pendalaman maksimum, dan akhirnya menjadi 11,61%

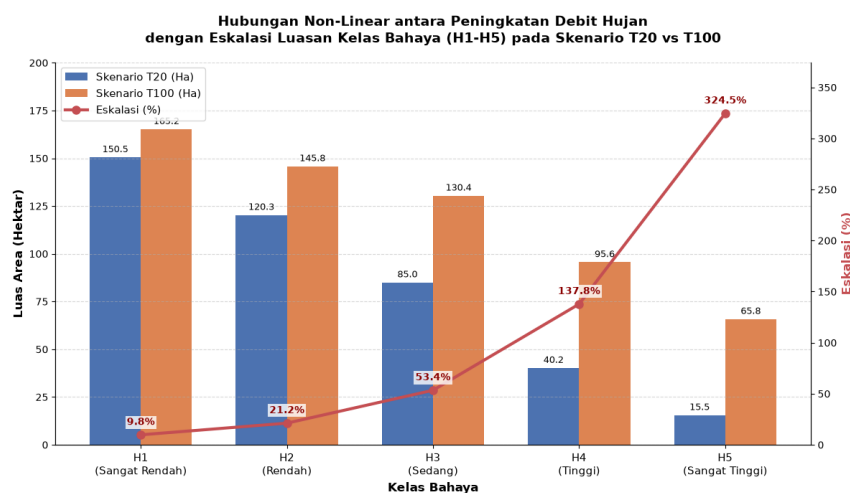
perluasan area berbahaya. Peredaman ini berlangsung secara berjenjang dan konsisten pada kedua lapis keterpaparan.

Mekanismenya dapat ditelusuri pada tiga tahap. Pada tahap pertama, setelah sebagian besar dataran rendah tergenang, kapasitas tampung topografi membatasi perluasan lateral, sehingga tambahan debit tidak seluruhnya terkonversi menjadi area baru. Pada tahap kedua, tambahan air yang tidak menjadi perluasan tersalur menjadi kenaikan muka air, tetapi bertambahnya luas penampang aliran menahan kenaikan kedalaman maksimum sekaligus menurunkan kecepatan pada segmen hilir melalui efek bendung balik. Pada tahap ketiga, penilaian bahaya AIDR menimbang kedalaman bersama kecepatan, sehingga kenaikan kedalaman yang disertai penurunan kecepatan di dataran banjir menghasilkan kenaikan indeks bahaya yang lebih kecil daripada kenaikan kedalamannya sendiri.

Peredaman pada indikator agregat tersebut tidak berarti bahayanya berkurang. Komposisi internalnya bergerak ke arah yang berlawanan. Luas kelas kedalaman 0,5 sampai 1,5 m bertambah 41,20%, hampir setara laju kenaikan debit dan hampir dua kali laju perluasan genangan total. Kelas bahaya H2 dan H3 bertambah 32,13% dan 39,98%, sekitar lima kali laju pertumbuhan H1. Pada kawasan permukiman, kelas H3 bertambah 98,34% sementara luas totalnya hanya bertambah 11,85%. Pada unit bangunan, kelas H3 bertambah 45,24% sementara jumlah total terdampak hanya bertambah 8,38%.

Kedua pola tersebut mengarah pada satu kesimpulan. Ancaman utama pada kala ulang ekstrem di Kawasan Hilir DAS Banyakkan bukan seberapa luas wilayah baru yang terendam, melainkan meningkatnya kedalaman dan tingkat bahaya pada wilayah yang sudah tergenang sejak kala ulang menengah. Wilayah yang perlu ditangani pada T100 sebagian besar merupakan wilayah yang sudah terdampak pada T20, tetapi dengan konsekuensi keselamatan dan kerusakan yang berbeda.

Temuan ini berimplikasi pada cara peta bahaya dibaca dan digunakan. Peta yang hanya menampilkan batas genangan akan menyembunyikan perubahan paling berarti antar kala ulang, karena batas genangan T20 dan T100 relatif berdekatan sementara komposisi bahaya di dalamnya berubah tajam. Evaluasi keterpaparan untuk keperluan tata ruang karena itu perlu menelusuri perpindahan kelas bahaya secara spasial, bukan sekadar membandingkan luas genangan antar skenario.



