



## Analisis Kerawanan Bencana Banjir dan Arahan Evakuasi berbasis SIG di DAS Tukad Mati Bali

Muhammad Arya Feyza Ayyada<sup>1</sup>, Dewi Novita Sari<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta

<sup>2</sup> Program Studi Sains Informasi Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta

e-mail: [e100210176@student.ums.ac.id](mailto:e100210176@student.ums.ac.id), [dns104@ums.ac.id](mailto:dns104@ums.ac.id)

**ABSTRAK.** Wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Tukad Mati di Provinsi Bali merupakan kawasan rawan banjir akibat curah hujan tinggi, alih fungsi lahan, dan pesatnya pertumbuhan kawasan terbangun. Penelitian ini bertujuan menganalisis tingkat kerawanan banjir serta menyusun arahan evakuasi berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Metode yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan pendekatan spasial. Parameter analisis mencakup curah hujan, jenis tanah, penggunaan lahan, kemiringan lereng, elevasi, dan jarak terhadap sungai. Setiap parameter diberi skor dan bobot berdasarkan pengaruhnya terhadap banjir, lalu diolah menggunakan metode *weighted overlay* pada perangkat lunak ArcGIS. Data yang digunakan meliputi citra Sentinel-2, DEM SRTM, data CHIRPS, peta tanah FAO, serta jaringan sungai dan jalan dari OpenStreetMap. Hasil analisis menunjukkan bahwa kerawanan sangat tinggi terkonsentrasi di zona tengah DAS, terutama Kecamatan Denpasar Barat dan Utara, serta sebagian wilayah hilir seperti Kuta dan Seminyak, sementara wilayah hulu memiliki tingkat kerawanan sedang hingga tinggi. Arahan evakuasi disusun menggunakan metode *Closest Facility* dalam *Network Analyst*, mempertimbangkan kondisi aktual jaringan jalan. Jalur evakuasi menghubungkan titik rawan dengan fasilitas evakuasi terdekat, seperti sekolah, kantor pemerintah, dan hotel bertingkat yang memungkinkan evakuasi vertikal. Rute evakuasi mempertimbangkan waktu tempuh tercepat, hambatan genangan, dan aksesibilitas jalan. Hasil akhir berupa peta kerawanan banjir dan jalur evakuasi memberikan dasar informatif bagi mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang berbasis risiko di DAS Tukad Mati.

**Kata kunci:** Kerawanan, Banjir, Sistem Informasi Geografis, Analisis Jaringan, Analisis Spasial.

### PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu jenis bencana alam yang paling sering terjadi di Indonesia dan terus mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir, baik dari segi frekuensi kejadian maupun tingkat kerusakan yang ditimbulkan. Di wilayah pesisir dan daerah aliran sungai, seperti Bali bagian selatan, banjir tidak hanya menimbulkan kerugian material tetapi juga berdampak langsung terhadap aktivitas pariwisata, sosial, dan ekonomi masyarakat. Menurut data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), banjir merupakan bencana yang paling sering terjadi di Indonesia, dengan frekuensi mencapai lebih dari 40% dari total bencana hidrometeorologi pada tahun 2021. Salah satu wilayah yang memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap banjir adalah Daerah Aliran Sungai (DAS) Tukad Mati, yang melintasi dua wilayah administrasi, yaitu Kota Denpasar dan Kabupaten Badung. Kawasan ini telah mengalami banjir berulang akibat penyempitan sempadan sungai, sedimentasi tinggi, alih fungsi lahan, dan sistem drainase yang tidak memadai. Menurut analisis Balai Wilayah Sungai (BWS) Bali-Penida, genangan banjir di DAS Tukad Mati mencapai 94 hektar dengan kedalaman lebih dari 2 meter dan durasi banjir berkisar antara 4 hingga 6 jam, terutama akibat penurunan daya resap tanah dan menyempitnya sempadan sungai.

Sistem Informasi Geografis (SIG) telah banyak digunakan dalam penelitian kebencanaan, khususnya untuk pemetaan zona rawan banjir. SIG merupakan sistem yang terorganisir untuk

mengelola, menganalisis, dan menyajikan data spasial dengan referensi geografis (ESRI, 1990). Salah satu metode yang lazim digunakan dalam SIG adalah pendekatan *weighted overlay*, yang memadukan sejumlah parameter yang relevan terhadap kejadian banjir dengan bobot yang disesuaikan berdasarkan pengaruhnya (Saaty et al., 2022; Murray, 2002). Sejumlah Penelitian penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas metode ini. Hanum et al. (2024) dalam kajiannya di DAS Opak, Yogyakarta, menggunakan enam parameter utama seperti curah hujan, lereng, dan tutupan lahan untuk memetakan kerentanan banjir. Studi (Ramadhan & Chernovita, 2021) di Kabupaten Semarang serta Pryastuti et al. (2021) di DAS Pusur juga menunjukkan hasil yang serupa melalui pendekatan skoring dan overlay berbasis SIG. Selain itu, Madani et al. (2019) menekankan pentingnya data curah hujan dan penggunaan lahan dalam pemodelan risiko banjir di DAS Bendo, sementara Priyono & Andayani, (2023) menyoroiti pentingnya penggunaan citra resolusi tinggi dalam mendeteksi perubahan tutupan lahan yang berpengaruh signifikan terhadap pola aliran permukaan. Temuan-temuan tersebut mengafirmasi bahwa SIG dan metode *overlay* merupakan pendekatan yang valid dan aplikatif untuk mendukung kajian spasial kerawanan banjir.

