



Pemetaan Kerentanan Banjir Berbasis Karakteristik Sosio-Hidrologi di DAS Wae Batu Merah, Kota Ambon

(Flood Vulnerability Mapping Using a Socio-Hydrology Approach in the Wae Batu Merah Watershed, Ambon City)

Syamsul Fallah Kelihu¹, Bokiraiya Latuamury^{1a,b} & Rina Suryani Oktari^{2a,b}

¹ Program Studi Manajemen Hutan, Pascasarjana Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Kota Ambon, Maluku 97233, Indonesia

^{1a} Program Studi Manajemen Hutan, Pascasarjana Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Kota Ambon, Maluku 97233, Indonesia

^{1b} Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Pertanian Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Kota Ambon, Maluku 97233, Indonesia

^{2a} Fakultas Kedokteran, Universitas Syiah Kuala, Jl. Tgk. Syech Abdul Rauf, Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia

^{2b} Program Pascasarjana Ilmu Kebencanaan, Universitas Syiah Kuala, Jl. Hamzah Fansuri No. 4, Gedung Hyogo Prefecture, Darussalam, Banda Aceh, 23111, Indonesia

Informasi Artikel:

Submission : 02 Juli 2025
Revised : 13 Oktober 2025
Accepted : 14 Oktober 2025
Published : 01 November 2025

*Penulis Korespondensi:

Syamsul Fallah Kelihu
Program Studi Manajemen Hutan,
Pascasarjana Universitas Pattimura, Jl. Ir. M.
Putuhena, Kampus Poka, Kota Ambon,
Maluku 97232, Indonesia
e-mail: sulkelihu@gmail.com
Telp: +62 822-2806-9879

Makila 19 (2) 2025: 340-358

DOI:
<https://doi.org/10.30598/makila.v19i2.20508>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Copyright ©2025 Author(s): Syamsul Fallah Kelihu, Bokiraiya Latuamury & Rina Suryani Oktari

Journal homepage:
<https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila>
Journal e-mail: makilajournal@gmail.com

Research Article · [Open Access](#)

ABSTRACT

This study evaluates the flood vulnerability conditions of the Wae Batu Merah Watershed (Ambon City) through a socio-hydrology approach that integrates upland ecological dynamics with downstream exposure, sensitivity, and adaptive capacity. A mixed-methods design combined geospatial analysis and household surveys. Landsat-8 imagery (2013–2023) quantified land-cover change and NDVI trends, while BMKG rainfall records (2012–2023) and BPBD flood archives (2013–2022) captured hydrometeorological variability. Peak discharge measurements (2013–2023) characterized flow response. Social data from 178 households included settlement density, poverty, vulnerable age groups, disability, and institutional participation. All indicators were normalized and integrated using Multi-Criteria Evaluation (MCE) in GIS; vulnerability classes were validated through observed flood-point overlays, distinguishing areal distribution from point aggregation. Results show a ~42% loss of upstream vegetation concurrent with a decline in NDVI from 0.46 (2013) to 0.28 (2023), alongside a ~17% increase in peak discharge, evidenced by a strong negative NDVI-runoff correlation. High-to-very-high vulnerability zones cluster along riparian corridors (Batu Merah-Rijali), whereas >90% of the area falls into medium-to-low classes with fewer flood points. Social vulnerability co-occurs with high density, poverty, limited risk awareness, and weak institutional engagement. The socio-hydrology-MCE framework offers a replicable basis for adaptive risk governance, prioritizing riparian setbacks, vegetation rehabilitation, density management, and capacity-building under increasing climatic pressure.

KEYWORDS: Flood vulnerability mapping; socio-hydrology; NDVI; Multi-Criteria Evaluation

INTISARI

Kerentanan banjir di kota pulau kecil dipengaruhi oleh interaksi proses biofisik dan faktor sosial. Studi ini menilai kerentanan dataran banjir DAS Wae Batu Merah menggunakan lensa sosio-hidrologi yang menghubungkan degradasi ekologi hulu, dinamika hidrometeorologi, dan karakteristik komunitas hilir. Desain metode campuran mengintegrasikan analisis geospasial serta survei rumah tangga. Citra Landsat-8 (2013–2023) digunakan untuk menilai perubahan tutupan lahan dan NDVI; curah hujan BMKG (2012–2023), catatan banjir BPBD (2013–2022), dan debit puncak (2013–2023) menggambarkan respons hidrologis. Data sosial dari 178 rumah tangga mencakup kepadatan, kemiskinan, umur rentan, disabilitas, dan partisipasi kelembagaan. Seluruh indikator dinormalisasi dan diintegrasikan melalui Multi-Criteria Evaluation (MCE) berbasis SIG; peta divalidasi dengan overlay titik kejadian banjir, dibedakan antara proporsi luas areal dan distribusi titik. Vegetasi hulu menurun $\approx 42\%$ (NDVI 0,46 menjadi 0,28), diikuti kenaikan debit puncak $\approx 17,3\%$. Peta kerentanan lima kelas memperlihatkan konsentrasi risiko tinggi–sangat tinggi pada bantaran sungai dan permukiman padat (Batu Merah–Rijali), sedangkan kelas sedang–rendah mencakup $>90\%$ area dengan titik banjir lebih sedikit. Kerentanan sosial dipengaruhi kepadatan tinggi, kemiskinan, literasi bencana rendah, serta lemahnya jejaring kelembagaan. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi operasional sosio-hidrologi, pemisahan metrik areal dan titik, serta argumentasi pembobotan indikator sosial, sehingga menyediakan dasar bagi tata kelola risiko banjir di kota-kota pulau kecil.

KATA KUNCI: kerentanan banjir; sosio-hidrologi; NDVI; Multi-Criteria Evaluation.

PENDAHULUAN

Kawasan dataran banjir Daerah Aliran Sungai (DAS) Wae Batu Merah di Kota Ambon merupakan salah satu wilayah dengan tingkat paparan hidrometeorologis yang tinggi dan menjadi prioritas dalam mitigasi risiko bencana di kawasan Indonesia timur (Latuamury, Marasabessy, *et al.*, 2021). Dalam dua dekade terakhir, intensitas dan frekuensi kejadian banjir di wilayah ini terus menunjukkan tren eskalatif. Berdasarkan laporan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kota Ambon (2023), tercatat lebih dari 30 kejadian banjir besar sejak tahun 2010 yang menyebabkan kerusakan infrastruktur, gangguan aktivitas ekonomi masyarakat, serta penurunan fungsi ekologis daerah tangkapan air. Kondisi ini diperburuk oleh dinamika perubahan iklim global – khususnya peningkatan frekuensi curah hujan ekstrem dan ketidakstabilan pola cuaca – yang umum terjadi pada wilayah tropis kepulauan seperti Maluku (Jun *et al.*, 2020; Knighton *et al.*, 2020). Situasi tersebut menunjukkan urgensi pendekatan pemetaan risiko bencana yang mampu menangkap interaksi antara faktor biofisik dan sosial secara lebih komprehensif.

Secara biofisik, DAS Wae Batu Merah didominasi oleh topografi datar dengan tanah aluvial yang cenderung mudah jenuh air, sehingga kapasitas retensi dan infiltrasi relatif rendah (Latuamury, Marasabessy, *et al.*, 2021; Oktari *et al.*, 2023). Dalam satu dekade terakhir, kawasan hulu mengalami degradasi tutupan vegetasi akibat konversi lahan menjadi permukiman padat dan infrastruktur. Studi Latuamury *et al.*, (2016) dan Latuamury *et al.*, (2021) mencatat penurunan lebih dari 40% tutupan vegetasi hulu antara tahun 2013 hingga 2023. Modifikasi lanskap ini berimplikasi langsung terhadap peningkatan limpasan permukaan, debit puncak sungai, dan akumulasi genangan di zona hilir, sehingga memperbesar eksposur masyarakat terhadap banjir (Coletta *et al.*, 2024; York *et al.*, 2019). Temuan tersebut mengisyaratkan bahwa tekanan biofisik yang berasal dari degradasi tutupan lahan memiliki keterkaitan erat dengan kompleksitas risiko banjir di wilayah ini.

