

PENYEMPITAN SUNGAI WELANG: PEMETAAN RISIKO BANJIR MENGGUNAKAN *MODIFIED NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX*

WELANG RIVER CONSTRICTION: FLOOD RISK MAPPING USING MODIFIED NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX

**Wahyu Pratama Andhika Maheswara^{1*}, Muhammad Alvian Jaya², Andreas Benaya³, Christian
Starly⁴, Nalendra Fadila Saskara⁵, Iqbal Ramadhani Mukhlis⁶**

E-mail: 23082010015@student.upnjatim.ac.id¹, 23082010019@student.upnjatim.ac.id²,
23082010025@student.upnjatim.ac.id³, 23082010026@student.upnjatim.ac.id⁴,
23082010036@student.upnjatim.ac.id⁵, iqbal.ramadhani.fasilkom@upnjatim.ac.id⁶

¹²³⁴⁵⁶Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer, UPN "Veteran Jawa Timur"

Abstrak

Sungai Welang di Kabupaten Pasuruan merupakan salah satu sungai kritis yang sering memicu banjir bandang dan melumpuhkan jalur logistik Pantura. Fenomena penyempitan alur sungai akibat sedimentasi dan okupansi lahan diidentifikasi sebagai faktor utama penurunan kapasitas tampung air. Namun, pemantauan perubahan fisik sungai secara konvensional memerlukan waktu dan biaya yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyempitan alur Sungai Welang dan memetakan risiko bencana menggunakan teknologi *Cloud Computing* berbasis Google Earth Engine (GEE). Data yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-2 multi-temporal periode 2018-2025. Metode ekstraksi badan air diimplementasikan menggunakan algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) untuk mendeteksi perubahan lebar sungai secara otomatis. Hasil ekstraksi spasial pada segmen kritis sepanjang 5,25 km menunjukkan terjadinya penyusutan luas permukaan air secara drastis, dari 108.119,12 m² pada tahun 2018 menjadi 4.923,83 m² pada tahun 2025. Analisis spasial mengonfirmasi keberadaan titik penyempitan (*bottleneck*) yang bertepatan dengan kawasan pemukiman padat di dataran rendah. Kesimpulannya, visualisasi zona risiko bencana banjir yang dihasilkan sangat efektif digunakan sebagai instrumen pendukung keputusan bagi pemerintah daerah dalam upaya mitigasi dan penanggulangan bencana secara menyeluruh berbasis data.

Kata kunci: Sungai Welang, *Cloud Computing*, MNDWI, Penyempitan Sungai, Risiko Bencana.

Abstract

Welang River in Pasuruan Regency is a critical watercourse frequently triggering flash floods and paralyzing North Coast (Pantura) logistics routes. The phenomenon of river channel narrowing, caused by sedimentation and land occupation, has been identified as a primary factor in the decline of water storage capacity. However, conventional monitoring of physical river changes is time-consuming and costly. This study aims to analyze the narrowing of the Welang River channel and map disaster risks using Cloud Computing technology via Google Earth Engine (GEE). The data utilized consists of multi-temporal Sentinel-2 satellite imagery from the 2018–2025 period. A water body extraction method was implemented using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) algorithm to automatically detect changes in river width. Spatial extraction results on a critical 5.25 km segment revealed a drastic reduction in water surface area, from 108,119.12 m² in 2018 to 4,923.83 m² in 2025.

Spatial analysis confirmed the presence of bottlenecks coinciding with densely populated lowland areas. In conclusion, the generated flood risk zone visualizations serve as a highly effective decision-support instrument for local governments in comprehensive, data-driven disaster mitigation and management efforts.

Keywords: *Welang River, Cloud Computing, MNDWI, River Constriction, Disaster Risk*

1. PENDAHULUAN

Bencana banjir merupakan salah satu persoalan lingkungan hidrometeorologis yang paling dominan di Indonesia, di mana frekuensi kejadiannya diperkirakan mencapai 43,1% dari total bencana nasional yang terjadi setiap tahunnya [1]. Dampak yang ditimbulkan sangat destruktif terhadap stabilitas sosial, roda perekonomian, serta ketahanan infrastruktur publik [1]. Dalam konteks pengelolaan wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS), dinamika perubahan kondisi fisik dan morfologi sungai menjadi faktor penentu utama yang memengaruhi tingkat kerentanan suatu kawasan terhadap ancaman luapan air. Oleh karena itu, pemetaan dan pemantauan tata ruang fisik badan sungai secara sistematis dan terintegrasi menjadi langkah awal yang sangat krusial dalam siklus mitigasi dan pengurangan risiko bencana alam [1].