Namun demikian, sebagian besar studi terdahulu hanya berfokus pada pemetaan kerentanan banjir tanpa menyusun strategi operasional seperti jalur evakuasi, sehingga belum mengintegrasikan hasil analisis spasial dengan sistem evakuasi bencana secara menyeluruh. Dalam konteks mitigasi bencana, peta rawan banjir seharusnya tidak hanya berfungsi sebagai alat identifikasi wilayah berisiko, tetapi juga sebagai dasar untuk perencanaan tanggap darurat, termasuk penyusunan jalur evakuasi yang optimal. Kesenjangan ini tampak dalam studi Hanum et al. (2024) dan Rakuasa & Latue, (2023), yang meskipun menghasilkan peta kerawanan yang komprehensif, belum mengaitkan hasil tersebut dengan perencanaan jalur evakuasi berbasis jaringan jalan. Sayangnya, belum banyak penelitian yang menggabungkan hasil pemetaan kerawanan dengan jaringan jalan dan fasilitas umum secara terintegrasi. Padahal, dalam situasi bencana, kecepatan dan efisiensi evakuasi menjadi faktor krusial dalam mengurangi korban jiwa. Fitur *Closest Facility* dalam ArcGIS Network Analyst, yang sejatinya memiliki potensi besar dalam menyimulasikan rute evakuasi tercepat dari titik rawan ke lokasi aman, masih jarang dimanfaatkan secara maksimal dalam kajian banjir. *Network Analyst* memiliki kapabilitas tinggi dalam perencanaan evakuasi bencana, namun penerapannya masih terbatas secara tematik dan spasial, bahkan belum mempertimbangkan kedekatan wilayah rawan dengan fasilitas vertikal seperti sekolah atau gedung pemerintah dalam menyusun arah evakuasi. Selain itu, terdapat perbedaan dalam parameter dan metode analisis yang digunakan antara studi satu dengan lainnya, seperti penggunaan NDVI/NDWI dan SAW oleh Hernoza et al. (2020) dan Sari et al., (2024) yang menunjukkan hasil berbeda dibandingkan metode *overlay* konvensional. Ketidakkonsistenan metodologis ini juga terlihat pada studi Priyono & Andayani, (2023) yang menggunakan citra resolusi tinggi untuk mendeteksi tutupan lahan, berbeda dengan penelitian lain yang menggunakan Sentinel-2 beresolusi 10 meter, sehingga berdampak pada perbedaan signifikan dalam hasil klasifikasi kerawanan. Hal ini menunjukkan bahwa kajian yang menyatukan pemetaan spasial dan perencanaan evakuasi masih menjadi hal langka, khususnya di wilayah padat dan pesisir seperti Bali. Oleh karena itu, Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengintegrasikan pemetaan kerentanan banjir dan perencanaan evakuasi berbasis jaringan jalan secara menyeluruh. Keunikan pendekatan ini terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan peta evakuasi yang tidak hanya spasial dan informatif, tetapi juga aplikatif sebagai panduan teknis bagi pemerintah daerah dan masyarakat dalam menghadapi situasi darurat banjir.

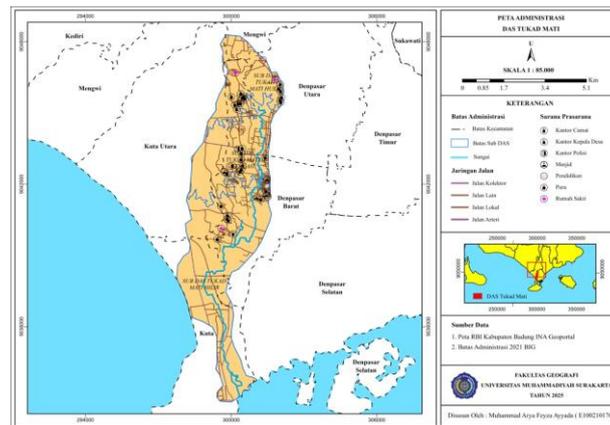
Tujuan utama dari Penelitian ini adalah untuk menganalisis tingkat kerawanan banjir dan menyusun arahan evakuasi tercepat di wilayah DAS Tukad Mati, Bali, dengan menggunakan pendekatan SIG. Analisis dilakukan berdasarkan enam parameter utama yang memengaruhi risiko banjir, yaitu curah hujan, kemiringan lereng, ketinggian lahan, penggunaan lahan, jenis tanah, dan *buffer* sungai. Data yang digunakan dalam Penelitian ini merupakan data sekunder dari sumber-sumber terpercaya, seperti CHIRPS untuk curah hujan, USGS untuk data DEM (*Digital Elevation Model*), Sentinel-2 untuk penggunaan lahan, FAO untuk jenis tanah, serta OpenStreetMap dan

INA-Geoportal untuk data jaringan jalan, sungai, dan fasilitas umum. Unit analisis dalam Penelitian ini adalah wilayah spasial yang mencakup wilayah administratif Denpasar Barat, Kuta, dan sekitarnya. Teknik analisis yang digunakan adalah metode *weighted overlay* untuk pemetaan kerawanan banjir dan *network analyst* untuk pemodelan evakuasi, yang diimplementasikan dalam platform ArcGIS Pro.

Struktur Penelitian ini terdiri atas empat bagian utama. Bagian pertama menjelaskan latar belakang, isu Penelitian, dan tujuan studi. Bagian kedua membahas metodologi yang meliputi teknik analisis spasial, sumber data, parameter, dan alur penelitian Penelitian yang digunakan. Bagian ketiga memaparkan hasil zonasi kerawanan dan pemodelan jalur evakuasi, serta diskusi interpretatif terhadap temuan. Sementara itu, bagian terakhir menyajikan kesimpulan dan rekomendasi untuk pengembangan strategi pengurangan risiko bencana banjir berbasis spasial.

