

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Peningkatan krisis iklim global telah menempatkan bencana hidrometeorologi sebagai ancaman utama bagi stabilitas ekonomi dan keselamatan jiwa, di mana berdasarkan data terbaru (UNDRR, 2025), banjir kini mendominasi profil potensi bencana dunia dengan kontribusi mencapai 35–40% dari seluruh bencana terkait cuaca serta menyebabkan 45% dari total kematian akibat bencana global dalam lima dekade terakhir. Fenomena ini mengalami percepatan yang mengkhawatirkan dengan lonjakan frekuensi sebesar 134% sejak tahun 2000, yang berbanding lurus dengan peningkatan populasi terpapar hingga mencapai 35,1 juta orang pada tahun 2020 (UNDRR, 2025), khususnya di wilayah Asia yang kini menjadi episentrum krisis dengan dampak destruktif tertinggi.

Secara ekonomi, banjir merupakan bencana paling merugikan dengan estimasi Kerugian Tahunan Rata-rata (*Annual Average Losses*) mencapai USD 388,4 miliar. Angka ini merupakan nilai kerugian yang diprediksi terjadi setiap tahunnya (berdasarkan analisis tren data global 1970–2019) dan jauh melampaui kerugian akibat siklon tropis. Akibat kerusakan infrastruktur yang masif, beban ekonomi ini diproyeksikan akan terus membengkak hingga mencapai USD 439 miliar per tahun pada tahun 2050 (UNDRR, 2025).

Meskipun data global memberikan gambaran besarnya ancaman ekonomi, mitigasi yang efektif memerlukan pemahaman mendalam terhadap dinamika banjir rob. Terdapat urgensi yang signifikan untuk memahami faktor-faktor lokal dalam analisis bencana banjir rob, mengingat setiap wilayah memiliki karakteristik yang unik. Penggunaan parameter yang terlalu umum (*generalized*) sering kali gagal menangkap variabilitas lokal berupa perubahan tata guna lahan di Semarang

(Iskandar et al., 2020; Mada, 2023), kontras dengan di Jepara yang dipengaruhi abrasi pantai dan konversi kawasan pesisir menjadi tambak (Windarto et al., 2025), juga Demak yang dipengaruhi kenaikan muka air laut dan lemahnya perlindungan pesisir di kawasan Sayung (Sutrisno et al., 2025; Abdullah et al., 2023).

Untuk meminimalisir dampak masif yang secara timpang menghantam masyarakat pesisir dan negara berkembang, dunia internasional berfokus mengembangkan model prediktif yang akurat, termasuk pemetaan bahaya banjir (Suppawimut, 2021; Indra and Duraipandian, 2023). Hal ini menuntut adanya pergeseran paradigma melalui penggunaan pendekatan probabilistik sebagai metrik konsisten dalam memandu kebijakan tata guna lahan serta perlindungan aset pembangunan, karena tanpa strategi adaptasi dan pemodelan yang berfokus pada komunitas berpotensi tinggi, siklus bencana ini akan terus menjadi beban permanen yang menghambat kemajuan ekonomi dan kesejahteraan sosial secara global.

Teknik penambangan data (*data mining*) saat ini mendominasi pendekatan prediksi banjir karena keunggulannya dalam memodelkan peristiwa runtun waktu yang kompleks (Damle and Yalcin, 2007; Mat Jan et al., 2020). Mayoritas studi penambangan data dalam prediksi banjir masih terbatas pada wilayah sungai, sedangkan wilayah pesisir yang memiliki tantangan dinamika laut belum banyak dieksplorasi (Hakim et al., 2023).

Penyusunan peta bahaya banjir memerlukan penentuan bobot akurat pada setiap variabel pemicu (Swain et al., 2020). Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) telah menetapkan standar melalui Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) untuk menjamin konsistensi pengukuran nasional (Yuwono et al., 2024). Namun, standardisasi ini cenderung bersifat generik sehingga kurang mampu menangkap variabilitas spasial dan parameter spesifik lokal yang krusial bagi akurasi pemodelan di wilayah pesisir (Skilodimou et al., 2021).