Pada lingkup regional, Sungai Welang di Kabupaten Pasuruan berstatus sebagai salah satu DAS kritis yang mendapat prioritas penanganan dari pemerintah daerah. Secara historis, kawasan DAS Welang telah dihantam serangkaian banjir besar yang tercatat terjadi pada tahun 2008, 2011, 2012, 2016, dan 2018 [1]. Ekskalasi bencana tersebut memberikan dampak masif yang mengakibatkan tergenangnya kawasan pemukiman, sektor industri, hingga lahan pertanian warga, serta menyebabkan lumpuhnya totalitas jalur logistik vital di Pantai Utara (Pantura) Jawa [1], [2]. Salah satu pemicu utama menurunnya kapasitas tampung hidrolis pada sungai ini adalah fenomena penyempitan alur (*bottleneck*). Penyempitan ini terjadi sebagai akibat langsung dari tingginya laju sedimentasi dan erosi material dasar sungai yang terbawa oleh arus dari wilayah hulu ke hilir [3]. Kondisi degradasi morfologi sungai tersebut semakin diperparah oleh masifnya alih fungsi lahan di kawasan sempadan yang merusak sabuk hijau ekosistem riparian, serta tingginya intervensi aktivitas antropogenik yang mengubah siklus hidrologi DAS secara keseluruhan [4], [5].

Sebagai upaya mitigasi proaktif yang didasarkan pada data dan fakta kebencanaan tersebut, identifikasi dan pemetaan titik-titik penyempitan sungai secara berkala menjadi suatu keharusan. Namun, metode pengamatan perubahan morfologi sungai secara konvensional melalui survei lapangan sering kali terbentur oleh kendala operasional, seperti kebutuhan alokasi waktu yang lama, padat karya, dan biaya survei yang sangat besar. Oleh karena itu, diperlukan sebuah lompatan pendekatan teknologi pemantauan jarak jauh yang berbasis pengolahan data besar (*big data*) citra satelit dalam kerangka manajemen risiko bencana secara berkelanjutan [6].

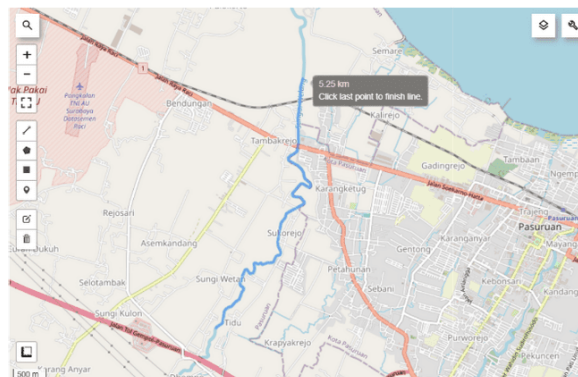
Untuk memastikan perhitungan pemisahan (*delineasi*) yang presisi antara batas air sungai dan daratan di sekitarnya, penelitian ini memfokuskan perhitungan ekstraksi luasan menggunakan algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI). Berbeda dengan indeks air standar, MNDWI merupakan indeks spektral yang dirancang secara spesifik untuk menonjolkan fitur perairan terbuka [10]. Keunggulan utama algoritma MNDWI adalah kemampuannya dalam menekan secara signifikan gangguan (*noise*) pantulan spektral yang menyerupai air dari objek lahan terbangun maupun vegetasi [10]. Melalui indeks ini, fitur badan air pada citra satelit dapat dihitung secara otomatis untuk mendeteksi anomali penyempitan lebar sungai secara spasiotemporal.

Dalam pengekseskusan kalkulasi MNDWI tersebut, penelitian ini menggunakan Google Colab sebagai perangkat kerja (*tools*) utama untuk memproses baris kode (*coding*) komputasi menggunakan bahasa pemrograman Python [7]. Sementara itu, platform Google Earth Engine