Gambar 7. Hubungan non-linier antara kenaikan debit puncak dan eskalasi luas kelas bahaya H1 sampai H5 pada skenario T20 terhadap T100.

Prioritas penanganan

Penerapan keempat kriteria pada Subbab 2.7 menghasilkan tiga tingkat prioritas sebagaimana disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Wilayah prioritas penanganan banjir Kawasan Hilir DAS Banyakan

Prioritas	Desa	Dasar penetapan
Utama	Dermo	Rasio keterpaparan permukiman 99,66% dan bangunan 99,80%; 10,74 ha dan 679 unit pada kelas H2
Utama	Bakalan	7,53 ha H3 dan 0,58 ha H4 sampai H5; 322 unit H3 dan 17 unit H4
Utama	Maron	4,05 ha H3; 3 unit H5 sampai H6; segmen jalan H5 sepanjang 49,50 m
Menengah	Ngablak	Rasio keterpaparan bangunan 86,69% dan permukiman 92,01%
Menengah	Jabon	3.304 unit terdampak; 64,83 ha permukiman dengan rasio 83,62%
Menengah	Banyakan	97,20 ha permukiman dan 3.521 unit terdampak; 4 unit H5 sampai H6; segmen jalan H4 sepanjang 99,10 m
Pendukung	Mrican, Manyaran, Gayam, Sendang, Jatirejo	Dominasi H1 dengan pertumbuhan H2 dan H3 yang perlu dipantau

Tiga tipologi bahaya muncul dari pemeringkatan tersebut, dan masing-masing menuntut bentuk penanganan yang berbeda.

Tipologi pertama berupa keterpaparan hampir menyeluruh dengan bahaya menengah, yang diwakili Desa Dermo. Hampir seluruh kawasan permukimannya berada pada dataran banjir aktif, sehingga penanganannya diarahkan pada peningkatan kapasitas jalur evakuasi, akses darurat, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Tipologi kedua berupa konsentrasi bahaya tinggi pada luas yang terbatas, yang diwakili Bakalan dan Maron. Kedua desa ini menampung mayoritas bangunan berkelas H3 dan H4 di wilayah studi meskipun luas permukimannya tidak dominan. Penanganannya berbentuk pengendalian pembangunan, penyediaan jalur evakuasi, penerapan bangunan adaptif banjir, dan pada kasus Maron juga evaluasi teknis struktur jalan arteri.

Tipologi ketiga berupa genangan dangkal yang luas, yang diwakili Banyakan, Jabon, dan Ngablak. Tingkat bahayanya relatif rendah, tetapi luas dan durasi genangannya mengganggu aksesibilitas serta aktivitas sosial dan ekonomi. Penanganannya diarahkan pada pengurangan luas dan durasi genangan melalui peningkatan kapasitas drainase mikro dan pengelolaan limpasan permukaan.

Karena sekitar 81% area terdampak pada T100 masih berada pada kelas H1, program yang diseragamkan pada seluruh kawasan akan menghabiskan sumber daya pada wilayah berbahaya rendah sekaligus melewati titik kritis yang luas absolutnya kecil tetapi tumbuh paling cepat. Bentuk mitigasi yang sesuai dengan pola peredaman berjenjang adalah intervensi titik pada lokasi prioritas, bukan perluasan cakupan penanganan.

Rentang waktu antara respons hidrologis hulu dan beban puncak di kawasan terbangun yang hanya 1 jam 48 menit sampai 2 jam 25 menit menuntut agar perlindungan fisik

diintegrasikan dengan sistem peringatan dini berbasis pemantauan curah hujan hulu. Debit gabungan di Sink 1 sebesar 241,8 m³/s pada T100 dapat digunakan sebagai debit desain untuk evaluasi kapasitas penampang dan perencanaan tanggul di wilayah hilir.

Keterbatasan

Model dikalibrasi dan divalidasi terhadap satu kejadian banjir, yaitu 23 sampai 24 Desember 2024, yang besarnya mendekati hujan rancangan kala ulang 10 tahun. Debit rancangan T100 sekitar 1,6 kali lebih besar daripada beban kejadian kalibrasi, sehingga ekstrapolasi mengasumsikan parameter kekasaran tetap valid pada kedalaman dan kecepatan yang lebih tinggi. Asumsi tersebut belum diuji secara langsung, dan pengujiannya menuntut kalibrasi multi-kejadian pada rentang besaran yang lebih lebar.