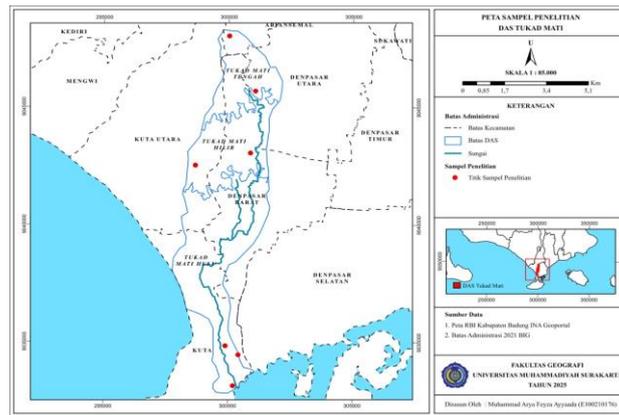
## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis spasial yang bertujuan untuk menganalisis tingkat kerawanan banjir dan menyusun arahan evakuasi berbasis pemetaan geospasial. Metode ini dipilih karena mampu menyajikan kondisi objektif suatu wilayah secara sistematis dengan dukungan data numerik dan spasial. Pendekatan ini dianggap relevan karena kombinasi antara teknik kuantitatif dan analisis SIG dapat memperlihatkan hubungan antar variabel fisik dan sosial terhadap risiko banjir secara akurat, serta memungkinkan integrasi multivariabel ke dalam sistem pemetaan yang dapat ditindaklanjuti. Berikut adalah gambar Daerah Aliran Sungai (DAS) Tukad Mati yang menjadi objek pada Penelitian ini.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan teknik *stratified random sampling* berdasarkan zonasi tingkat kerawanan banjir yang telah dihasilkan dari *overlay* parameter spasial. Dalam hal ini, wilayah Penelitian penelitian dibagi menjadi lima kelas kerawanan (tidak rawan, cukup rawan, sedang, rawan, dan sangat rawan), dari mana diambil masing-masing satu titik sampel secara acak untuk diverifikasi. Tujuh titik lokasi sampel dipilih mewakili zona berbeda dari hulu hingga hilir DAS Tukad Mati. Setiap titik lokasi kemudian diverifikasi melalui Google Street View, yang berfungsi untuk memastikan kesesuaian antara hasil analisis SIG dan kondisi visual lapangan. Langkah ini mendukung reliabilitas metode, karena memberikan validasi berbasis bukti visual terhadap klasifikasi spasial yang telah dilakukan. Berikut adalah gambar peta sebaran sampel yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 2. Peta Sebaran Sampel

Dalam mendukung proses Penelitian ini, digunakan beberapa alat bantu utama berupa perangkat keras yang digunakan antara lain MSI Modern 14 C12M (9S7-14J112-060) dengan spesifikasi prosesor Intel Core i5-1235U, RAM 8GB, SSD 512GB, dan layar 14 inci FHD, serta MacBook Pro (Retina, 15-inch, Mid 2015). Kedua perangkat ini digunakan sebagai media pengolahan data. Untuk perangkat lunak, digunakan *software* ArcGIS Pro sebagai alat utama dalam pembuatan peta dan analisis data spasial, *software* DOCS sebagai media penyusunan laporan kolaboratif secara daring, serta Google sebagai referensi pendukung dalam pencarian literatur dan data relevan. Kombinasi dari perangkat keras dan perangkat lunak ini memastikan kelancaran dalam setiap tahapan proses penelitian mulai dari pengolahan data hingga penyusunan laporan akhir.

Data yang digunakan dalam Penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari sumber-sumber terpercaya dan telah banyak digunakan dalam studi hidrologi dan pemetaan bencana. Data curah hujan diambil dari CHIRPS, sedangkan data jenis tanah diperoleh dari FAO, dan data DEM resolusi 30 meter diperoleh dari USGS untuk menganalisis kemiringan lereng dan ketinggian lahan. Citra satelit Sentinel-2 (10 m) digunakan untuk menganalisis tutupan lahan, sementara jaringan jalan dan sungai diunduh dari *Open Street Map* (OSM) untuk keperluan analisis evakuasi dan *buffer* sungai. Selain itu, batas administratif, batas DAS, serta lokasi fasilitas umum seperti sekolah, rumah sakit, dan tempat ibadah diperoleh dari INA-Geoportal dan OSM. Seluruh data diolah dalam format raster dan vektor agar dapat diintegrasikan dengan baik ke dalam platform SIG.

Ukuran analisis dalam Penelitian ini dibangun dari enam parameter utama yang memengaruhi kerawanan banjir, yaitu: curah hujan, kemiringan lereng, ketinggian lahan, penggunaan lahan, jenis tanah, dan *buffer* sungai. Setiap parameter ini mewakili aspek fisik dan lingkungan yang secara langsung berkontribusi terhadap risiko terjadinya banjir. Untuk menghasilkan informasi spasial yang terstandar dan dapat digabungkan ke dalam satu model kerawanan, dilakukan proses *skoring* dan pembobotan parameter dengan pendekatan *weighted overlay analysis* menggunakan perangkat lunak ArcGIS Pro.

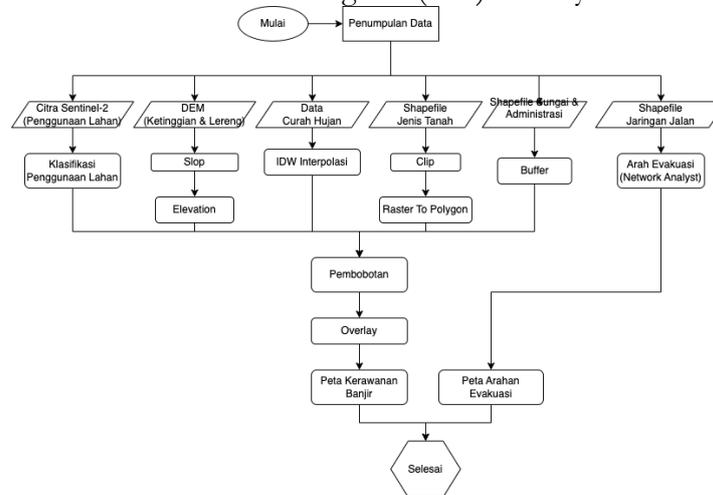
Dalam proses ini, *skoring* parameter dilakukan terlebih dahulu dengan metode klasifikasi *equal interval* yang membagi nilai data menjadi lima kelas, yaitu: sangat rawan (skor 1.00 – 1.80), cukup rawan (skor 1.81 – 2.60), sedang (skor 2.61 – 3.40), rawan (skor 3.41 – 4.20), dan sangat rawan (skor 4.21 – 5.00). Rentang skor ini memberikan penilaian kuantitatif atas kontribusi masing-masing parameter terhadap tingkat kerawanan banjir. Selanjutnya, setiap parameter diberi bobot sesuai dengan tingkat pengaruhnya berdasarkan hasil telaah pustaka dan kajian empiris, dengan rincian: curah hujan (15%), kemiringan lereng (20%), ketinggian lahan (25%), penggunaan lahan (20%), jenis tanah (10%), dan *buffer* sungai (10%). Secara matematis, nilai akhir kerawanan banjir pada suatu lokasi dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{Interval Kelas} = \frac{X_{max} - X_{min}}{n} \tag{1}$$

dengan:

- $X_{max}$  : nilai skor tertinggi (skor total maksimal)
- $X_{min}$  : nilai skor terendah (skor total minimal)

Selain pemetaan kerawanan, Penelitian ini juga menyusun jalur evakuasi optimal dengan menggunakan metode *Network Analyst – Closest Facility* yang tersedia dalam ArcGIS. Jalur evakuasi dihitung berdasarkan kecepatan tempuh, kerapatan jaringan jalan, dan kedekatannya terhadap fasilitas umum yang berfungsi sebagai titik kumpul evakuasi. Metode ini memungkinkan identifikasi jalur tercepat dan teraman dalam menghadapi bencana banjir, dengan memperhatikan keterhubungan antar simpul jalan dan aksesibilitas masyarakat. Untuk menunjang proses analisis ini, peta jaringan jalan OSM dan titik-titik fasilitas umum dijadikan sebagai layer utama dalam pemodelan jaringan evakuasi. Berikut adalah gambar diagram alir Penelitian ini yang menggambarkan tahapan-tahapan sistematis dalam pelaksanaan analisis kerawanan banjir dan arahan evakuasi berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) di wilayah DAS Tukad Mati..



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

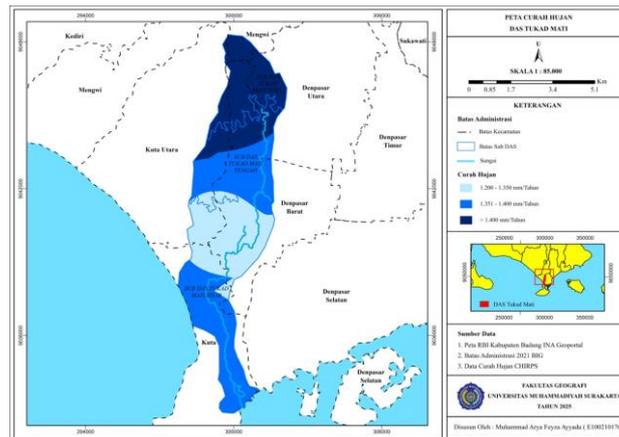
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Temuan yang disajikan pada bagian ini menggambarkan kondisi objektif wilayah studi, yang telah diinterpretasikan berdasarkan konteks geografis dan data spasial aktual. Seluruh hasil dianalisis dalam bentuk narasi deskriptif yang menjelaskan karakteristik spasial tiap parameter, hasil integrasi zonasi kerawanan banjir, serta efektivitas jalur evakuasi yang dihasilkan.

#### 1. Curah Hujan

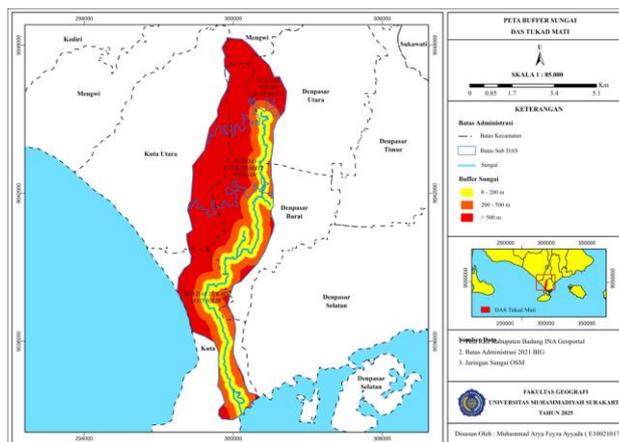
Berdasarkan hasil pengolahan data CHIRPS, wilayah DAS Tukad Mati memiliki curah hujan tahunan yang tergolong tinggi, yakni berkisar antara 2.500 mm hingga lebih dari 3.000 mm. Kondisi ini mengindikasikan bahwa wilayah ini memiliki potensi limpasan permukaan yang besar, terutama saat musim hujan. Curah hujan tertinggi tersebar di bagian tengah hingga hilir DAS, yang mendukung asumsi bahwa wilayah ini sangat rentan terhadap akumulasi air berlebih yang dapat mengakibatkan banjir. Pengaruh signifikan curah hujan terhadap banjir tercermin dalam bobot analisis sebesar 15%, menjadikannya salah satu parameter utama dalam penentuan kerawanan.



Gambar 4. Peta Curah Hujan

## 2. Buffer Sungai

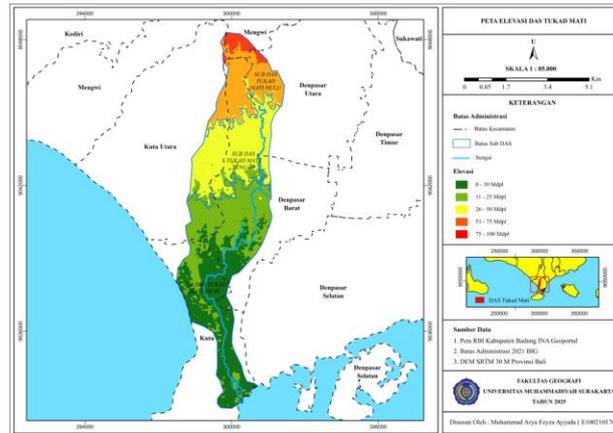
Analisis spasial terhadap jarak terhadap sungai menunjukkan bahwa wilayah-wilayah yang berada dalam radius <math><20</math> meter dari sungai memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap banjir. Zona ini didominasi oleh permukiman padat di kawasan urban, yang tidak memiliki zona sempadan sungai yang memadai. Kondisi ini diperparah dengan buruknya sistem drainase dan tingginya sedimentasi. Dengan bobot sebesar 10%, parameter ini menekankan pentingnya penataan ruang di sekitar sempadan sungai agar tidak semakin meningkatkan kerentanan kawasan terhadap bencana banjir.