(GEE) difungsikan secara spesifik untuk tahap visualisasi spasial dan pemetaan (*mapping*) bentang alam tanpa membebani perangkat keras lokal [8]. Dengan mengintegrasikan data citra satelit Sentinel-2 melalui kode Python di Colab dan proses *rendering* peta di GEE [9], pemantauan pergeseran batas badan air dapat dianalisis dengan tingkat akurasi yang sangat baik. Berdasarkan urgensi permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam dinamika penyempitan alur Sungai Welang menggunakan perhitungan algoritma MNDWI yang dikomputasikan melalui Python di Google Colab serta divisualisasikan pemetaannya menggunakan GEE. Hasil ekstraksi spasial ini difokuskan untuk menghasilkan peta risiko bencana banjir yang memvisualisasikan lokasi titik-titik penyempitan secara faktual. Luaran pemetaan ini diharapkan dapat diimplementasikan sebagai instrumen pendukung keputusan (*decision support system*) yang strategis bagi pemerintah daerah agar formulasi kebijakan tata ruang dan penanggulangan bencana di DAS Welang lebih komprehensif dan bertumpu pada bukti empiris (*data-driven*) [1].

2. METODOLOGI

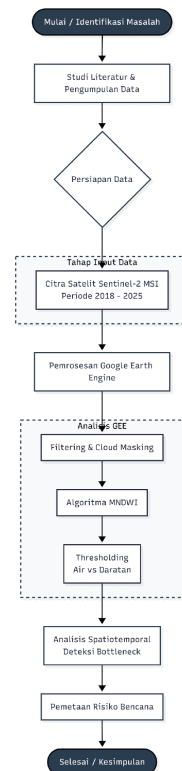
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis keruangan (*spatial analysis*) dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*). Penelitian ini dilakukan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Welang yang secara administratif melintasi Kabupaten Malang, Kabupaten Pasuruan, dan Kota Pasuruan, Jawa Timur. Fokus pengamatan dibatasi secara spesifik pada segmen sungai sepanjang 5,25 km yang terletak di wilayah Pasuruan sebelum area hilir (estuari).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik wilayahnya yang merupakan kawasan padat penduduk dengan topografi dataran rendah yang sangat rawan terhadap bencana banjir bandang. Objek utama penelitian adalah perubahan morfologi sungai (penyempitan alur) dan pola okupansi lahan di sepanjang sempadan sungai tersebut dalam kurun waktu 2018 hingga 2025.

Alur penelitian dirancang secara sistematis untuk menjawab permasalahan penyempitan alur sungai melalui pemrosesan data besar (*big data*). Seluruh tahapan komputasi, mulai dari akuisisi citra hingga ekstraksi fitur, dieksekusi secara terpusat menggunakan pelantar *Cloud Computing* Google Earth Engine (GEE) berbasis *Application Programming Interface* (API) JavaScript untuk menjamin efisiensi waktu dan sumber daya komputasi [7].



Gambar 2. Alur penelitian

2.1 Identifikasi Masalah, Studi Literatur, dan Pengumpulan Data

Penelitian diawali dengan tahapan identifikasi masalah, yaitu mengamati fenomena perubahan morfologi sungai (penyempitan alur) dan tingginya okupansi lahan di sepanjang sempadan sungai yang memicu bencana banjir bandang. Setelah permasalahan dirumuskan, dilakukan studi literatur dan pengumpulan data terkait konsep penginderaan jauh dan hidrologi sebagai landasan teoritis pemecahan masalah.

2.2 Persiapan dan Tahap Input Data

Pada tahap persiapan, dikumpulkan seluruh kebutuhan data spasial. Tahap input data memasukkan dua komponen spasial utama ke dalam sistem, yaitu dataset citra satelit Sentinel-2 tipe *Multispectral Instrument* (MSI) Level-2A yang tersedia pada repositori GEE (*COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED*). Lokasi difokuskan pada area *buffer* di sepanjang aliran Sungai Welang. Data yang diakuisisi merupakan data *time-series* dengan rentang observasi multi-temporal dari tahun 2018 hingga 2025 untuk menangkap dinamika perubahan fisik sungai dalam jangka panjang [9].

2.3 Pemrosesan dan Analisis Google Earth Engine (GEE)

Seluruh tahapan komputasi dieksekusi secara terpusat pada *cloud environment* Google Earth Engine (GEE). Penggunaan pelantar komputasi awan ini memungkinkan manipulasi *big data* citra satelit tanpa hambatan pada spesifikasi perangkat keras lokal. Analisis GEE dilakukan secara otomatis melalui tahapan berikut:

- **Filtering & Cloud Masking:** Meliputi pemotongan citra (*clipping*) sesuai area observasi DAS Welang, menerapkan filter tutupan awan (*Cloud Cover*) di bawah 20%, dan menggunakan Bitmask QA60 untuk menghilangkan gangguan awan serta bayangan awan yang dapat mendistorsi nilai reflektansi objek air [8]. Selanjutnya dilakukan *Temporal Compositing*, yaitu reduksi citra menggunakan fungsi *Median Reducer* pada setiap tahun observasi untuk menghasilkan citra komposit tahunan yang bersih dari *noise* atmosferik.
- **Algoritma MNDWI:** Untuk mendelineasi batas badan air secara otomatis dan akurat, diimplementasikan algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI). Algoritma ini dipilih karena keunggulannya dalam menonjolkan fitur air sekaligus menekan sinyal pantulan dari lahan terbangun (*urban areas*) dan tanah terbuka yang sering kali memiliki nilai reflektansi serupa dengan air pada indeks NDWI standar [10]. Persamaan matematika yang digunakan adalah:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

Dalam sensor Sentinel-2, parameter *Green* merujuk pada *Band 3* (resolusi spasial 10 meter), sedangkan *SWIR* (*Short-wave Infrared*) merujuk pada *Band 11* (resolusi spasial 20 meter). Sebelum kalkulasi, dilakukan *resampling* pada pita *SWIR* menjadi 10 meter agar sesuai dengan resolusi pita hijau, sehingga detail batas tepi sungai dapat dipertahankan secara optimal.

- **Thresholding Air vs Daratan:** Hasil perhitungan menghasilkan nilai spektral dalam rentang -1 hingga 1. Objek air diidentifikasi melalui teknik *thresholding*, di mana nilai indeks di atas 0 (positif) diklasifikasikan secara absolut sebagai badan air murni, sementara nilai di bawah 0 dikategorikan sebagai non-air (vegetasi, tanah, atau bangunan).

Agar penelitian ini dapat direplikasi (*reproducible*), seluruh parameter komputasi dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Komputasi dan Variabel Ekstraksi GEE

Variabel / Parameter		Deskripsi Penggunaan
Platform Komputasi		<i>Google Earth Engine (Cloud Computing)</i>
Citra Satelit		Sentinel-2 Level-2A (<i>Multispectral Instrument</i>)
Algoritma Indeks		<i>Modified Normalized Difference Water Index</i> (MNDWI)
Kanal Spektral (<i>Band</i>)		<i>Band 3 (Green / 10m)</i> dan <i>Band 11 (SWIR / Resampled 10m)</i>
Ambang (<i>Threshold</i>)	Batas	Indeks > 0 (Klasifikasi Fitur Badan Air Positif)
Resolusi Spasial Output		10 x 10 meter / piksel

2.4 Analisis Spatiotemporal dan Deteksi Bottleneck

Analisis perubahan fisik sungai dilakukan dengan metode *overlay* (tumpang susun) terhadap hasil ekstraksi badan air dari tahun 2018 hingga 2025. Perubahan lebar alur sungai diukur pada beberapa titik kontrol di sepanjang aliran hilir Sungai Welang yang diidentifikasi sering mengalami luapan [2]. Indikator utama dalam penelitian ini adalah deteksi titik penyempitan

(*bottleneck*), yaitu area di mana lebar sungai menunjukkan tren pengecilan secara konsisten akibat faktor sedimentasi atau ekspansi lahan pemukiman [3].

2.5 Pemetaan Risiko Bencana dan Kesimpulan

Data perubahan luas dan lebar tersebut kemudian direklasifikasi menggunakan skema pembobotan untuk menghasilkan zonasi risiko bencana banjir. Peta risiko akhir dikembangkan sebagai instrumen visualisasi interaktif yang mengklasifikasikan wilayah sempadan sungai ke dalam tingkat risiko rendah, sedang, dan tinggi berdasarkan kedekatannya dengan titik penyempitan alur tersebut [1]. Peta risiko inilah yang bermuara pada kesimpulan akhir penelitian sebagai rekomendasi mitigasi yang berbasis data.