Ketelitian data acuan membatasi tingkat kesesuaian yang dapat dicapai. Kedalaman genangan lapangan dicatat pada kelipatan 0,1 m dengan ketidakpastian sekitar $\pm 0,05$ m, setara simpangan baku 28,9 mm, yang menjadi batas bawah teoretis bagi RMSE model. Jumlah titik observasi juga terbatas pada delapan lokasi.

Fitur mikro-drainase seperti parit selebar 0,8 m, gorong-gorong, dan kontur camber perkerasan berukuran lebih kecil daripada sel komputasi 4 sampai 6 m maupun DEM yang digunakan. Pola genangan pada lokasi berdrainase mikro padat seperti Simpang Banyak karena itu belum terwakili sepenuhnya, dan genangan dangkal pada jalan serta permukiman berpotensi terlalu tinggi. Pemodelan gabungan satu dimensi dan dua dimensi disarankan untuk menekan deviasi tersebut.

Lokasi luapan diidentifikasi dari keluaran model, yaitu sel di luar palung sungai yang tercatat tergenang, bukan dari selisih elevasi muka air terhadap puncak jalan dan tanggul. Pendekatan ini cukup untuk menetapkan lokasi luapan tetapi belum cukup untuk menyatakan besar kelebihan muka air terhadap puncak struktur secara kuantitatif.

Pemodelan mengunci kondisi tata guna lahan, infrastruktur, dan iklim pada saat penelitian dilakukan. Hasilnya paling relevan untuk mengevaluasi kondisi dan kerentanan eksisting, dan belum dapat langsung digunakan untuk proyeksi rencana tata ruang jangka panjang tanpa memasukkan skenario perubahan tata guna lahan serta proyeksi iklim.

KESIMPULAN

Zonasi bahaya banjir Kawasan Hilir DAS Banyak disusun dari kombinasi kedalaman dan kecepatan aliran hasil simulasi hidrodinamika dua dimensi terkalibrasi pada kala ulang 20, 50, dan 100 tahun. Model mencapai RMSE 0,0176 m, NSE 0,9854, dan PBIAS +0,95% pada tujuh titik observasi kejadian 23 sampai 24 Desember 2024, dengan galat neraca massa di bawah 0,001% pada seluruh skenario.

Kenaikan kala ulang dari T20 ke T100 menaikkan debit puncak gabungan 40,7% dari 171,8 menjadi 241,8 m³/s. Kenaikan tersebut terkonversi secara berjenjang dengan proporsi yang mengecil pada setiap tahap, yaitu luas genangan bertambah 21,90% dari 618,08 menjadi 753,45 ha, kedalaman maksimum di luar palung naik 16,20% dari 1,42 menjadi 1,65 m, dan luas area berbahaya menurut AIDR Guideline 7-3 bertambah 11,61% dari 1.199,31 menjadi 1.338,53 ha.

Komposisi internal bahaya bergerak berlawanan arah dengan peredaman agregat tersebut. Kelas H1 tetap mendominasi dengan 81,16% area terdampak pada T100 dan tumbuh paling lambat pada 7,08%, sedangkan kelas menengah tumbuh sekitar lima kali lebih cepat,

yaitu H2 sebesar 32,13% dan H3 sebesar 39,98%. Kelas kedalaman 0,5 sampai 1,5 m bertambah 41,20%. Pola yang sama berulang pada keterpaparan, dengan luas permukiman terdampak bertambah 11,85% sementara kelas H3 di dalamnya bertambah 98,34%, dan jumlah bangunan terdampak bertambah 8,38% sementara kelas H3 bertambah 45,24%.

Ancaman utama pada kala ulang ekstrem karena itu berupa penguatan bahaya pada wilayah yang sudah tergenang, bukan perluasan wilayah terdampak. Konsekuensi praktisnya, penambahan kapasitas tampungan dan perlindungan setempat pada lokasi prioritas lebih relevan daripada perluasan cakupan penanganan. Integrasi bahaya dan keterpaparan menempatkan Desa Dermo, Bakalan, dan Maron sebagai prioritas utama, Desa Ngablak, Jabon, dan Banyakan sebagai prioritas menengah, serta Mrican, Manyaran, Gayam, Sendang, dan Jatirejo sebagai wilayah pendukung.