Selain faktor biofisik, aspek sosial turut menentukan tingkat kerentanan masyarakat dataran banjir. Mayoritas penduduk di kawasan tersebut merupakan kelompok ekonomi rentan dengan tingkat pendidikan rendah serta akses terbatas terhadap sistem informasi kebencanaan (Latuamury, Imlabla, *et al.*, 2025). Karakteristik sosial ini melemahkan kapasitas adaptif komunitas dalam merespons bencana secara mandiri. Oktari *et al.*, (2020) menegaskan bahwa dimensi sosial berpengaruh kuat terhadap skala dan dampak risiko bencana di kawasan urban tropis. Namun demikian, pendekatan teknokratis masih mendominasi praktik pemodelan risiko banjir di Indonesia, yang cenderung berfokus pada parameter fisik seperti curah hujan, elevasi, dan jarak terhadap badan air. Minimnya integrasi indikator sosial dalam pemodelan mengakibatkan keluaran yang belum sepenuhnya merepresentasikan kerentanan masyarakat secara holistik (Hakim *et al.*, 2024; Sivapalan *et al.*, 2012). Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk mengembangkan pendekatan yang mampu mengakomodasi interaksi dinamis antara sistem hidrologi dan perilaku sosial.

Pendekatan socio-hydrology menawarkan kerangka interdisipliner yang relevan untuk menjawab kesenjangan tersebut, karena memadukan dinamika biofisik dengan respon sosial masyarakat. Dikembangkan oleh Sivapalan *et al.*, (2012) dan diperluas oleh Di Baldassarre *et al.*, (2015), socio-hydrology mengkaji hubungan timbal balik antara perubahan tutupan lahan, variabilitas curah hujan, kapasitas kelembagaan, dan pola perilaku komunitas terhadap risiko air. Dalam penelitian ini, socio-hydrology diimplementasikan melalui integrasi data biofisik – meliputi curah hujan, jenis tanah, NDVI, kemiringan lereng, dan elevasi – dengan indikator sosial seperti pendapatan rumah tangga, tingkat pendidikan, dan partisipasi warga dalam forum mitigasi. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan Multi-Criteria Evaluation (MCE) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menghasilkan komposit risiko spasial yang lebih representatif (Gober & Wheeler, 2015; Mazzoleni *et al.*, 2021; Ruknul Ferdous *et al.*, 2018). Pendekatan ini tidak hanya menilai paparan biofisik, tetapi juga memetakan kapasitas sosial yang mempengaruhi daya lenting masyarakat.

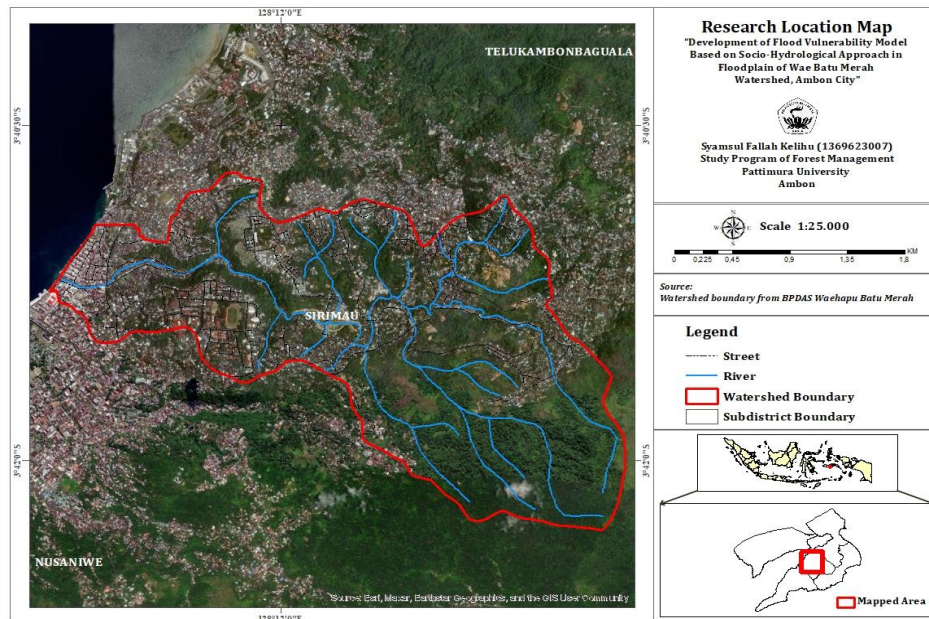
Selain socio-hydrology, penelitian ini juga mengacu pada kerangka Social Vulnerability Index (SoVI) sebagaimana dikembangkan oleh Madani & Shafiee-Jood, (2020) dan Salazar-Briones *et al.*, (2020), yang menekankan pentingnya indikator sosial – terutama pendidikan, ekonomi, dan partisipasi kelembagaan – dalam pembentukan kerentanan terhadap bencana. Melalui overlay parameter biofisik dan sosial, pemetaan kerentanan dapat mengidentifikasi zona kritis yang tidak semata-mata disebabkan oleh kedekatan dengan sumber bahaya, tetapi juga oleh lemahnya kapasitas sosial masyarakat (Wałęga, 2015; Yu *et al.*, 2022). Integrasi kedua pendekatan ini memberikan perspektif yang lebih adil, partisipatif, dan kontekstual dalam memahami risiko banjir, serta berpotensi meningkatkan efektivitas intervensi mitigasi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memetakan kerentanan risiko banjir secara spasial melalui integrasi indikator fisik DAS dan kondisi sosial masyarakat setempat menggunakan pendekatan socio-hydrology. Kontribusi penelitian bersifat teoretis dan praktis. Secara teoretis, penelitian ini memperluas penerapan socio-hydrology pada konteks wilayah tropis kepulauan yang rentan terhadap dampak perubahan iklim. Secara praktis, hasil pemetaan dapat menjadi dasar bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan lainnya dalam penyusunan rencana tata ruang, perencanaan kontinjensi kebencanaan, serta pengembangan program mitigasi berbasis masyarakat. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap determinan kerentanan banjir di kawasan dataran banjir perkotaan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Wae Batu Merah, Kota Ambon, Provinsi Maluku, pada bulan Desember hingga Februari 2025. Lokasi ini dipilih karena karakteristik dataran banjirnya yang datar dan rendah, sehingga rentan terhadap genangan air. Selain faktor fisik, keberagaman kondisi sosial seperti kepadatan penduduk, kualitas infrastruktur, dan kapasitas adaptasi masyarakat turut menjadikan kawasan ini penting untuk dikaji. Peta lokasi penelitian disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan spasial melalui integrasi data primer dan sekunder untuk memperkuat validitas analisis socio-hydrology. Empat kelompok data utama digunakan, yaitu: (1).Data penginderaan jauh meliputi: Citra satelit Landsat 8 OLI/TIRS (2013–2023) dari USGS untuk analisis perubahan tutupan lahan dan perhitungan NDVI sebagai indikator degradasi vegetasi; (2). Data klimatologis meliputi: Data curah hujan harian dan tahunan (2012–2023) dari BMKG Ambon untuk menganalisis dinamika hidrometeorologi; (3).Data sosial-ekonomi meliputi: Survei terhadap 178 rumah tangga di zona rawan banjir, mencakup variabel Social Vulnerability Index (SoVI) seperti pendapatan, pendidikan, dan partisipasi kelembagaan; dan (4).Data historis banjir meliputi: Laporan BPBD Kota Ambon (2013–2022) yang memuat lokasi kejadian, dampak fisik, dan jumlah korban terdampak.

Keempat kelompok data tersebut diolah menggunakan perangkat lunak QGIS dan ENVI, dalam kerangka socio-hydrology sebagaimana dikembangkan oleh Sivapalan *et al.*, (2012) dan Wałęga, (2015). Pendekatan ini memastikan hasil analisis bersifat komprehensif, berbasis bukti, dan relevan untuk mendukung kebijakan pengelolaan risiko bencana di kawasan pesisir kepulauan.