Gambar 5. Peta Buffer Sungai

## 3. Elevasi (Ketinggian Lahan)

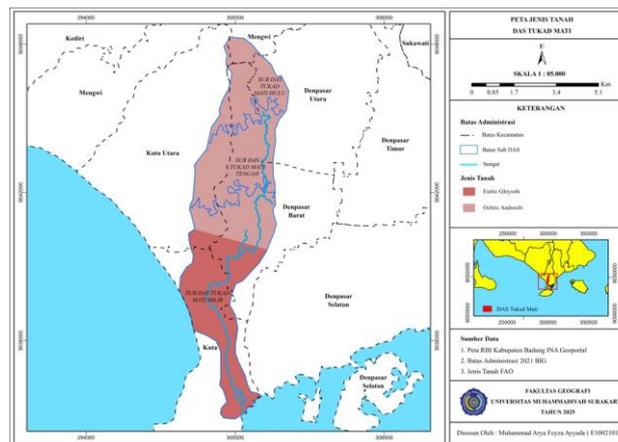
Elevasi wilayah DAS Tukad Mati menunjukkan dominasi area dataran rendah dengan ketinggian 51–100 mdpl, terutama di bagian hilir dan tengah. Ketinggian ini menjadikan wilayah tersebut sebagai daerah penampungan akhir limpasan air dari hulu, menjadikannya lebih sering terdampak banjir. Dengan bobot sebesar 25% yang merupakan tertinggi dari seluruh parameter, ketinggian lahan menjadi indikator yang sangat krusial dalam menilai kerawanan spasial terhadap banjir.



**Gambar 6. Peta Elevasi dan Tukad Mati**

#### 4. Jenis Tanah

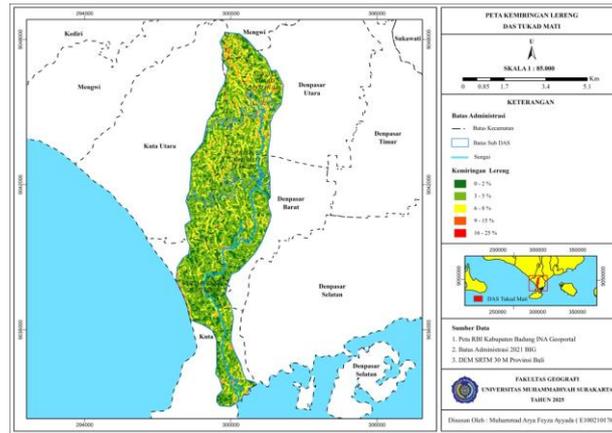
Hasil klasifikasi jenis tanah menunjukkan bahwa DAS Tukad Mati didominasi oleh tanah jenis Regosol dan Kambisol, yang memiliki infiltrasi sedang hingga rendah. Regosol, dengan tekstur kasar dan daya resap yang rendah, cenderung mempercepat limpasan dan meningkatkan risiko banjir permukaan. Parameter ini, meskipun memiliki bobot relatif kecil yaitu 10%, tetap memberikan kontribusi dalam menggambarkan kapasitas lahan untuk menyerap air, terutama di kawasan padat penduduk dan wilayah terbangun.



**Gambar 7. Peta Jenis Tanah**

#### 5. Kemiringan Lereng

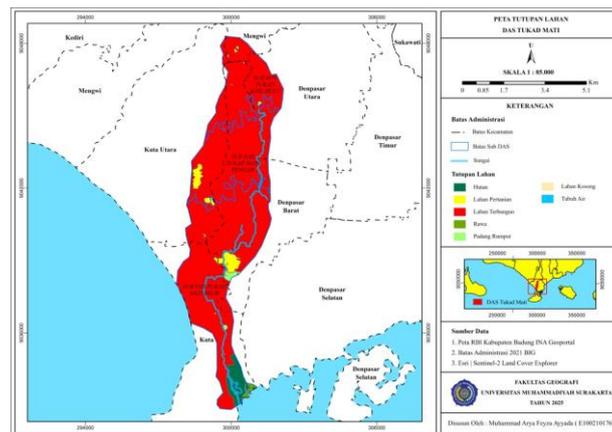
Wilayah DAS ini sebagian besar memiliki kemiringan lereng berkisar antara 0–8% hingga 15%, yang termasuk dalam kategori landai. Kemiringan landai mengakibatkan air cenderung menggenang dan mengalir lambat, terutama pada kawasan dengan permukaan tertutup seperti jalan dan bangunan. Bobot sebesar 20% menunjukkan bahwa kemiringan lereng merupakan parameter geomorfologis penting yang turut membentuk pola kerentanan banjir di kawasan urban seperti Denpasar dan Kuta.