Metode alternatif seperti Proses Hierarki Analitik (*Analytic Hierarchy Process/AHP*) selama ini banyak digunakan karena kemampuannya memberikan pembobotan variabel bahaya secara spesifik melalui justifikasi pakar (Tayyab et al., 2021). Namun, prosedur ini memiliki ketergantungan tinggi pada

penilaian subjektif yang rentan terhadap inkonsistensi logika, sehingga berpotensi menimbulkan bias dan menurunkan akurasi model pada lokasi yang berbeda (Al Kuisi et al., 2024; Vilasan and Kapse, 2022). Di sisi lain, penggunaan kecerdasan buatan seperti Jaringan Saraf Tiruan (JST) mulai masif digunakan karena sifatnya yang *data-driven* dan memiliki akurasi prediktif yang tinggi (Senn et al., 2025). Meski demikian, JST sering dikritik sebagai model yang tertutup (*black box*) karena ketiadaan transparansi mengenai kontribusi eksplisit masing-masing variabel terhadap hasil prediksi (Samek et al., 2019), yang pada akhirnya membatasi perannya dalam pengambilan kebijakan mitigasi bencana.

Penelitian ini hadir untuk mengatasi kesenjangan tersebut dengan menerapkan JST sebagai instrumen pembobotan yang objektif namun tetap transparan. Berbeda dengan AHP yang mengandalkan *Consistency Ratio* (CR) untuk memvalidasi opini pakar (Hakim et al., 2025), objektivitas JST dalam penelitian ini dilakukan melalui pembelajaran pola empiris dari data historis dan divalidasi menggunakan metrik performa seperti Akurasi, *F1-Score*, dan *Recall* terhadap data uji (*out-of-sample*). Transparansi model dicapai dengan mengekstraksi bobot kepentingan fitur (*feature importance*) secara matematis dari nilai absolut koneksi neuron yang telah teroptimasi. Melalui pendekatan ini, subjektivitas manusia dapat direduksi tanpa mengorbankan interpretabilitas model, sehingga menghasilkan pemetaan bahaya banjir yang lebih objektif dan representatif terhadap realitas fisik di wilayah studi.

Prediksi bahaya di daerah pesisir menghadapi tantangan besar akibat sifat fenomena yang kompleks dan multifaktorial. Banjir pesisir atau banjir laut pasang merupakan hasil interaksi non-linear dari berbagai variabel pemicu, mulai dari pasang surut dan gelombang badai (*storm surge*) hingga kenaikan permukaan laut (Chaussard et al., 2013; Déguénon et al., 2024). Metode runtun waktu konvensional seperti Penghalusan Eksponensial (*Exponential Smoothing*) tidak dapat menangani hubungan non-linear antar variabel pemicu banjir pesisir (Mishra and Singh, 2023). Sedangkan, Jaringan Saraf Tiruan (JST) telah terbukti andal sebagai metode non-linear canggih dalam berbagai studi (Rankovic et al., 2021). Penggunaan pendekatan hibrida dianggap lebih adaptif untuk mengatasi keterbatasan metode

konvensional (Bevacqua et al., 2019; Hakim et al., 2023)

1.2 Studi Kasus: Wilayah Pesisir Utara Jawa Tengah (Pantura)

Penelitian difokuskan pada wilayah pesisir utara Jawa Tengah yang meliputi Kota Semarang, Kabupaten Demak, dan Kabupaten Jepara. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik fisik wilayah yang merepresentasikan intensitas bahaya tinggi:

1. **Kota Semarang** sebagai pusat ekonomi menghadapi tantangan pengelolaan aliran air dan perubahan tata guna lahan yang intensif, sehingga memperparah genangan banjir rob di kawasan fungsional.
2. **Kabupaten Demak** merupakan wilayah yang rentan terhadap kenaikan muka air laut dan lemahnya perlindungan pesisir, khususnya di Kecamatan Sayung yang sering terdampak rob menahun dan mengganggu jalur transportasi nasional.
3. **Kabupaten Jepara** memiliki garis pantai panjang dengan ekosistem pesisir yang dinamis, namun mulai tertekan oleh abrasi pantai dan infiltrasi air laut pada lahan produktif, termasuk tambak dan permukiman warga.

Ketiga wilayah ini dipilih karena mewakili tipologi pesisir yang berbeda, namun sama-sama menunjukkan kerentanan tinggi terhadap banjir rob, sehingga relevan untuk dijadikan studi kasus dalam analisis mitigasi berbasis lokal.

1.3 Identifikasi Masalah

Masalah utama dalam penelitian ini diidentifikasi sebagai berikut:

1. Penentuan bobot variabel bahaya banjir menghadapi dilema antara standardisasi nasional (IRBI) yang menjamin konsistensi makro namun cenderung menggeneralisasi parameter unik wilayah pesisir, dengan

kebutuhan presisi lokal yang lebih tinggi. Ketergantungan penuh pada standar nasional berisiko mengabaikan variabel kritis spesifik lokasi, sementara penggunaan metode alternatif seperti AHP untuk menangkap karakteristik lokal justru memiliki ketergantungan tinggi pada penilaian subjektif pakar yang berpotensi menimbulkan bias dan menurunkan akurasi model secara keseluruhan.

