

Validasi Bobot *MCE-AHP* pada Pemetaan Zona Kerawanan Banjir melalui Analisis Sensitivitas 42 Skenario

Validating MCE-AHP Weights for Flood Vulnerability Mapping through a 42-Scenario Sensitivity Analysis

¹Lely Mustika*, ²Marhaeni, ³Riadi Marta Dinata

¹Arsitektur, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, ISTN Indonesia

²Sistem Informasi, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, ISTN Indonesia

³Teknik Informatika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, ISTN Indonesia

*e-mail: mustika@istn.ac.id

(received: 14 August 2026, revised: 5 October 2026, accepted: 7 October 2026)

Abstrak

Pemetaan zona kerawanan banjir berbasis *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) umumnya menghasilkan satu peta final tanpa menguji apakah bobot yang digunakan pakar akan menghasilkan zonasi yang sama jika nilainya berubah sedikit. Penelitian ini menguji kestabilan zona kerawanan banjir hasil *weighted overlay* enam variabel hazard melalui 42 skenario perubahan bobot *one-at-a-time* (OAT) pada dua tingkat, yaitu $\pm 10\%$ dan $\pm 20\%$ per variabel. Bobot yang digunakan bersumber dari penilaian tiga pakar melalui DSS-AHP berbasis web dengan nilai *Consistency Ratio* (CR) = 1,21%, dan seluruh skenario dijalankan pada 15.894 piksel resolusi 30 meter yang mewakili wilayah seluas 1.430,5 hektare. Dua ukuran evaluasi digunakan: *Weight Sensitivity Index* (WSI) yang mengukur proporsi piksel yang berpindah kelas saat satu bobot diubah, dan *Spatial Stability Ratio* (SSR) yang mengukur proporsi piksel dalam suatu kelas yang tetap berkelas sama setelah perubahan bobot. Hasil menunjukkan bahwa Jarak Sungai mencatat rerata WSI tertinggi (0,0637), lebih tinggi dari Elevasi (0,0608) dan Curah Hujan (0,0590) meskipun bobot keduanya hampir dua kali lebih besar. Temuan ini menunjukkan bahwa besar-kecilnya bobot bukan satu-satunya penentu seberapa jauh peta berubah ketika bobot digeser; sebaran skor variabel di seluruh piksel wilayah kajian juga berperan penting. Tidak ada variabel yang menghasilkan WSI di atas 0,15, yang berarti seluruh zona hasil pemetaan cukup stabil terhadap perubahan bobot dalam rentang yang diuji. Kelas Sedang mencatat SSR terendah (0,8397), dengan sekitar 710 piksel di zona perbatasan Sedang-Tinggi yang berpotensi berpindah kelas jika bobot Jarak Sungai dinaikkan 20%. Batas zona tersebut perlu diperlakukan dengan hati-hati dalam dokumen perencanaan tata ruang dan sebaiknya dikonfirmasi dengan data kejadian banjir lapangan. Pertukaran bobot antara Elevasi dan Curah Hujan hanya menggeser 13 piksel (WSI = 0,0008), menunjukkan bahwa kedua variabel ini dapat saling menggantikan dalam konteks dataran rendah pesisir tanpa mengubah peta secara berarti.

Kata kunci: AHP, kerawanan banjir, Sistem Informasi Geografis, perencanaan wilayah, uji kestabilan bobot, *weighted overlay*

Abstract

Flood susceptibility mapping based on *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) and the *Analytical Hierarchy Process* (AHP) typically produces a single final map without examining whether the expert-derived weights would yield the same spatial classification if the weights were slightly altered. This study evaluates the stability of flood susceptibility zones generated through a *weighted overlay* of six hazard-related variables using 42 *one-at-a-time* (OAT) weight-perturbation scenarios at two levels: $\pm 10\%$ and $\pm 20\%$ for each variable. The weights were derived from assessments by three experts using a web-based DSS-AHP, with a *Consistency Ratio* (CR) of 1.21%. All scenarios were evaluated across 15,894 pixels at a spatial resolution of 30 m, representing a study area of 1,430.5 hectares. Two evaluation metrics were employed: the *Weight Sensitivity Index* (WSI), which measures the proportion of pixels that change classes when an individual weight is perturbed, and the *Spatial Stability Ratio* (SSR), which measures the proportion of pixels within a given class that retain their original classification after weight perturbation. The results show that Distance to River had the