Tabel 1. Jenis dan sumber data penelitian

No.	Jenis Data	Kategori	Sumber Data	Fungsi Analisis
1	Data penginderaan jauh	Sekunder	USGS, Landsat 8 (2013–2023)	Analisis NDVI dan perubahan tutupan lahan
2	Data klimatologis	Sekunder	BMKG Stasiun Ambon (2012–2023)	Analisis tren curah hujan dan kejadian ekstrem
3	Data sosial-ekonomi	Primer	Survei 178 rumah tangga	Analisis kerentanan sosial dan kapasitas adaptif

No.	Jenis Data	Kategori	Sumber Data	Fungsi Analisis
4	Data historis banjir	Sekunder	BPBD Kota Ambon (2013–2022)	Validasi spasial hasil model kerentanan

Sumber: Analisis data primer, 2025

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dirancang dalam tiga tahap utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan pemetaan kerentanan banjir berbasis socio-hydrology. Setiap tahap disusun untuk menjawab tujuan penelitian dengan mempertimbangkan kompleksitas sistem sosial dan ekologis di kawasan dataran banjir DAS Wae Batu Merah.

Tahap Pertama: Analisis Biofisik DAS, Tahap ini berfokus pada pemetaan kondisi biofisik DAS melalui interpretasi citra satelit multispektral dan analisis spasial berbasis SIG. Citra Landsat 8 OLI/TIRS periode 2013–2023 dianalisis menggunakan perangkat lunak ENVI 5.3 dan QGIS 3.28 untuk mengidentifikasi dinamika perubahan tutupan lahan dan menghitung nilai NDVI sebagai indikator degradasi vegetasi (Latuamury, Imlabla, *et al.*, 2025). Selain itu, informasi biofisik seperti kemiringan lereng, elevasi, dan jarak terhadap sungai diekstraksi dari data Digital Elevation Model (DEM) dengan resolusi 30 meter. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk merepresentasikan potensi bahaya hidrologis berdasarkan karakteristik topografi DAS (Latuamury *et al.*, 2020).

Tahap Kedua: Analisis Sosial-Ekonomi, mencakup pengumpulan data sosial-ekonomi untuk menilai kapasitas adaptif masyarakat terhadap risiko banjir. Survei dilakukan menggunakan metode purposive sampling, yang menargetkan rumah tangga di zona rawan banjir berdasarkan hasil overlay antara peta bahaya banjir dan peta permukiman. Instrumen survei berupa kuesioner terstruktur yang memuat variabel sosial-ekonomi (pendapatan, pendidikan, pekerjaan), indikator kerentanan sosial (akses terhadap asuransi, tabungan, dan cadangan ekonomi), serta dimensi kelembagaan (partisipasi dalam forum mitigasi dan tingkat kepercayaan terhadap institusi pemerintah). Validitas instrumen diuji melalui expert judgment oleh pakar kebencanaan dan sosial, sementara reliabilitas diuji menggunakan Cronbach's Alpha dengan nilai ambang minimum 0,70 sesuai standar psikometri (Hakim *et al.*, 2024; Thaler, 2021).

Tahap Ketiga: Integrasi Spasial dan Pemodelan MCE. Berdasarkan hasil analisis biofisik dan sosial, tahap ketiga mengintegrasikan keduanya ke dalam kerangka spasial menggunakan pendekatan Multi-Criteria Evaluation (MCE). Metode ini memungkinkan analisis komposit yang menggabungkan indikator fisik dan sosial secara kuantitatif (Podhajska *et al.*, 2021; Santosa *et al.*, 2022). Model ini memanfaatkan enam layer utama: curah hujan tahunan, tutupan lahan (NDVI), kemiringan lereng, elevasi, jarak terhadap sungai (buffer 100 m), dan jenis tanah. Setiap layer direklasifikasi menggunakan sistem skoring ordinal 1–5 untuk menggambarkan tingkat kerentanan dari sangat rendah hingga sangat tinggi. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil zonasi kerentanan dengan titik kejadian banjir aktual berdasarkan data BPBD Kota Ambon (2013–2022). Analisis akurasi dilakukan menggunakan confusion matrix dan koefisien Kappa, guna

menilai kesesuaian antara hasil pemodelan dan kondisi empiris di lapangan (Chan *et al.*, 2022; Rehman *et al.*, 2019). Melalui integrasi ini, penelitian menghasilkan pemetaan kerentanan banjir yang menyatukan aspek fisik dan sosial dalam satu sistem analisis spasial. Model ini diharapkan menjadi dasar untuk pengembangan strategi mitigasi adaptif yang dapat direplikasi di wilayah kepulauan tropis lainnya.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan pendekatan kuantitatif-spasial dan statistik yang menggabungkan metode geospasial dan inferensial. Pemodelan spasial menggunakan teknik weighted overlay analysis dalam platform ArcGIS dan QGIS. Formula matematis untuk perhitungan indeks kerentanan banjir (*Flood Vulnerability Index - FVI*) adalah sebagai berikut (Udnoon *et al.*, 2022; Zachos *et al.*, 2016):

$$FVI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

FVI = Nilai indeks kerentanan banjir; xi = Nilai skor dari layer ke-iii (misalnya: NDVI, curah hujan, elevasi, lereng, jarak ke sungai, jenis tanah); wi = Bobot dari layer ke-iii; n = Jumlah total layer spasial yang digunakan (n = 6 dalam penelitian ini). Setiap layer diklasifikasi menjadi skala ordinal 1-5 berdasarkan tingkat kerentanannya.

Nilai NDVI digunakan untuk mengidentifikasi tingkat tutupan vegetasi sebagai indikator degradasi ekologis. Klasifikasi NDVI dalam lima kelas adalah sebagai berikut:

Kelas NDVI	Rentang Nilai	Kategori Vegetasi
1	< 0.10	Tidak ada vegetasi (sangat rendah)
2	0.10 - 0.25	Vegetasi jarang (rendah)
3	0.26 - 0.40	Vegetasi sedang
4	0.41 - 0.60	Vegetasi lebat (tinggi)
5	> 0.60	Vegetasi sangat lebat (sangat tinggi)

Korelasi antara nilai NDVI dan debit puncak sungai dianalisis menggunakan koefisien korelasi Pearson untuk menilai hubungan antara degradasi vegetasi dan peningkatan limpasan permukaan. Validasi dilakukan dengan overlay spasial antara hasil klasifikasi kerentanan dan titik kejadian banjir aktual (BPBD, 2013-2022). Analisis ini menggunakan koefisien korelasi Pearson:

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]} \dots\dots\dots (2)$$

Analisis sosial dilakukan dalam dua tahap: (1). Analisis deskriptif, untuk menggambarkan distribusi variabel sosial seperti pendapatan, pendidikan, pekerjaan, dan partisipasi kelembagaan; dan (2). Analisis inferensial (tabulasi silang), untuk mengidentifikasi pola hubungan antara variabel sosial dengan kelas kerentanan yang dihasilkan. Melalui pendekatan ini, hasil penelitian diharapkan

tidak hanya merepresentasikan risiko fisik banjir, tetapi juga menampilkan dimensi sosial yang menentukan daya lenting masyarakat terhadap bencana.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisik dan Hidrologis Wilayah Studi

Karakteristik fisik dan hidrologis wilayah studi pada DAS Wae Batu Merah memperlihatkan kontras spasial yang tegas antara hulu-tengah dan hilir. Secara keseluruhan, DAS didominasi lereng curam di bagian hulu dan tengah – lereng 25–45% sekitar 228,13 ha; sangat curam >45% sekitar 72,27 ha; dan agak curam 15–25% sekitar 180,23 ha – sementara di bagian hilir didominasi dataran sempit-datar hingga landai (0–8% sekitar 67,77 ha; 8–15% sekitar 120,97 ha). Konfigurasi ini memicu aliran permukaan yang cepat pada segmen hulu-tengah dan akumulasi limpasan di hilir yang berpenduduk padat. Pada episode hujan tinggi atau ketika terjadi *backwater effect* dari muara, karakteristik tersebut meningkatkan peluang genangan dan memperpanjang durasi surut air.