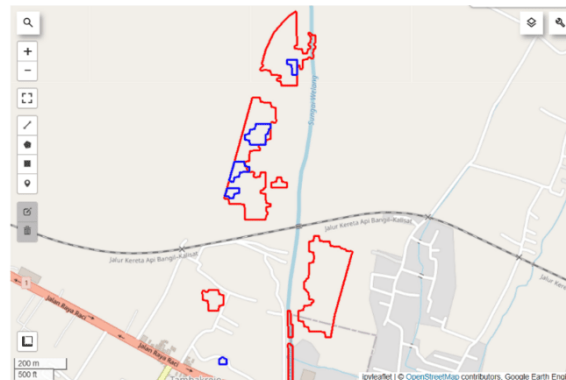
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beranjak dari kerangka metodologi yang telah disusun pada bab sebelumnya, bagian ini akan memaparkan temuan empiris hasil implementasi algoritma *Cloud Computing* dalam mengidentifikasi dinamika fisik dan risiko bencana pada Sungai Welang. Analisis difokuskan secara spesifik pada segmen sungai sepanjang 5,25 km di wilayah Pasuruan, yang merupakan area transisi kritis sebelum mencapai hilir. Fokus pada panjang alur ini memungkinkan pemeriksaan yang lebih mendalam terhadap kelokan mikro (*micro-meander*) dan identifikasi titik penyempitan di kawasan pemukiman padat yang selama ini menjadi pemicu banjir bandang. Penjelasan berikut akan menguraikan temuan penelitian, mulai dari hasil ekstraksi indeks air, pemetaan kerentanan topografi, hingga sintesis zona risiko bencana final.

3.1 Analisis Spasiotemporal dan Ekstraksi MNDWI

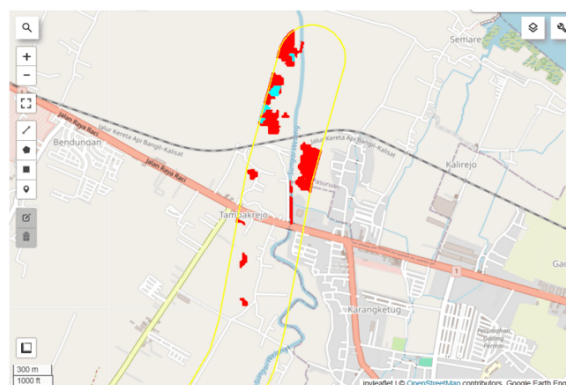
Analisis perubahan fisik alur Sungai Welang dilakukan dengan mengekstraksi nilai piksel badan air menggunakan algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) melalui platform *Google Earth Engine*. Pemilihan MNDWI didasarkan pada kemampuannya yang lebih superior dalam meredam *noise* spektral dari area terbangun dan tanah terbuka di sekitar bantaran sungai. Proses ekstraksi ini menggunakan citra satelit Sentinel-2 Level-2A dengan mengolah variabel *Band 3* (Hijau) dan *Band 11* (SWIR). Untuk memisahkan objek air secara otomatis, diterapkan parameter nilai ambang batas (*threshold*) > 0 , di mana piksel dengan nilai positif diklasifikasikan sebagai fitur badan air.

Berdasarkan hasil ekstraksi spasiotemporal tersebut, ditemukan adanya degradasi kapasitas tampung sungai yang sangat masif. Secara makro pada wilayah studi, luas permukaan air pada tahun 2018 tercatat sebesar 201.930,57 m², namun menurun drastis menjadi hanya 9.981,04 m² pada tahun 2025. Hal ini menunjukkan terjadinya penyempitan kotor sebesar 191.949,53 m².



Gambar 3. Visualisasi garis batas penyempitan

Lebih lanjut, pada analisis spesifik di segmen kritis sepanjang 5,25 km, luasan badan air murni yang terdeteksi pada tahun 2018 adalah 108.119,12 m² dan menyusut tajam menjadi 4.923,83 m² pada tahun 2025. Temuan ini mengonfirmasi hilangnya area badan air aktif sebesar 103.195,29 m² dalam kurun waktu tujuh tahun.



Gambar 4. Pemetaan lokasi bottleneck atau sedimentasi

Bukti visual penyempitan ini terlihat jelas pada tumpang susun (*overlay*) garis batas alur sungai. Garis batas luasan air tahun 2025 garis Biru berada jauh lebih menjorok ke dalam dibandingkan garis batas luasan air tahun 2018 garis Merah. Titik-titik berwarna merah pekat pada peta hasil ekstraksi menunjukkan lokasi persis terjadinya *bottleneck* (leher botol) yang dipicu oleh akumulasi sedimentasi akut yang menghambat laju aliran air. Berikut merupakan ringkasan perbandingan luasan badan Air Sungai Welang yang telah kami rangkum dalam tabel dibawah :