Gambar 8. Peta Kemiringan Lereng

## 6. Tutupan Lahan

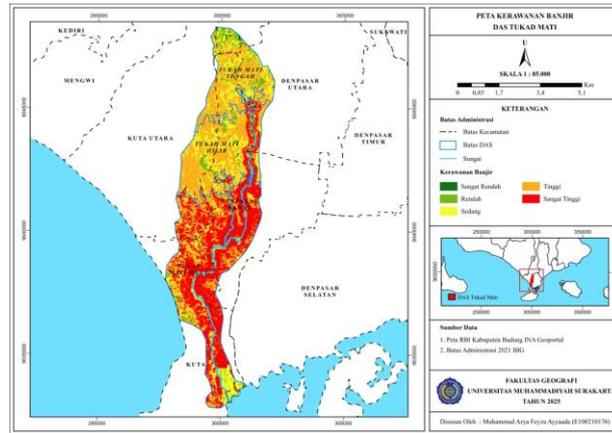
Citra Sentinel-2 yang diklasifikasi secara *supervised* mengungkapkan bahwa penggunaan lahan di DAS Tukad Mati didominasi oleh permukiman dan kawasan terbangun lainnya. Permukiman memberikan skor tinggi karena wilayah ini memiliki tingkat *impervious surface* tinggi yang menghambat infiltrasi air. Hal ini menyebabkan peningkatan debit permukaan dan mempercepat aliran air menuju sungai utama. Parameter ini diberi bobot 20%, menegaskan peran penting penggunaan lahan dalam menentukan tingkat kerawanan, terutama dalam konteks urbanisasi pesat.



Gambar 9. Peta Tutupan Lahan

## 7. Kerawanan Banjir

Hasil integrasi enam parameter melalui metode *weighted overlay* menghasilkan peta zonasi kerawanan banjir yang terdiri atas lima kelas, yaitu sangat rawan, rawan, sedang, cukup rawan, dan tidak rawan. Wilayah dengan tingkat kerawanan sangat tinggi terkonsentrasi di bagian tengah dan hilir DAS, meliputi Kecamatan Denpasar Barat, Denpasar Utara, Kuta, dan Seminyak. Faktor dominan di kawasan ini adalah kombinasi antara curah hujan tinggi, elevasi rendah, dan tutupan lahan berupa permukiman padat. Zona tidak rawan ditemukan di bagian hulu dengan topografi lebih tinggi dan penggunaan lahan yang masih alami. Peta ini menunjukkan distribusi spasial kerentanan secara komprehensif dan dapat menjadi acuan dalam perencanaan tata ruang dan strategi mitigasi.



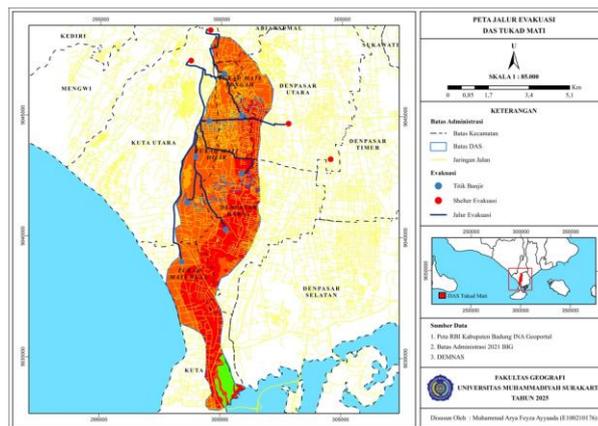
Gambar 10. Peta Kerawanan Banjir

Tabel 1. Tabel Area DAS

AREA DAS	Luas (Ha)				
	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Tukad Mati Hulu	7,51111759	64,52524	171,5792	489,4506	1049,072624
Tukad Mati Tengah	8,686472242	97,32086	278,5787	269,5602	1,583251331
Tukad Mati Hilir	1,848235866	62,50999	288,6289	515,1863	67,24353505

8. Jalur Evakuasi (*Network Analyst*)

Dengan menggunakan fitur *Closest Facility* dalam *Network Analyst*, Penelitian ini berhasil memetakan jalur evakuasi tercepat dari titik rawan ke fasilitas evakuasi terdekat. Jalur ini mempertimbangkan jaringan jalan, kemudahan akses, dan kondisi topografi. Fasilitas evakuasi seperti sekolah, kantor pemerintahan, dan hotel bertingkat dipilih karena memiliki struktur bangunan yang memungkinkan evakuasi vertikal. Hasil analisis menunjukkan bahwa jalur evakuasi yang optimal berada di sekitar jalan arteri dan kolektor yang memiliki aksesibilitas tinggi dan terhubung langsung dengan fasilitas publik di zona aman. Temuan ini mendukung efektivitas mitigasi bencana berbasis spasial yang tidak hanya mengidentifikasi kerawanan, tetapi juga menyediakan solusi teknis evakuasi.



Gambar 11. Peta Jalur Evakuasi

**Pembahasan**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat kerawanan banjir serta memetakan jalur evakuasi tercepat di Daerah Aliran Sungai (DAS) Tukad Mati menggunakan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Network Analyst* ArcGIS. Dengan melibatkan enam parameter utama diantaranya, curah hujan, *buffer* sungai, ketinggian lahan, jenis tanah, kemiringan lereng, dan penggunaan lahan. Penelitian ini menghasilkan peta zonasi kerawanan banjir yang terintegrasi dengan peta rute evakuasi spasial berbasis jaringan jalan aktual. Hasil pPenelitian ini

mengkonfirmasi bahwa kondisi fisiografi DAS Tukad Mati, yang sebagian besar didominasi oleh dataran rendah dan wilayah terbangun, sangat rentan terhadap kejadian banjir. Risiko banjir diperparah oleh curah hujan tinggi di wilayah hulu serta tingginya intensitas pembangunan yang mengurangi kapasitas resapan tanah. Hal ini sejalan dengan temuan lapangan yang menunjukkan bahwa kawasan tengah dan hilir DAS seperti Denpasar Barat, Denpasar Selatan, dan Kuta memiliki skor kerawanan tinggi hingga sangat tinggi dalam peta overlay.

Kontribusi utama dari Penelitian ini adalah menyediakan pendekatan spasial yang terukur dalam mengidentifikasi kerentanan banjir serta merancang sistem evakuasi berbasis analisis jaringan. Tidak hanya menginformasikan zona rawan banjir secara visual, Penelitian ini juga menyajikan strategi evakuasi yang adaptif terhadap kondisi jalan dan bangunan vertikal yang dapat berfungsi sebagai tempat pengungsian darurat. Analisis berbasis *Closest Facility* memungkinkan perencanaan rute yang realistis dalam kondisi darurat, di mana waktu dan keselamatan menjadi variabel krusial. Dengan demikian, pendekatan ini mampu mengisi celah dalam Penelitian penelitian sebelumnya yang cenderung hanya berhenti pada pemetaan risiko tanpa merancang strategi mitigasi operasional seperti evakuasi. Temuan ini juga memperkuat urgensi pengintegrasian antara data geospasial dan kebijakan kebencanaan lokal di wilayah-wilayah urban rawan banjir seperti DAS Tukad Mati.