Zona dataran banjir hilir berada pada elevasi <10–50 mdpl, dengan luas dataran rendah sekitar 152,02 ha dan kemiringan 0–15% mencapai ±188,76 ha. Segmen ini berperan sebagai muara aliran utama yang menerima limpasan dari hulu, yang dalam satu dekade terakhir mengalami konversi penutup lahan cukup intensif. Mekanisme pengendali hidrologi yang menautkan temuan lintas-parameter dapat dirumuskan ringkas sebagai: degradasi vegetasi → penurunan infiltrasi → peningkatan koefisien limpasan → kenaikan debit puncak (Q_{max}). Rantai proses ini menjelaskan mengapa perubahan penutup lahan di hulu dengan cepat termanifestasi sebagai respons hidrologi yang lebih ekstrem di hilir (lihat **Gambar 3–4**).

Dinamika penutup lahan yang ditangkap oleh citra Landsat 8 menunjukkan penurunan NDVI rata-rata hulu dari 0,46 (2013) menjadi 0,28 (2023), bersamaan dengan konversi kumulatif sekitar 42% dari hutan sekunder/semak ke lahan terbangun. Dalam naskah ini, vegetasi penyangga didefinisikan sebagai sabuk vegetasi riparian selebar ±30–50 m di sepanjang koridor sungai serta seluruh tutupan vegetasi pada sub-area hulu yang berfungsi memperlambat aliran, meningkatkan infiltrasi, dan menstabilkan tebing. Lahan terbangun mencakup permukiman, jaringan jalan, fasilitas publik/komersial, atap bangunan, dan area kedap lainnya yang relevan secara hidrologis. Rangkuman evolusi NDVI dan alih guna lahan disajikan pada **Tabel 2** (lihat **Tabel 2**).

Tabel 2. Tutupan lahan dan indeks vegetasi NDVI Periode 2013–2023

Tahun	NDVI Rata-rata Hulu DAS	Luas Vegetasi Penyangga (ha)	Luas Permukiman dan Lahan Terbangun (ha)
2013	0.46	100	50
2014	0.44	95.8	54.2
2015	0.42	91.6	58.4
2016	0.41	87.4	62.6
2017	0.39	83.2	66.8
2018	0.37	79	71

Tahun	NDVI Rata-rata Hulu DAS	Luas Vegetasi Penyangga (ha)	Luas Permukiman dan Lahan Terbangun (ha)
2019	0.35	74.8	75.2
2020	0.33	70.6	79.4
2021	0.32	66.4	83.6
2022	0.3	62.2	87.8
2023	0.28	58	92

Sumber: Analisis citra satelit Landsat 8 Periode 2013-2023

Variabilitas curah hujan tahunan berdasarkan data BMKG Ambon memperlihatkan rata-rata 2012–2023 sebesar 3.401 mm/tahun, dengan nilai tertinggi pada 2017 (5.435 mm) dan terendah pada 2020 (994 mm). Korelasi deskriptif menunjukkan bahwa tahun-tahun basah – misalnya 2017 dan 2021 – berimpit dengan peningkatan kejadian bencana di wilayah studi. Untuk menjaga kejelasan pelaporan, metrik dampak dibedakan dan tidak dijumlahkan lintas-kategori: rumah terdampak/terendam merujuk pada unit yang terpapar banjir tanpa kerusakan struktural, sedangkan rumah rusak adalah subset yang mengalami kerusakan struktural (ringan/sedang/berat) sesuai klasifikasi BPBD. Dengan demikian, agregat 2013–2022 dilaporkan terpisah menjadi 3.879 rumah terdampak dan 2.326 rumah rusak (lihat **Gambar 2**).

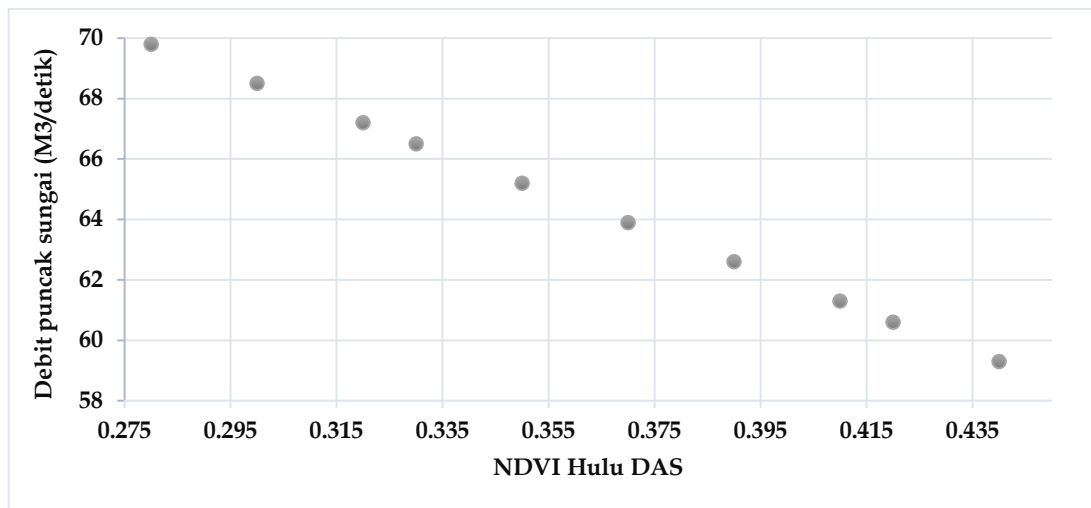


Gambar 2. Tren Curah Hujan Tahunan (2012–2023)

Konsisten dengan perubahan penutup lahan, pengukuran lapangan menunjukkan Q_{max} Sungai Wae Batu Merah meningkat sekitar 17,3% dari 58,2 m³/det (2013) menjadi 68,3 m³/det (2023). Kenaikan ini selaras dengan estimasi koefisien limpasan yang meningkat dari ~0,37 menjadi ~0,51 serta penurunan NDVI hulu, yang bersama-sama menandakan melemahnya fungsi ekohidrologis vegetasi sebagai pengatur infiltrasi dan penyangga aliran puncak. Hubungan negatif antara NDVI hulu dan Q_{max} divisualisasikan pada Gambar 3, sedangkan deret waktu hujan- Q_{max} disajikan pada Gambar 4 (lihat **Gambar 3–4**). Secara praktis, temuan ini menegaskan urgensi pemulihan vegetasi penyangga, pengendalian perluasan lahan kedap, dan penataan ruang dataran banjir untuk menurunkan respons puncak aliran.

Perbedaan cakupan waktu antar-dataset dinyatakan eksplisit untuk menjaga komparabilitas. NDVI/tutupan lahan (2013–2023) mengikuti konsistensi sensor/scene Landsat 8; curah hujan (2012–2023) mengacu pada seri terlengkap pasca-penyelarasan instrumen BMKG dan

ketika meringkas kami menggunakan rata-rata 2012–2023; kejadian bencana (2013–2022) mengikuti arsip BPBD tervalidasi; dan debit puncak (2013–2023) mengikuti seri pengukuran Balai Wilayah Sungai. Penandaan rentang dan agregat tersebut memastikan interpretasi lintas-parameter tetap sah serta meminimalkan bias temporal (lihat **Tabel 2; Gambar 2–4**).



Gambar 3. Scatter Plot Hubungan NDVI dan Debit Puncak Sungai Wae Batu Merah

Temuan-temuan ini sejalan dengan literatur yang menunjukkan bahwa degradasi vegetasi hulu mempercepat aliran permukaan, memperbesar erosi, dan meningkatkan risiko banjir di daerah hilir. Dalam konteks Wae Batu Merah, fenomena tersebut tidak hanya mengonfirmasi kerentanan biofisik DAS, tetapi juga mengisyaratkan tantangan bagi perencanaan penggunaan lahan dan pengelolaan daerah tangkapan air (Hermawan *et al.*, 2021; Kusumastuti *et al.*, 2015). Secara operasional, data NDVI dan riwayat Q_{max} dapat dimanfaatkan untuk penetapan zona prioritas restorasi melalui reforestasi, penguatan sabuk hijau riparian, dan pengendalian perubahan tata guna lahan di kawasan hulu. Pendekatan berbasis bukti ini menempatkan proses ekohidrologis sebagai landasan mitigasi (Latuamury & Talaohu, 2021; Masseroni *et al.*, 2018).