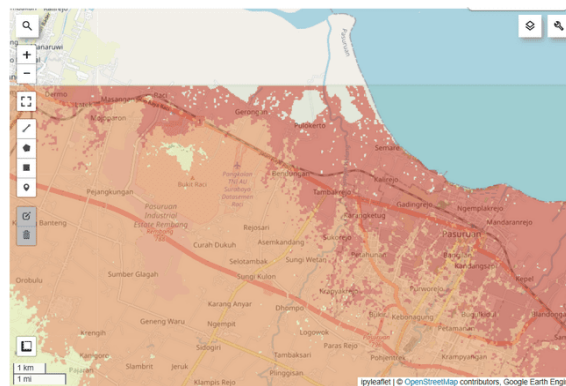
Tabel 2. Perbandingan Luasan Badan Air Sungai Welang (2018 - 2025)

Skala Pengamatan		Luas Permukaan Air 2018 (m ²)	Luas Permukaan Air 2025 (m ²)	Total Area (m ²)	Penyusutan
Kawasan Makro (Batas Studi)		201.930,57	9.981,04	191.949,53	
Segmen Kritis (Alur 5,25 km)		108.119,12	4.923,83	103.195,29	

menunjukkan bahwa pada segmen kritis sepanjang 5,25 km, Sungai Welang telah kehilangan luasan badan air sebesar 103.195,29 m² atau menyusut sekitar 95,4% dari kondisi aslinya di tahun 2018. Secara teknis, angka penyempitan ini didapatkan dari selisih akumulasi piksel air antara dua periode pengamatan. Bukti visual penyempitan ini dikonfirmasi melalui Gambar 3, di mana garis Biru (batas aliran 2025) terlihat sangat mengecil dan berada jauh di dalam garis Merah (batas aliran 2018). Titik-titik merah pekat yang muncul secara sporadis di sepanjang alur menandakan lokasi *bottleneck* di mana lebar sungai telah mencapai titik minimum akibat sedimentasi masif.

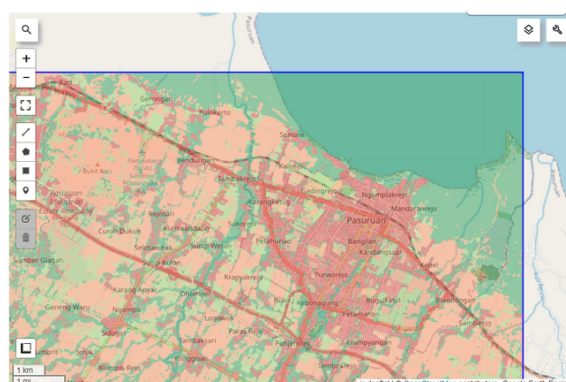
3.2 Analisis Kerentanan Topografi dan Okupansi Lahan

Kerentanan banjir bandang di segmen kritis Sungai Welang tidak hanya bersifat hidrologis akibat penyempitan alur, melainkan juga sangat dipengaruhi oleh variabel geomorfologi dan intensitas aktivitas antropogenik.



Gambar 5. Pemetaan dataran rendah dan lereng datar

Berdasarkan pemodelan kerentanan topografi, ditemukan bahwa wilayah studi didominasi oleh zona rawan banjir yang divisualisasikan dengan gradasi warna merah. Area merah ini merepresentasikan kombinasi antara elevasi dataran rendah dan tingkat kelerengan yang sangat datar. Secara teknis, karakteristik topografi seperti ini menyebabkan aliran air yang meluap dari titik *bottleneck* kehilangan energi dorong gravitasinya, sehingga air cenderung tertahan dan menciptakan genangan luas di wilayah tersebut.



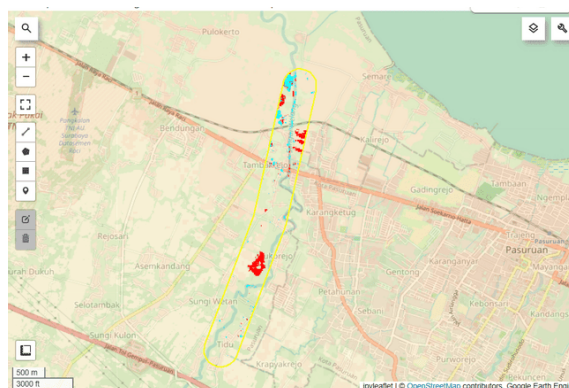
Gambar 6. Pemetaan pemukiman padat penduduk

Kondisi kerentanan fisik tersebut diperparah oleh pola penggunaan lahan yang tidak sesuai dengan peruntukan sempadan sungai. Hasil deteksi risiko okupansi lahan menunjukkan adanya konsentrasi area berwarna merah tebal yang sangat masif di sepanjang bibir sungai sepanjang 5,25 km tersebut. Area merah tebal ini mengidentifikasi pemukiman padat penduduk yang menduduki kawasan lindung sungai.