Secara spasial, hasil *overlay* keenam parameter menunjukkan bahwa zona kerawanan sangat tinggi mencakup 1.583,25 hektar di wilayah Tukad Mati Tengah dan 1.049,07 hektar di Tukad Mati Hulu. Meski Tukad Mati Hilir hanya memiliki 67,24 hektar dalam kategori sangat tinggi, posisinya sebagai muara dari akumulasi aliran menjadikannya wilayah strategis dalam mitigasi banjir. Temuan ini secara langsung mendukung hipotesis awal bahwa risiko banjir meningkat dari utara ke selatan seiring kontur elevasi dan tekanan urbanisasi. Elevasi terbukti menjadi parameter paling krusial dengan bobot 25%, karena wilayah dataran rendah seperti Kuta dan Denpasar Selatan menunjukkan tingkat kerentanan paling tinggi. Disusul oleh penggunaan lahan dan kemiringan lereng, yang turut menentukan besarnya limpasan permukaan akibat rendahnya kapasitas infiltrasi. Dalam analisis evakuasi, metode *Closest Facility Analysis* menunjukkan bahwa titik-titik evakuasi tercepat bervariasi, tergantung pada ketersediaan fasilitas dan struktur jaringan jalan. Di kawasan Tukad Mati Tengah, fasilitas seperti Kantor Kecamatan Denpasar Barat dan Gedung Serbaguna Lumintang menjadi titik evakuasi utama. Di kawasan hilir, hotel bertingkat dan pusat perbelanjaan di Legian dan Sunset Road dimanfaatkan sebagai lokasi evakuasi vertikal yang aman dari genangan.

Penelitian ini sejalan dengan beberapa studi sebelumnya yang telah dikaji, antara lain oleh Ramadhan & Chernovita, (2021) yang menggunakan metode *overlay* dan *skoring* dalam analisis kerawanan banjir di Kabupaten Semarang, menunjukkan efektivitas SIG dalam memetakan zona rawan banjir. Hasil serupa juga ditemukan oleh Mulia & Handayani, (2024) di Kota Padang, yang menekankan pengaruh signifikan curah hujan dan perubahan penggunaan lahan terhadap peningkatan risiko banjir, sebagaimana terjadi di DAS Tukad Mati. Penelitian oleh Hanum et al. (2024) di Sub DAS Opak menegaskan bahwa elevasi dan penggunaan lahan merupakan parameter dominan, konsisten dengan temuan Penelitian ini yang menunjukkan elevasi sebagai faktor paling berpengaruh. Selain itu, studi oleh Rakuasa & Latue, (2023) di DAS Wae Heru memperkuat validitas penggunaan enam parameter utama, termasuk *buffer* sungai dan kemiringan lereng, yang juga digunakan dalam Penelitian ini. Meski objek kajian berbeda, kesamaan metode dan hasil menunjukkan bahwa pendekatan berbasis SIG dengan *weighted overlay* sangat relevan dalam analisis kerentanan banjir. Perbedaan utama terletak pada integrasi analisis evakuasi berbasis *Closest Facility* menggunakan *Network Analyst*, yang menjadikan Penelitian ini lebih komprehensif dalam mendukung perencanaan mitigasi dan tanggap darurat banjir secara spasial.

Temuan menarik dari hasil Penelitian adalah bahwa wilayah Tukad Mati Hilir, meski memiliki luasan zona sangat tinggi yang kecil, ternyata merupakan kawasan yang sangat penting dari sisi mitigasi karena menjadi lokasi hilir dari seluruh aliran Tukad Mati. Hal ini menunjukkan bahwa besaran area rawan tidak selalu berbanding lurus dengan urgensinya dalam kebijakan mitigasi. Selain itu, rute tercepat yang ditemukan dalam *Closest Facility Analysis* kerap kali berbeda

dari rute terpendek secara geometris. Hal ini menunjukkan keunggulan metode ini dalam mempertimbangkan variabel akses jalan aktual, potensi genangan, dan arah jalan satu arah, yang semuanya sangat relevan dalam konteks urban padat seperti Denpasar. Hasil Penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD), Dinas PUPR, serta Dinas Tata Ruang untuk menyusun strategi mitigasi risiko berbasis spasial. Peta kerawanan banjir dapat dijadikan acuan dalam pembatasan pembangunan infrastruktur di zona rawan tinggi, serta dalam perencanaan pengelolaan drainase dan ruang terbuka hijau. Sementara itu, peta evakuasi dapat digunakan dalam simulasi tanggap darurat dan penyusunan jalur evakuasi resmi. Penelitian ini juga menyarankan penguatan edukasi kebencanaan kepada masyarakat di wilayah-wilayah yang telah teridentifikasi sebagai zona sangat rawan, serta pelabelan titik evakuasi vertikal dengan jelas, termasuk penyediaan sarana dan prasarana pendukung.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dicermati. Pertama, parameter yang digunakan dalam analisis merupakan data spasial yang bersifat statis, sehingga belum mencakup dinamika temporal seperti tinggi muka air sungai secara harian, intensitas curah hujan ekstrem, maupun perubahan tutupan lahan yang dapat memengaruhi kondisi banjir dari waktu ke waktu. Kedua, pemodelan evakuasi sangat bergantung pada kualitas data jaringan jalan yang tersedia dalam perangkat lunak ArcGIS. Data ini kemungkinan belum sepenuhnya mutakhir atau belum terverifikasi langsung di lapangan, sehingga dapat memengaruhi akurasi penentuan rute tercepat dan aman. Ketiga, Penelitian ini belum memasukkan variabel sosial-ekonomi ke dalam analisis, seperti kepadatan penduduk, keberadaan kelompok rentan seperti lansia dan anak-anak, serta kapasitas fasilitas evakuasi dalam menampung jumlah pengungsi sesuai kebutuhan, yang sejatinya sangat penting dalam perencanaan mitigasi bencana secara menyeluruh.