Secara sintesis, dominasi lereng curam di hulu–tengah, dataran sempit di hilir, degradasi vegetasi, dan tahun-tahun basah menghasilkan sistem yang responsif terhadap gangguan penutup lahan: vegetasi menurun → infiltrasi turun → limpasan naik → Q_{max} naik → genangan hilir meningkat (Krassakis *et al.*, 2023; Neupane *et al.*, 2021). Kerangka socio-hydrology menyediakan lensa analitis untuk menautkan dinamika fisik dengan dimensi sosial yang memodulasi dampak dan pemulihan. Oleh karena itu, strategi mitigasi perlu memadukan pemulihan riparian buffer, pengendalian lahan kedap, peningkatan kapasitas komunitas, dan pengelolaan dataran banjir yang adaptif agar ketahanan wilayah dapat ditingkatkan secara berkelanjutan (Kellner, 2021; Mukherjee, 2018).

Karakteristik Sosial Wilayah Studi

Analisis spasial terhadap karakteristik sosial wilayah DAS Wae Batu Merah menunjukkan kondisi demografis yang beragam di antara enam desa/kelurahan yang masuk dalam administrasi

DAS, yaitu Karang Panjang, Waihoka, Batu Merah, Soya, Rijali, dan Amantelu. Karakteristik sosial ini menjadi faktor penting dalam memahami kerentanan masyarakat terhadap bencana banjir dan kemampuan adaptasi dalam menghadapi risiko lingkungan.

Tabel 3. Kerentanan sosial per kelurahan dan kategorinya

Kelurahan	Kepadatan (jiwa/km ²)	Rasio jenis kelamin (%)	Kemiskinan (%)	Disabilitas (%)	Umur rentan (%)	Kategori kerentanan sosial*
Karang Panjang	15.470	93,0	29,7	0,38	12,09	Tinggi
Waihoka	6.136	100,0	37,4	0,21	12,09	Sedang
Batu Merah	77.338	98,1	23,8	0,13	12,10	Sangat tinggi
Soya	20.713	98,5	37,0	0,40	12,11	Tinggi
Rijali	22.704	100,0	22,1	0,11	12,10	Tinggi
Amantelu	6.136	101,8	21,1	0,14	12,21	Sedang

Sumber: Analisis Kerentanan Sosial Masyarakat, 2025

*Kategori ditetapkan berdasarkan skor tersandar dan bobot: kepadatan 0,35; kemiskinan 0,25; umur rentan 0,15; disabilitas 0,15; rasio jenis kelamin 0,10.

Karakteristik sosial pada enam kelurahan dalam DAS Wae Batu Merah – Karang Panjang, Waihoka, Batu Merah, Soya, Rijali, dan Amantelu – menunjukkan profil kerentanan yang beragam dan beririsan langsung dengan dinamika fisik yang telah diidentifikasi pada sub-bab geomorfologi-hidrologi. Kepadatan permukiman yang menempel pada koridor bantaran Sungai Batu Merah–Rijali memperkuat eksposur terhadap limpasan yang dipercepat dari zona hulu–tengah yang didominasi lereng curam. Dengan kata lain, ketika Q_{max} meningkat akibat degradasi vegetasi di hulu (infiltrasi turun → koefisien limpasan naik), kluster permukiman padat di hilir berada pada jalur aliran permukaan dan genangan, sehingga peluang terpaan banjir meningkat, meskipun kapasitas tanggap komunitas berbeda antarkelurahan (Hossain *et al.*, 2020).

Untuk menjaga konsistensi pelaporan dan keterbandingan lintas-lokasi, satuan kepadatan dinyatakan sebagai jiwa/km² tanpa desimal: Batu Merah 77.338 jiwa/km², Rijali 22.704, Soya 20.713, Karang Panjang 15.470, Waihoka 6.136, dan Amantelu 6.136. Penyesuaian juga dilakukan pada rasio jenis kelamin yang sebelumnya tidak selaras; Karang Panjang ditetapkan 93% sesuai tabel terkini. Standarisasi ini mengurangi potensi bias interpretasi, menguatkan konsistensi antara narasi dan tabel, serta memudahkan audiens internasional menilai besaran risiko sosial yang relevan dengan eksposur hidrologis (Latuamury, Sahureka, *et al.*, 2025; Oktari *et al.*, 2022).

Variasi indikator sosial dipetakan terhadap tiga dimensi risiko: eksposur, sensitivitas, dan kapasitas (Latuamury & Talaohu, 2020; Oktari, Comfort, *et al.*, 2020). Kepadatan berfungsi sebagai proksi eksposur langsung (semakin padat, semakin banyak unit rumah berpotensi terdampak); kemiskinan meningkatkan sensitivitas dan menurunkan kapasitas pemulihan (akses tabungan, asuransi, dan dukungan sosial); sementara proporsi umur rentan (anak-anak/lansia) dan penyandang disabilitas memengaruhi kemampuan respons individu terhadap peringatan dini dan evakuasi. Rasio jenis kelamin yang relatif seimbang ditempatkan sebagai faktor pelengkap. Atas

dasar itu, pembobotan indeks sosial untuk integrasi dalam kerangka socio-hydrology ditetapkan: kepadatan 0,35; kemiskinan 0,25; umur rentan 0,15; disabilitas 0,15; rasio jenis kelamin 0,10 – menempatkan eksposur dan kondisi ekonomi sebagai pendorong utama, dengan kerentanan individual sebagai penguat kebutuhan dukungan operasional (Bucherie *et al.*, 2022; Padhan & Madheswaran, 2023).

Untuk menghindari bias kategorisasi “semua tinggi”, kerentanan sosial diklasifikasikan ke tiga tingkat—sedang, tinggi, sangat tinggi—berdasarkan skor tersandar dan ambang operasional yang konsisten dengan bobot di atas. Hasilnya menunjukkan heterogenitas yang relevan bagi kebijakan: Batu Merah tergolong sangat tinggi (kombinasi kepadatan ekstrem dan kantong kemiskinan menengah), Rijali dan Soya tinggi (kepadatan tinggi-menengah dan kemiskinan menengah-tinggi), Karang Panjang tinggi (kepadatan sedang-tinggi, kemiskinan menengah), sedangkan Waihoka dan Amantelu sedang (kepadatan rendah; pada Waihoka kemiskinan relatif tinggi sehingga memerlukan perlindungan sosial lebih kuat). Klasifikasi ini menyediakan sinyal prioritas yang lebih presisi dibandingkan kategorisasi homogen (Fernandez *et al.*, 2016; Nurul Ashikin *et al.*, 2021).

Keterhubungan sosial-fisik paling menonjol di koridor Batu Merah-Rijali, tempat kluster kepadatan bertumpang tindih dengan zona akumulasi limpasan di hilir. Pada saat Qmax melonjak, eksposur komunitas meningkat tajam dan konsekuensi kerusakan bereskalasi. Sebaliknya, Waihoka dan Amantelu berangkat dari eksposur awal lebih rendah karena kepadatan kecil, tetapi tetap menghadapi kerentanan residual akibat kemiskinan—yang memperlambat pemulihan pascabanjir (pemulihan hunian lambat, akses asuransi terbatas, dan keterbatasan modal adaptasi). Dengan demikian, indikator sosial tidak berdiri sendiri; ia memodulasi dampak dinamika fisik—menentukan siapa yang paling terdampak, seberapa berat dampaknya, dan seberapa cepat pemulihannya (Askar *et al.*, 2022; Wu, 2021).