2. Metode peramalan runtun waktu konvensional yang bersifat univariat memiliki keterbatasan dalam mengekstraksi pola tersembunyi serta hubungan keterkaitan yang kompleks dari faktor meteorologi dan oseanografi, sehingga diusulkan pendekatan hibrida adaptif yang mengintegrasikan Penghalusan Eksponensial Tripel (*Triple Exponential Smoothing* atau TES) untuk menangkap komponen tren dan musiman dengan Jaringan Saraf Tiruan (JST) untuk memetakan hubungan non-linear multivariat

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dipaparkan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem pembobotan variabel bahaya banjir pesisir yang objektif dan berbasis data menggunakan Jaringan Saraf Tiruan untuk mengatasi keterbatasan standarisasi umum dan subjektivitas pakar?
2. Bagaimana mengembangkan model peramalan hibrida sekuensial yang mengintegrasikan Penghalusan Eksponensial Tripel (TES) dan Jaringan Saraf Tiruan (JST) untuk mengekstraksi pola tersembunyi serta hubungan multivariat yang kompleks dari faktor meteorologi dan oseanografi?

1.5 Maksud dan Tujuan Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk merancang model hibrida berbasis data

multivariat untuk analisis dan prediksi bahaya banjir pesisir yang akurat serta objektif. Tujuan penelitian mencakup:

1. Merancang sistem pembobotan variabel bahaya banjir pesisir yang objektif melalui penerapan Jaringan Saraf Tiruan (JST) yang disertai analisis feature importance untuk menghasilkan parameter bahaya yang spesifik secara lokal dan bebas dari bias subjektivitas pakar.
2. Mengembangkan model peramalan hibrida sekuensial (TES-JST) untuk meningkatkan akurasi estimasi kenaikan permukaan air laut melalui ekstraksi hubungan multivariat non-linear antara faktor meteorologi dan oseanografi

1.6 Kebaruan (*Novelty*)

Penelitian ini memosisikan diri di persimpangan antara pendekatan fisik dan pendekatan prediktif dalam studi banjir. Melalui sintesis literatur dan analisis bibliometrik, teridentifikasi bahwa meskipun pemodelan prediktif berbasis data telah berkembang pesat, terdapat celah metodologis dan spasial yang signifikan. Kebaruan penelitian ini dirumuskan ke dalam empat aspek utama:

1. Integrasi Model Hibrida Sekuensial: Berbeda dengan mayoritas studi yang menggunakan metode tunggal, penelitian ini mengisi kelangkaan literatur mengenai Pemodelan Hibrida yang hanya ditemukan pada 23 artikel. Kebaruan terletak pada arsitektur sekuensial yang menggabungkan Penghalusan Eksponensial Tripel (TES) untuk menangani komponen linier dan musiman, yang kemudian diintegrasikan dengan Jaringan Saraf Tiruan (JST) untuk memetakan hubungan non-linier yang kompleks.
2. Spesialisasi pada Dinamika Banjir Pesisir: Di tengah dominasi kajian banjir sungai, penelitian ini mengalihkan lokus studi ke kawasan pesisir. Kebaruan ini krusial mengingat kompleksitas banjir rob yang melibatkan

interaksi antara variabel atmosferik daratan dan dinamika pasang surut laut yang jarang dieksplorasi secara mendalam dalam klaster hidrologi arus utama.

3. Pendekatan Objektif Berbasis Data: Penelitian ini mengatasi keterbatasan metode pembobotan konvensional yang bersifat subjektif. Dengan memanfaatkan keunggulan pembelajaran mesin, penentuan bobot bahaya banjir dilakukan secara murni berbasis data. Hal ini memberikan alternatif yang lebih objektif dibandingkan metode berbasis pakar seperti AHP, sekaligus meminimalisir bias manusia dalam penilaian bahaya.
4. Sinergi Spasio-Temporal Multivariat: Kebaruan terakhir terletak pada integrasi aspek temporal dari klaster *Time Series* dengan variabel lingkungan multivariat $(u10, v10, d2m, t2m, msl, sp)$. Penggunaan prediktor yang komprehensif ini memungkinkan analisis yang lebih utuh dibandingkan pendekatan univariat tradisional, sehingga mampu menangkap fenomena banjir secara spasial maupun temporal secara simultan.

1.7 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata baik secara teoretis bagi perkembangan ilmu pengetahuan maupun secara praktis bagi para pengambil kebijakan dalam mitigasi bencana pesisir.