Integrasi antara kondisi topografi yang landai dan tingginya densitas bangunan di bantaran sungai menciptakan skenario risiko bencana yang sangat fatal (*high risk*). Keberadaan bangunan permanen di atas zona topografi rendah ini tidak hanya mengancam keselamatan penduduk secara langsung saat terjadi banjir bandang, tetapi juga secara fisik menghambat ruang limpas air alami sungai, yang pada gilirannya meningkatkan elevasi muka air banjir ke arah pemukiman di sekitarnya.

3.3 Sintesis Zona Risiko Bencana dan Implikasi Mitigasi

Tahap akhir dari penelitian ini adalah pengintegrasian seluruh variabel fisik dan antropogenik menjadi Peta Zona Risiko Bencana. Peta ini dihasilkan melalui proses tumpang susun (*overlay*) antara data penyempitan alur sungai akibat sedimentasi, kerentanan topografi, dan densitas okupansi lahan. Melalui algoritma *Cloud Computing*, setiap piksel pada koridor analisis sepanjang 5,25 km diberikan bobot risiko dengan skala 1 hingga 5, yang divisualisasikan melalui gradasi warna dari hijau (risiko rendah) hingga merah pekat (risiko sangat tinggi).



Gambar 7. Pemetaan area evakuasi prioritas

Berdasarkan visualisasi pada Gambar 7, aliran Sungai Welang tahun 2025 dipetakan dengan warna Biru Neon untuk memberikan kontras tajam terhadap titik-titik penyempitan kritis (*bottleneck*) yang ditandai dengan warna Merah Terang. Batas koridor analisis ditunjukkan oleh garis Kuning, yang mempertegas ruang lingkup pemodelan risiko. Temuan spasial menunjukkan bahwa zona dengan risiko tertinggi (merah pekat) terkonsentrasi pada lokasi di mana alur sungai mengalami penyempitan ekstrem dan berbatasan langsung dengan pemukiman padat di dataran rendah. Pola ini mengonfirmasi bahwa penyempitan alur sungai sebesar 103.195,29 m² di segmen kritis ini menjadi pemicu utama meningkatnya eksposur bencana bagi penduduk sekitar.

Secara praktis, Peta Zona Risiko Bencana Final ini dirancang sebagai instrumen mitigasi yang aplikatif bagi Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) dan pemerintah daerah setempat melalui dua pendekatan utama. Dari sisi mitigasi struktural, data lokasi *bottleneck* yang ditandai dengan warna merah terang memberikan panduan presisi bagi otoritas terkait untuk memprioritaskan rekayasa teknis, seperti normalisasi sungai melalui pengerukan

sedimen atau pembangunan tanggul pada titik-titik penyempitan spesifik sepanjang 5,25 km tersebut. Sementara itu, pada aspek mitigasi non-struktural, zonasi risiko ini menjadi dasar dalam penentuan jalur evakuasi prioritas dan penataan kembali ruang sempadan sungai. Wilayah yang berada dalam zona merah pekat harus diprioritaskan sebagai titik pemasangan sistem peringatan dini (*Early Warning System*) dan pelaksanaan simulasi bencana rutin. Pemanfaatan data satelit Sentinel-2 dan pengolahan berbasis *cloud* terbukti mampu menghasilkan informasi geospasial yang akurat dan efisien untuk mendukung kebijakan pengurangan risiko bencana yang tepat sasaran di wilayah Sungai Welang.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa melalui rangkaian tahapan sistematis yang melibatkan akuisisi citra satelit Sentinel-2 multi-temporal periode 2018–2025 dan pemrosesan pada platform komputasi awan *Google Earth Engine*, dinamika penyempitan alur Sungai Welang dapat diidentifikasi secara presisi. Metodologi ekstraksi badan air dengan fokus perhitungan pada algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) dan penerapan nilai ambang batas (*threshold*) di atas nol terbukti efektif dalam memisahkan fitur perairan dari gangguan pantulan spektral objek daratan di sekitarnya. Temuan menunjukkan terjadinya degradasi morfologi sungai yang sangat masif pada segmen kritis sepanjang 5,25 km, di mana luas permukaan air menyusut sekitar 95,4%, dari 108.119,12 m² pada tahun 2018 menjadi hanya 4.923,83 m² pada tahun 2025. Fakta numerik ini mengonfirmasi keberadaan titik-titik penyempitan (*bottleneck*) akibat akumulasi sedimentasi akut yang menurunkan kapasitas tampung hidrolis sungai. Pengintegrasian data penyempitan tersebut dengan variabel topografi dataran rendah serta tingginya kepadatan permukiman di sempadan sungai menghasilkan Peta Zona Risiko Bencana yang akurat. Hasil akhir penelitian secara logis membuktikan bahwa wilayah dengan tingkat kerentanan tertinggi terkonsentrasi tepat di lokasi aliran yang menyempit dan bersinggungan langsung dengan permukiman warga, sehingga pemetaan ini valid digunakan sebagai instrumen pendukung keputusan bagi otoritas terkait.