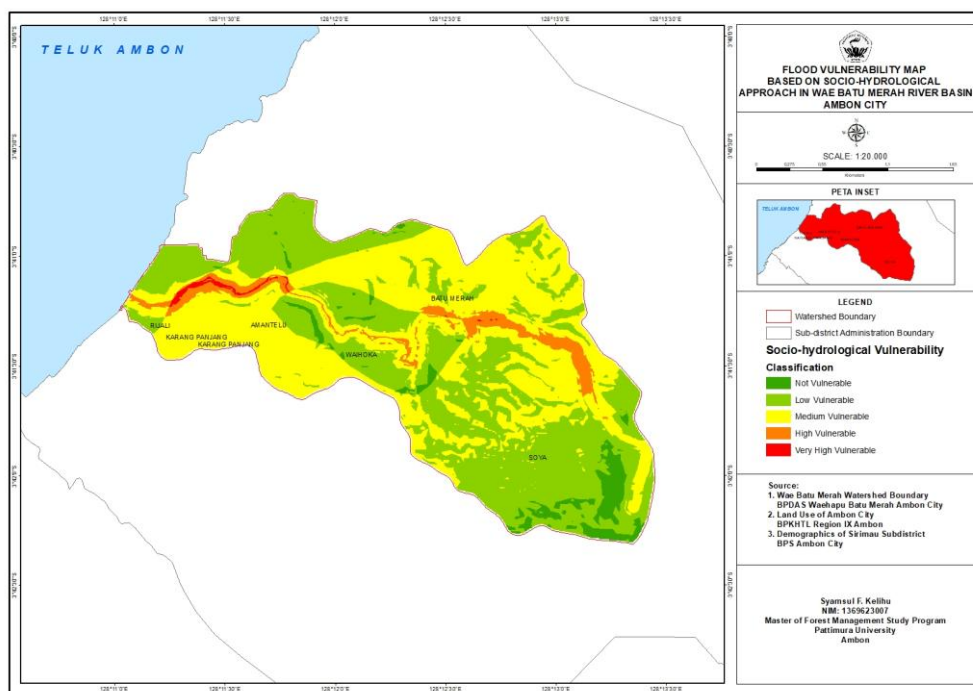
Karakteristik sosial tersebut kemudian diintegrasikan dalam model spasial bersama indikator fisik (kelerengan, jarak ke sungai, NDVI, curah hujan) menggunakan kerangka Multi-Criteria Evaluation (MCE) untuk menghasilkan peta kerentanan sosio-hidrologi. Skor sosial tersandar ditumpangtindihkan dengan lapisan biofisik guna mengidentifikasi zona prioritas: Batu Merah-Rijali sebagai prioritas 1 (sangat tinggi), Soya-Karang Panjang sebagai prioritas 2 (tinggi), dan Waihoka-Amantelu sebagai prioritas 3 (sedang) dengan fokus intervensi ekonomi-sosial. Rekomendasi strategis meliputi pengendalian kepadatan dan set-back riparian, rehabilitasi vegetasi penyangga, serta program pengurangan kemiskinan dan peningkatan kesiapsiagaan—agar respons kebijakan selaras dengan logika risiko fisik dan kondisi sosial setempat, serta dapat direplikasi pada konteks kepulauan tropis lainnya.

Pemetaan Spasial Kerentanan Sosio-Hidrologi

Pendekatan sosio-hidrologi (*socio-hydrology*) pada DAS Wae Batu Merah mengintegrasikan enam indikator biofisik—curah hujan, penggunaan lahan/NDVI, kemiringan lereng, elevasi, jenis

tanah, dan buffer sungai—dengan indeks sosial terstandar di dalam kerangka Multi-Criteria Evaluation (MCE). Seluruh indikator dinormalisasi ke skala 1–5 dan digabungkan melalui weighted overlay untuk menghasilkan peta kelas kerentanan dari sangat rendah hingga sangat tinggi. Pengaturan ini memungkinkan pemetaan interaksi antara bahaya dan eksposur hidrologis dengan sensitivitas dan kapasitas sosial, sehingga hasilnya tidak sekadar memotret “lokasi air mengalir”, tetapi juga “siapa yang berada di sana dan seberapa mampu mereka merespons”.

Pembobotan komponen sosial menempatkan kepadatan permukiman (60%) sebagai penentu utama dan kelompok rentan (40%)—meliputi kemiskinan, umur rentan, disabilitas, dan rasio jenis kelamin—sebagai penguat. Argumen akademiknya bertumpu pada pemisahan hazard-exposure-vulnerability-capacity: ketika jalur limpasan dan area limpasan puncak telah dipetakan, eksposur spasial menjadi penggerak pertama besaran risiko agregat, karena jumlah unit hunian yang berada dalam jejak banjir meningkat secara hampir linear dengan kepadatan. Faktor kerentanan individual memperdalam dampak dan memperlambat pemulihan, namun pengaruhnya terhadap probabilitas terpapar awal tidak sebesar kepadatan yang menentukan “berapa banyak yang berada di jalur banjir”. Skema 60/40 ini dengan demikian menegaskan logika kausal: siapa dan seberapa banyak yang terpapar didominasi oleh kepadatan; seberapa parah dan berapa lama dampaknya dimediasi oleh kelompok rentan (**Gambar 4**).

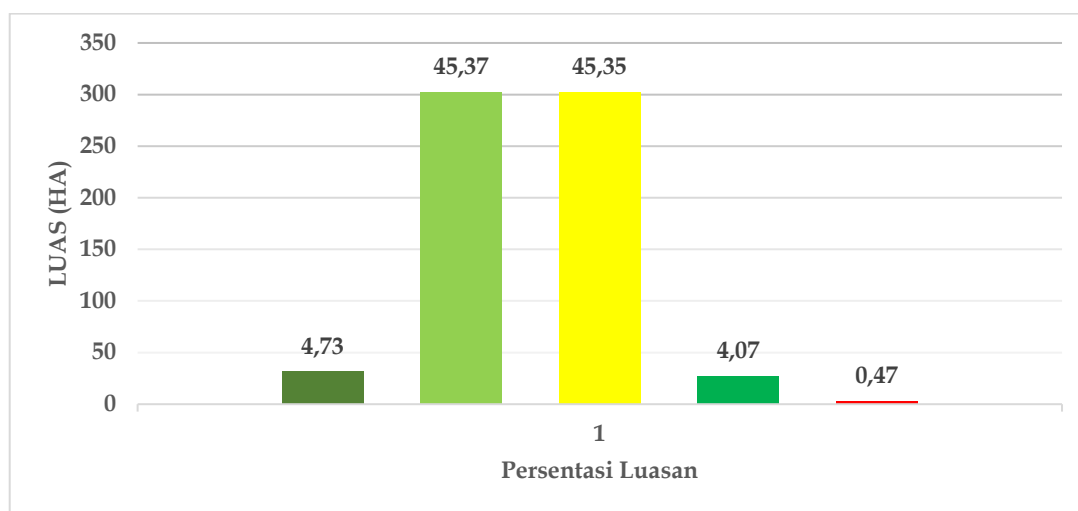


Gambar 4. Peta kerentanan banjir berbasis pendekatan Sosio-hidrologi di DAS Wae Batu Merah

Hasil MCE memetakan ±665,77 ha dataran banjir ke lima kelas: sangat tinggi ~3,10 ha, tinggi ~31,51 ha, sedang ~301,95 ha, rendah ~302,09 ha, dan sangat rendah ~27,12 ha. Penting ditekankan bahwa angka-angka ini merepresentasikan luas areal (hektar), bukan jumlah atau proporsi titik kejadian. Karena itu, dominasi luasan pada kelas sedang dan rendah—sekitar 45,35% dan 45,37%

dari total area—tidak boleh dibaca sebagai dominasi titik banjir pada kelas tersebut; ia hanya menandakan bahwa lanskap yang relatif terlindungi (lebih tinggi/jauh dari sungai atau kurang padat) secara fisik memang mencakup ruang yang lebih luas.

Validasi spasial menggunakan titik kejadian BPBD (2013, 2016, 2021) menunjukkan konsentrasi mayoritas titik pada kelas tinggi–sangat tinggi yang secara spasial hanya mencakup ~5,2% dari wilayah. Sebaliknya, sebagian kecil titik muncul pada kelas sedang dan rendah yang berluas besar. Untuk menghindari ambiguitas, pelaporan validasi dipisahkan menjadi dua metrik: (i) distribusi areal per kelas (dalam ha atau persentase luas) dan (ii) distribusi titik banjir per kelas (dalam persentase jumlah titik). Pemisahan ini mencegah salah tafsir seolah-olah titik banjir “tersebar dominan” pada kelas berareal luas, padahal bukti empiris menunjukkan clustering pada zona berisiko tinggi di koridor permukiman bantaran sungai (Di Baldassarre, 2017; Hermawan *et al.*, 2021).