1.7.1 Manfaat Teoretis

Secara akademis, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengayaan literatur di bidang pemodelan spasio-temporal dan kebencanaan sebagai berikut:

1. Objektivitas Penilaian Bahaya: Metodologi yang diusulkan memberikan kontribusi pada pengembangan teknik penilaian bobot bahaya secara objektif. Melalui pendekatan berbasis data (*data-driven*), bias manusia

dalam penentuan faktor dominan penyebab banjir dapat direduksi, sehingga dihasilkan model yang lebih presisi sesuai kondisi aktual di lapangan.

2. Inovasi Algoritma Spasio-Temporal: Integrasi Jaringan Saraf Tiruan (JST) dengan teknik Penghalusan Eksponensial (*Exponential Smoothing*) memperkaya literatur mengenai pemodelan hubungan spasio-temporal pada data multivariat. Pendekatan ini memungkinkan penanganan data deret waktu (*time-series*) cuaca yang fluktuatif bersamaan dengan data spasial elevasi untuk menghasilkan prediksi kedalaman banjir yang dinamis.

1.7.2 Manfaat Praktis

Secara aplikatif, penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh pemangku kepentingan sebagai instrumen pendukung keputusan:

1. Fondasi Sistem Peringatan Dini (*Early Warning System*): Model prediksi yang dihasilkan dapat dikembangkan menjadi algoritma utama dalam Sistem Peringatan Dini banjir pesisir yang lebih akurat. Dengan kemampuan memproses parameter seperti tinggi muka air laut (*sea level*) dan curah hujan secara *real-time*, sistem dapat memberikan informasi peringatan dengan durasi waktu tunggu (*lead time*) yang lebih memadai bagi warga.
2. Mitigasi Pesisir yang Spesifik: Hasil analisis memberikan masukan krusial bagi instansi pemerintah, seperti BPBD dan Dinas Pekerjaan Umum, dalam perencanaan mitigasi banjir yang lebih spesifik per wilayah. Data ini memungkinkan identifikasi desa atau kecamatan dengan kerentanan tertinggi berdasarkan elevasi dan kondisi pasang surut, sehingga alokasi sumber daya mitigasi dapat dilakukan secara lebih tepat sasaran.

1.8 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah ditetapkan untuk menjaga fokus penelitian:

1. Wilayah penelitian mencakup Kota Semarang, Kabupaten Demak, dan Kabupaten Jepara.
2. Variabel pemicu bahaya dibatasi pada data fisik berupa Elevasi, Limpasan (dari tutupan lahan), Garis Pantai, ketinggian permukaan air laut.
3. Variabel Cuaca digunakan untuk memprediksi ketinggian permukaan air laut
4. Metode penelitian difokuskan pada JST untuk pembobotan dan model hibrida JST-Penghalusan Eksponensial Tripel untuk prediksi.
5. Analisis dibatasi pada aspek Bahaya (*Hazard*), dan tidak melibatkan komponen kerentanan dan kapasitas.

1.9 Sistematika Penulisan

Laporan disertasi ini disusun dalam lima bab yang saling berkaitan sebagai berikut:

1. BAB I: PENDAHULUAN

Menguraikan urgensi penelitian yang dilatarbelakangi oleh krisis iklim dan ancaman banjir rob. Bab ini mencakup Latar Belakang Masalah, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian (akademis dan praktis), serta Pembatasan Masalah pada wilayah Semarang, Demak, dan Jepara.

2. BAB II: KAJIAN PUSTAKA

Menyajikan tinjauan penelitian terdahulu mengenai prediksi banjir dan landasan teori utama. Bagian ini merinci konsep daerah pesisir, mekanisme banjir rob, serta teori mengenai metode Penghalusan

Eksponensial Tripel (TES) dan Jaringan Saraf Tiruan (JST) sebagai dasar pengembangan model hibrida.

3. **BAB III: METODOLOGI PENELITIAN**

Menjelaskan kerangka alur penelitian, teknik pengumpulan data geofisik (curah hujan, pasang surut), tahapan pengembangan model hibrida TES-JST, hingga metode visualisasi peta bahaya menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG).

4. **BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN**

Memaparkan temuan empiris penelitian yang meliputi hasil pra-pemrosesan data, validasi model JST untuk pembobotan faktor, evaluasi akurasi model hibrida, serta analisis mendalam mengenai karakteristik bahaya banjir yang unik di masing-masing wilayah studi.

5. **BAB V: PENUTUP**

Berisi kesimpulan akhir yang menjawab tujuan penelitian, serta pemberian saran akademis bagi pengembangan model di masa depan dan rekomendasi kebijakan bagi pemangku kepentingan dalam mitigasi bencana pesisir.