4.2 Saran

Berdasarkan temuan yang diperoleh, disarankan kepada pemerintah daerah dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) untuk mengimplementasikan Peta Zona Risiko Bencana ini sebagai referensi dalam pengambilan keputusan penanggulangan banjir. Tindakan mitigasi secara fisik seperti pengerukan sedimen secara berkala dan penguatan tanggul penahan air perlu diprioritaskan pada lokasi *bottleneck* yang telah teridentifikasi secara spasial. Sementara itu, untuk manajemen risiko keselamatan warga, data ini dapat dijadikan panduan objektif dalam merancang jalur evakuasi darurat, menertibkan pemanfaatan lahan di kawasan lindung sungai, serta menentukan titik strategis pemasangan sistem peringatan dini banjir (*early warning system*). Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan agar mengintegrasikan analisis satelit ini dengan data sensor lapangan secara *real-time* berbasis teknologi *Internet of Things* (IoT) serta penggunaan citra dengan resolusi lebih tinggi untuk memetakan dampak kerusakan infrastruktur secara lebih mendetail.

5. DAFTAR RUJUKAN

- [1] D. Fitriani, E. Suhartanto, and U. Andawayanti, “Studi Pemetaan Daerah Rawan Banjir

Berbasis Sistem Informasi Geografis Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Pada DAS Welang Flood Prone Mapping Based on Geographical Information System for Mitigation in Welang Watershed,” vol. 04, no. 02, pp. 1323–1337, 2024.

- [2] D. K. dan I. P. J. Timur, “Sungai Welang Terus Jadi Perhatian Pemprov Jatim,” *Jatim Newsroom*. Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://kominfo.jatimprov.go.id/berita/sungai-welang-terus-jadi-perhatian-pemprov-jatim>
- [3] M. Iqbal, S. Zuhri, and D. Sisinggih, “Analisis Angkutan Sedimen Sungai Welang Pasuruan Menggunakan Aplikasi HEC-RAS,” vol. 3, no. 1, pp. 57–66, 2022.
- [4] L. Z. Sholihah *et al.*, “Envirous,” vol. 5, no. 2, 2025.
- [5] P. I. Lingkungan and U. Brawijaya, “INVENTARISASI SUMBER AIR DAN ANAK SUNGAI DI DAS WELANG INVENTORY OF WATER SPRING AND STREAM IN WELANG WATERSHED Rony Irawanto,” pp. 605–616, 2021.
- [6] P. Teknologi, R. Risiko, B. Ptrrb, K. Tpsa, and B. Pengkajian, “DISRUPTIVE TECHNOLOGY THROUGH SATELLITE IMAGERY BIG DATA IN DISASTER RISK REDUCTION : OPPORTUNITY AND CHALLENGE DISRUPSI TEKNOLOGI MELALUI BIG DATA CITRA SATELIT DALAM PENGURANGAN RISIKO BENCANA : PELUANG DAN,” vol. 14, no. 2, 2019.
- [7] R. Yunida and U. Lambung, “1 , 1 , 1,” vol. 7, 2023.
- [8] S. Irwan Nurdiansyah, S. Helena, and dan Warsidah Laboratorium Jurusan Ilmu Kelautan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, “Utilization of Landsat 8/ETM+ and Google Earth Engine Images for Coastal Identification in Sungai Nibung Village, Kubu Raya Regency, West Kalimantan,” *Jurnal Ilmiah Platax*, vol. 12, no. 1, p. 2023, doi: 10.35800/jip.v10i2.52191.
- [9] E. Curve *et al.*, “Jurnal Riset Ilmiah,” vol. 2, no. 8, pp. 3966–3978, 2025.
- [10] S. Amalia and A. I. Benardi, “Jambura Geoscience Review,” vol. 8, no. 1, pp. 94–107, 2026, doi: 10.37905/jgeosrev.v8i1.35670.