Gambar 5. Diagram Batang Luasan dan Persentase Kelas Kerentanan

Visualisasi kelas kerentanan pada wilayah penelitian pada Gambar 5, menunjukkan bahwa secara spasial, kelas tinggi–sangat tinggi membentuk koridor risiko di bantaran sungai utama—terutama segmen Batu Merah–Rijali—yang beririsan dengan wilayah ber-kepadatan tinggi dan penurunan vegetasi riparian. Temuan ini menerjemah ke prioritas kebijakan bertingkat: pengendalian eksposur melalui pengaturan kepadatan, set-back riparian, dan proteksi sabuk vegetasi; pengurangan sensitivitas lewat program pengentasan kemiskinan, penguatan kelembagaan komunitas, dan akses asuransi mikro; serta peningkatan kapasitas melalui edukasi kesiapsiagaan dan tata kelola respons. Struktur rekomendasi ini menjaga keselarasan antara determinan fisik dan sosial, sekaligus memudahkan evaluasi berkala ketika tutupan lahan, jaringan drainase, atau distribusi penduduk berubah.

Secara keseluruhan, peta kerentanan sosio-hidrologi menggambarkan bobot yang eksplisit, pemisahan metrik areal versus titik yang tegas, serta visualisasi yang konsisten—memberikan dasar yang operasional bagi penataan ruang dan rencana kontinjensi berbasis bukti. Kerangka ini

kompatibel untuk replikasi pada kota-kota kepulauan tropis lain yang menghadapi kombinasi tekanan biofisik dan sosial yang serupa, dan dapat diintegrasikan ke dalam instrumen perencanaan formal (misalnya RTRW) maupun sistem peringatan dini berbasis komunitas guna memperkuat ketahanan wilayah terhadap banjir yang kian berfrekuensi dan berintensitas tinggi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kerentanan banjir di dataran banjir DAS Wae Batu Merah merupakan interaksi terpadu faktor biofisik dan sosial-ekologis. Secara biofisik, penurunan NDVI hulu dari 0,46 (2013) menjadi 0,28 (2023) beriringan dengan kenaikan Q_{max} sekitar 17,3% (2013–2023) dan variabilitas hujan tahunan yang tinggi (rata-rata 2012–2023 \approx 3.401 mm/tahun), yang bersama-sama melemahkan kapasitas retensi-infiltrasi dan meningkatkan tekanan hidrologis di hilir yang datar-landai. Secara sosial, kepadatan permukiman tinggi di koridor bantaran Batu Merah-Rijali memperbesar eksposur terhadap limpasan dari hulu-tengah; kemiskinan memperdalam sensitivitas dan menurunkan kapasitas pemulihan; sementara kelompok umur rentan (anak-anak/lansia) dan penyandang disabilitas menghadapi hambatan tambahan dalam peringatan dini, evakuasi, dan akses bantuan. Pemodelan MCE dalam kerangka sosio-hidrologi menampilkan zonasi yang tegas: kelas sedang dan rendah mendominasi >90% dari $\pm 665,77$ ha area, sedangkan kelas tinggi-sangat tinggi hanya $\sim 5,2\%$ area namun menjadi lokasi konsentrasi titik banjir—menandakan bahwa keluasan area “lebih aman” tidak identik dengan rendahnya risiko kejadian. Implikasi kebijakan bersifat bertingkat dalam pengendalian eksposur melalui pengaturan kepadatan, set-back riparian, dan rehabilitasi sabuk vegetasi; pengurangan sensitivitas melalui perlindungan sosial, pengentasan kemiskinan, serta akses asuransi/keuangan mikro; dan peningkatan kapasitas kesiapsiagaan yang inklusif bagi penyandang disabilitas dan kelompok umur rentan. Kebaruan studi terletak pada pemisahan eksplisit antara metrik luas areal kelas kerentanan dan distribusi titik kejadian, argumentasi akademik atas dominasi bobot kepadatan sebagai proksi eksposur dengan tetap mengintegrasikan faktor sosial utama lainnya, serta perumusan rantai kausal biofisik-sosial (degradasi vegetasi \rightarrow infiltrasi turun \rightarrow koefisien limpasan naik \rightarrow Q_{max} naik \rightarrow eksposur klaster padat meningkat) dalam satu kerangka pemetaan yang terverifikasi spasial.

DAFTAR PUSTAKA

- Askar, S., Zeraat Peyma, S., Yousef, M. M., Prodanova, N. A., Muda, I., Elshabi, M., & Hatamiafkoueih, J. (2022). Flood Susceptibility Mapping Using Remote Sensing and Integration of Decision Table Classifier and Metaheuristic Algorithms. *Water (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/w14193062>
- Bucherie, A., Hultquist, C., Adamo, S., Neely, C., Ayala, F., Bazo, J., & Kruczkiewicz, A. (2022). A comparison of social vulnerability indices specific to flooding in Ecuador: principal component analysis (PCA) and expert knowledge. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102897>

- Chan, S. W., Abid, S. K., Sulaiman, N., Nazir, U., & Azam, K. (2022). A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system. In *Heliyon* (Vol. 8, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>
- Coletta, V. R., Pagano, A., Zimmermann, N., Davies, M., Butler, A., Fratino, U., Giordano, R., & Pluchinotta, I. (2024). Socio-hydrological modelling using participatory System Dynamics modelling for enhancing urban flood resilience through Blue-Green Infrastructure. *Journal of Hydrology*, 636(May), 131248. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131248>
- Di Baldassarre, G. (2017). Socio-Hydrology of Floods. In *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.264>
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Yan, K., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2015). Debates-Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. *Water Resources Research*, 51(6), 4770-4781. <https://doi.org/10.1002/2014WR016416>
- Fernandez, P., Mourato, S., Moreira, M., & Pereira, L. (2016). A new approach for computing a flood vulnerability index using cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.003>
- Gober, P., & Wheatler, H. S. (2015). Debates - Perspectives on socio-hydrology: Modeling flood risk as a public policy problem. *Water Resources Research*, 51(6). <https://doi.org/10.1002/2015WR016945>
- Hakim, D. K., Gernowo, R., & Nirwansyah, A. W. (2024). Flood prediction with time series data mining: Systematic review. In *Natural Hazards Research* (Vol. 4, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.10.001>
- Hermawan, Y., Jaya, I., Kosasih, B., & Putriasri, A. E. (2021). Flood Risk Assessment for Ambon City. 7th International Seminar of HATHI, 3440.
- Hossain, M. S., Ramirez, J. A., Haisch, T., Speranza, C. I., Martius, O., Mayer, H., & Keiler, M. (2020). A coupled human and landscape conceptual model of risk and resilience in Swiss Alpine communities. *Science of the Total Environment*, 730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138322>
- Jun, S. M., Kang, M. S., Hwang, S., Park, J., & Song, J. H. (2020). Flood vulnerability assessment for prioritizing and evaluating rehabilitation of ungauged reservoirs considering climate change. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071901>
- Kellner, E. (2021). The controversial debate on the role of water reservoirs in reducing water scarcity. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* (Vol. 8, Issue 3). <https://doi.org/10.1002/wat2.1514>
- Knighton, J., Buchanan, B., Guzman, C., Elliott, R., White, E., & Rahm, B. (2020). Predicting flood insurance claims with hydrologic and socioeconomic demographics via machine learning: Exploring the roles of topography, minority populations, and political dissimilarity. *Journal of Environmental Management*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111051>
- Krassakis, P., Karavias, A., Nomikou, P., Karantzalos, K., Koukouzas, N., Athinelis, I., Kazana, S., & Parcharidis, I. (2023). Multi-Hazard Susceptibility Assessment Using the Analytical Hierarchy Process in Coastal Regions of South Aegean Volcanic Arc Islands. *GeoHazards*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/geohazards4010006>
- Kusumastuti, C., Djajadi, R., & Rumihin, A. (2015). Evaluation of drainage channels capacity in Ambon city: A case study on Wai Batu Merah watershed flooding. *Procedia Engineering*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.038>
- Latuamury, B., Aponno, H. S. E. S., Marasabessy, H., Hadijah, M. H., & Imlabla, W. (2020). The spatial dynamics of land cover change along the Wallacea corridor in the key biodiversity area 'Buano Island', Maluku, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7(4). <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2020.074.2241>