Selanjutnya, Penelitian ini sebaiknya mengintegrasikan data temporal dan prediktif, seperti pemodelan banjir berbasis curah hujan aktual (*real-time flood forecasting*) dan simulasi debit sungai musiman. Selain itu, integrasi teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) untuk memantau tinggi muka air, serta penggunaan drone mapping untuk validasi peta risiko secara lapangan akan meningkatkan akurasi. Dari sisi evakuasi, perlu ada pendekatan partisipatif dengan melibatkan masyarakat dalam penyusunan jalur evakuasi, serta penerapan sistem navigasi digital berbasis GPS dan notifikasi bencana yang terhubung dengan data spasial. Hal ini akan meningkatkan efektivitas respons masyarakat saat bencana banjir terjadi.

## **KESIMPULAN**

Penelitian ini berhasil menganalisis tingkat kerawanan banjir dan menyusun jalur evakuasi tercepat di kawasan DAS Tukad Mati, Bali, dengan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG). Melalui metode overlay berjenjang terhadap enam parameter utama, dihasilkan peta zonasi banjir yang mengidentifikasi lima tingkat kerawanan, dari rendah hingga sangat tinggi. Wilayah dengan kerawanan tinggi umumnya berada di daerah padat penduduk, bertopografi datar, dan dekat sungai, seperti Kuta dan Seminyak. Selain itu, jalur evakuasi tercepat dirancang menggunakan metode Network Analyst, yang mempertimbangkan jaringan jalan, titik rawan, dan lokasi evakuasi terdekat untuk memastikan efisiensi dan keselamatan. Penelitian ini menunjukkan bahwa SIG sangat efektif dalam mendukung pemetaan risiko bencana dan perencanaan evakuasi berbasis data spasial. Temuan ini memberikan kontribusi strategis dalam mitigasi banjir dan penyusunan kebijakan tata ruang yang adaptif, khususnya bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan di kawasan urban DAS Tukad Mati.

## **REFERENSI**

- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2021). *Indeks Risiko Bencana Indonesia Tahun 2021*. BNPB. <https://bnpb.go.id/>
- BWS Bali-Penida. (2019). *Pembangunan Prasarana Pengendali Banjir Tukad Mati di Kabupaten Badung dan Kota Denpasar*. Diakses dari:

<https://sda.pu.go.id/balai/bwsbalipenida/berita/detailberita/109-pembangunan-prasarana-pengendali-banjir-tukad-mati-di-kab-badung-dan-kota-denpasar>

- Hanum, L., El Ravi, A. A., Febrianty, D. R., Azizah, N. A. K., Normalita, R., Rahmawati, D. N., Rahmayidin, F., Aufal, F. B., & Estiono, M. S. (2024). Analisis Tingkat Kerawanan Banjir di Sub Das Opak menggunakan Metode Weighted Overlay. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 12(1), 129–139. <https://doi.org/10.23887/jjpg.v12i01.70761>
- Hernoza, F., Susilo, B., & Erlansari, A. (2020). Pemetaan Daerah Rawan Banjir Menggunakan Rekursif, 8(2).
- Madani, I., Bachri, S., & Aldiansyah, S. (2019). PEMETAAN KERAWANAN BANJIR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI (DAS) BENDO KABUPATEN BANYUWANGI BERBASIS SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS. *Jurnal Geosaintek*, 8(2), 2502–3659. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v8i2.110907>
- Mulia, F., & Handayani, W. (2024). Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis Untuk Pemetaan Kerawanan Bencana Banjir Kota Padang Tahun 2011-2022. *GEOID*, 19, 192–201. <https://doi.org/10.12962/geoid.v19i2.1205>
- Murray, A. T. (2002). GIS and Multicriteria Decision Analysis, by Jacek Malczewski, 1999. *Geographical Analysis*, 34(1), 91–92. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2002.tb01077.x>
- Priyono, K. D., & Andayani, A. P. (2023). *Application of Landsat 7 and 8 OLI Imagery for Spatial Analysis of Flood Vulnerability in Bekasi Regency, West Java*.
- Pryastuti, L., Studi Teknik Geofisika, P., Sains dan Teknologi, F., Jambi Jl Jambi-MaBuliaan, U., & Jambi, M. (2021). PEMETAAN TINGKAT KERAWANAN BANJIR MENGGUNAKAN METODE SCORING DAN METODE OVERLAY BERBASIS SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS DI KOTA JAMBI. In *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika* (Vol. 05, Issue 02). <http://dataonline.bmkg.go.id/home>.
- Rakuasa, H., & Latue, P. C. (2023). ANALISIS SPASIAL DAERAH RAWAN BANJIR DI DAS WAE HERU, KOTA AMBON. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Laban*, 10(1), 75–82. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.1.8>
- Ramadhan, D., & Chernovita, H. (2021). Analisis Tingkat Kerawanan Banjir di Kabupaten Semarang Menggunakan Overlay dan Skoring Memanfaatkan SIG. *JAGAT (Jurnal Geografi Aplikasi Dan Teknologi)*, 5, 1. <https://doi.org/10.33772/jagat.v5i1.14816>
- Saaty, T., Vargas, L., & St, C. (2022). *The Analytic Hierarchy Process*.
- Sari, D. N., Anna, A. N., Taryono, T., Maulana, M. F., & Khumaeroh, D. N. F. (2024). DETECTION OF FLOOD HAZARD POTENTIAL ZONES BY USING ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS IN TUNTANG WATERSHED AREA, INDONESIA. *Geographia Technica*, 19(1), 61–78. [https://doi.org/10.21163/GT\\_2024.191.05](https://doi.org/10.21163/GT_2024.191.05)