REFERENSI

- AIDR. (2017). Australian Institute for Disaster Resilience.
- Ansori, M.B. et al., (2025) "Flood Modeling and Inundation Mapping using the HEC-RAS 2D Hydrodynamic Model with a Meteorological Rain-on-Grid Approach: A Case Study of the Banyakan Area, Kediri Regency," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1551/1/012034>
- Brotowiryatmo, S.H. (2016) "Review of Rainfall Hourly Distribution on the Island of Java," *Journal of the Civil Engineering Forum*, 2(1), hlm. 145. <https://doi.org/10.22146/jcef.26479>
- Brunner, G.W. (2026) *HEC-RAS 2D User's Manual*. Davis, California: Hydrologic Engineering Center.
- Costabile, P., Costanzo, C. dan Macchione, F. (2017) "Performances and Limitations of the Diffusive Approximation of the 2-D Shallow Water Equations for Flood Simulation in Urban and Rural Areas," *Applied Numerical Mathematics*, 116, hlm. 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2016.07.003>
- Costabile, P. et al., (2021) "Is HEC-RAS 2D Accurate Enough for Storm-Event Hazard Assessment? Lessons Learnt from a Benchmarking Study Based on Rain-on-Grid Modelling," *Journal of Hydrology*, 603, hlm. 126962. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126962>
- David, A. dan Schmalz, B. (2020) "Flood Hazard Analysis in Small Catchments: Comparison of Hydrological and Hydrodynamic Approaches by the Use of Direct Rainfall," *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), hlm. e12639. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12639>
- Hosking, J.R.M. (1990) "L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics," *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 52(1), hlm. 105–124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- Hosking, J.R.M. dan Wallis, J.R. (1997) *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>
- Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia (2014) *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 12/PRT/M/2014*. Jakarta.

- Kurnianingsih, O. et al., (2026) "Risk-Based Zoning for Urban Flood Mitigation Using HEC-HMS–HEC-RAS 2D Areas," *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, 8(1). <https://doi.org/10.26877/asset.v8i1.2566>
- Lazović, N. dan Mulaomerović-Šeta, A. (2025) "Integrated Flood Hazard Assessment using GIS and 2D Hydraulic Modelling: A Case Study of Sanica River, Bosnia and Herzegovina," *European Journal of Computational Mechanics*, 34(3), hlm. 299–324. <https://doi.org/10.13052/ejcm2642-2085.34345>
- Moriasi, D.N. et al., (2007) "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations," *Transactions of the ASABE*, 50(3), hlm. 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nandam, V. dan Patel, P.L. (2024) "A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions," *Journal of Hydrology*, 630. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130654>
- Néelz, S. dan Pender, G. (2013) *Benchmarking the Latest Generation of 2D Hydraulic Modelling Packages*. Bristol: Environment Agency.
- Papaoiannou, G. et al., (2018) "An operational method for Flood Directive implementation in ungauged urban areas," *Hydrology*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>
- Schubert, J.E. dan Sanders, B.F. (2012) "Building Treatments for Urban Flood Inundation Models and Implications for Predictive Skill and Modeling Efficiency," *Advances in Water Resources*, 41, hlm. 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012>
- Sirko, W. et al., (2021) "Continental-Scale Building Detection from High Resolution Satellite Imagery," *arXiv preprint arXiv:2107.12283*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.12283>
- Sri Harto, B. (1993) *Analisis Hidrologi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Supari et al., (2017) "Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia," *International Journal of Climatology*, 37(4), hlm. 1979–1997. <https://doi.org/10.1002/joc.4829>
- USDA-SCS (1986) *Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release No. 55 (TR-55)*. Washington DC: United States Department of Agriculture.
- Zeiger, S.J. dan Hubbard, J.A. (2021) "Measuring and Modeling Event-Based Environmental Flows: An Assessment of HEC-RAS 2D Rain-on-Grid Simulations," *Journal of Environmental Management*, 285, hlm. 112125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125>
- Zotou, I., Bellos, V. dan Tsihrintzis, V.A. (2025) "Calibration framework for complex 2D hydrodynamic models: Use of satellite-derived flood extent and water depth data, and evaluation with various performance metrics," *Advances in Water Resources*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2025.105066>