- Latuamury, B., Imlabla, W. N., Sahusilawane, F., & Marasabessy, H. (2025). Spatial Patterns of NDVI Vegetation Greenness Index and NDWI Water Content Index Using Sentinel 2A Imagery. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1527(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1527/1/012002>
- Latuamury, B., Marasabessy, H., Talaohu, M., & Imlabla, W. (2021). Small island watershed morphometric and hydrological characteristics in Ambon Region, Maluku Province. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 800(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/800/1/012047>
- Latuamury, B., Sahureka, M., Hadijah, M. H., Parera, L. R., Iskar, & Talaohu, M. (2025). The community understanding and attitude related to the protection area function of the Wae Batu Merah watershed in Ambon City. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1527(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1527/1/012012>
- Latuamury, B., Sudarmadji, S., & Suprayogi, S. (2016). Variasi Perubahan Penggunaan Lahan Pada Berbagai Tipe Bentuklahan Dan Kaitannya Dengan Aliran Dasar Sungai Pada Das Keduang Provinsi Jawa Tengah (The Variation of Land-Use Change in Various Landform Type and Its Correlation With River Baseflow). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 23(2). <https://doi.org/10.22146/jml.18790>
- Latuamury, B., & Talaohu, M. (2020). Variations in Baseflow Recession Curves as a Function of Land-Use Change in the Keduang Watershed, Wonogiri Regency, Jawa Tengah Province, Indonesia. *Journal of Geographical Studies*, 3(2). <https://doi.org/10.21523/gcj5.19030202>
- Latuamury, B., & Talaohu, M. (2021). Correlating Spatial Pattern of Canopy Greenness Derived from the NDVI with Hydrological Characteristics of Small Island Watersheds. *Journal of Geographical Studies*, 5(1). <https://doi.org/10.21523/gcj5.21050101>
- Latuamury, B., Talaohu, M., Sahusilawane, F., & Imlabla, W. N. (2021). Correlation of normalized difference water index and baseflow index in small island watershed landscapes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 883(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/883/1/012072>
- Madani, K., & Shafiee-Jood, M. (2020). Socio-hydrology: A new understanding to unite or a new science to divide? In *Water (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/w12071941>
- Masseroni, D., Ercolani, G., Chiaradia, E. A., Maglionico, M., Toscano, A., Gandolfi, C., & Bischetti, G. B. (2018). Exploring the performances of a new integrated approach of grey, green and blue infrastructures for combined sewer overflows remediation in high-density Urban areas. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(4). <https://doi.org/10.4081/jae.2018.873>
- Mazzoleni, M., Odongo, V. O., Mondino, E., & Di Baldassarre, G. (2021). Water management, hydrological extremes, and society: Modeling interactions and phenomena. *Ecology and Society*, 26(4). <https://doi.org/10.5751/ES-12643-260404>
- Mukherjee, J. (2018). Hydrosocial Implications of Hydropolitical Trajectories: Exploring the Farakka Barrage Project from Indo-Bangladesh Perspectives. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3889-1_39
- Neupane, B., Vu, T. M., & Mishra, A. K. (2021). Evaluation of land-use, climate change, and low-impact development practices on urban flooding. *Hydrological Sciences Journal*, 66(12). <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1954650>
- Nurul Ashikin, A., Nor Diana, M. I., Siwar, C., Alam, M. M., & Yasar, M. (2021). Community preparation and vulnerability indices for floods in Pahang State of Malaysia. *Land*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/land10020198>

- Oktari, R. S., Comfort, L. K., Syamsidik, & Dwitama, P. (2020). Measuring coastal cities' resilience toward coastal hazards: Instrument development and validation. *Progress in Disaster Science*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100057>
- Oktari, R. S., Latuamury, B., Idroes, R., Sofyan, H., & Munadi, K. (2022). Validating knowledge creation factors for community resilience to disaster using structural equation modelling. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 81(4), 103290. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103290>
- Oktari, R. S., Latuamury, B., Idroes, R., Sofyan, H., & Munadi, K. (2023). Knowledge management strategy for managing disaster and the COVID-19 pandemic in Indonesia: SWOT analysis based on the analytic network process. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 85(December 2022), 103503. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103503>
- Oktari, R. S., Munadi, K., Idroes, R., & Sofyan, H. (2020). Knowledge management practices in disaster management: Systematic review. In *International Journal of Disaster Risk Reduction* (Vol. 51). <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101881>
- Padhan, N., & Madheswaran, S. (2023). An integrated assessment of vulnerability to floods in coastal Odisha: a district-level analysis. *Natural Hazards*, 115(3). <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05641-z>
- Podhajska, E., Burszta-Adamiak, E., Drzeniecka-Osiadacz, A., Zienowicz, M., Podhajski, B., Sawiński, T., & Jasińska, A. (2021). Sustainability as a function of an area: Application of multi-criteria evaluation in assessing the effectiveness of nature-based solutions. *Atmosphere*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/atmos12111464>
- Rehman, S., Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., & Ahmed, B. Bin. (2019). A systematic review on approaches and methods used for flood vulnerability assessment: framework for future research. In *Natural Hazards* (Vol. 96, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s11069-018-03567-z>
- Ruknul Ferdous, M., Wesselink, A., Brandimarte, L., Slager, K., Zwarteveen, M., & Di Baldassarre, G. (2018). Socio-hydrological spaces in the Jamuna River floodplain in Bangladesh. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10). <https://doi.org/10.5194/hess-22-5159-2018>
- Salazar-Briones, C., Ruiz-Gibert, J. M., Lomelí-Banda, M. A., & Mungaray-Moctezuma, A. (2020). An integrated urban flood vulnerability index for sustainable planning in arid zones of developing countries. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020608>
- Santosa, B. H., Martono, D. N., Purwana, R., & Koestoer, R. H. (2022). Flood Vulnerability Evaluation and Prediction Using Multi-temporal Data: A Case in Tangerang, Indonesia. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12(6). <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.6.16903>
- Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8), 1270-1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Thaler, T. (2021). Social justice in socio-hydrology-how we can integrate the two different perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 66(10). <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1950916>
- Udnoon, S., Pilailar, S., & Chittaladakorn, S. (2022). Evaluation of Bangkok Flood Vulnerability Index Using Fuzzy Inference System. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(2). <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0459-1>
- Wałęga, A. (2015). The concept of socio-hydrology in the flood risk analysis. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 14(3). <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2015.14.3.175>
- Wu, T. (2021). Quantifying coastal flood vulnerability for climate adaptation policy using principal component analysis. *Ecological Indicators*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108006>

- York, A. M., Sullivan, A., & Bausch, J. C. (2019). Cross-scale interactions of socio-hydrological subsystems: Examining the frontier of common pool resource governance in Arizona. *Environmental Research Letters*, 14(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab51be>
- Yu, D. J., Haeffner, M., Jeong, H., Pande, S., Dame, J., Di Baldassarre, G., Garcia-Santos, G., Hermans, L., Muneeppeerakul, R., Nardi, F., Sanderson, M. R., Tian, F., Wei, Y., Wessels, J., & Sivapalan, M. (2022). On capturing human agency and methodological interdisciplinarity in socio-hydrology research. *Hydrological Sciences Journal*, 67(13). <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2114836>
- Zachos, L. G., Swann, C. T., Altinakar, M. S., McGrath, M. Z., & Thomas, D. (2016). Flood vulnerability indices and emergency management planning in the Yazoo Basin, Mississippi. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.03.012>