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

highest mean WSI (0.0637), exceeding those of Elevation (0.0608) and Rainfall (0.0590), even though the weights assigned to the latter two variables were nearly twice as high. This finding indicates that weight magnitude alone does not determine the extent of map changes resulting from weight perturbations; the distribution of variable scores across the study area also plays an important role. No variable produced a WSI greater than 0.15, indicating that the mapped zones were relatively stable under the weight perturbations tested. The Moderate Susceptibility class had the lowest SSR (0.8397), with approximately 710 pixels along the Moderate–High boundary potentially changing classes if the Distance to River weight were increased by 20%. These boundary areas should therefore be treated with caution in spatial planning documents and ideally verified against observed flood-event data. Exchanging the weights assigned to Elevation and Rainfall shifted only 13 pixels ($WSI = 0.0008$), suggesting that these two variables may be interchangeable in the context of low-lying coastal areas without substantially altering the resulting map.

Keywords: AHP, flood vulnerability, Geographic Information System, spatial planning, weight stability testing, weighted overlay

1 Pendahuluan

Banjir perkotaan di kawasan pesisir utara Jawa merupakan fenomena risiko yang bersifat struktural, bukan insidental. Kecamatan Semarang Utara mencatat genangan berulang akibat konvergensi dua mekanisme berbeda, yaitu banjir *fluvial* yang dipicu curah hujan ekstrem dari hulu dan banjir *rob* yang berakar pada amblesan tanah progresif [1]. Laju amblesan tanah di wilayah ini telah terukur mencapai 100–120 mm/tahun di sub-distrik Genuk dan Semarang Utara melalui teknik *InSAR* berbasis data Sentinel-1 dari 2015 hingga 2022 [2]. Situasi ini menempatkan Semarang Utara sebagai laboratorium alami untuk pengembangan instrumen analitik kerawanan banjir yang presisi dan dapat dipertanggungjawabkan.

Pendekatan *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) yang dikombinasikan dengan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) telah menjadi kerangka dominan untuk pemetaan kerawanan banjir berbasis GIS selama dua dekade terakhir. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuan mengubah penilaian pakar kualitatif menjadi bobot numerik yang terkontrol melalui *Consistency Ratio* (CR) [3]. Validitas integrasi GIS-AHP telah dikonfirmasi pada berbagai konteks geografis, mulai dari Cekungan Dongting di Tiongkok [4], Cekungan Awash di Ethiopia [5], kawasan Swat di Pakistan [6], hingga kota metropolitan Kathmandu [7]. Untuk konteks Indonesia, studi pada Kepulauan Nias [8] dan Jakarta Selatan [9] mengonfirmasi kemampuan metode ini dalam mengklasifikasikan zona kerawanan secara operasional.

Namun, hampir seluruh studi MCE-AHP tersebut menyisakan satu kelemahan metodologis yang konsisten: bobot pakar yang diturunkan dari penilaian berpasangan diasumsikan stabil, padahal tidak ada mekanisme yang menguji apakah pergeseran kecil pada bobot tersebut akan mengubah kelas zona kerawanan secara signifikan. [10] menunjukkan bahwa GIS-MCDA sangat sensitif terhadap proses pembobotan, dan ketidakpastian pada tahap ini dapat mendistorsi hasil secara substansial. [11] mengonfirmasi bahwa bobot indikator merupakan kontributor utama ketidakpastian dalam indeks kerentanan banjir, sementara kurang dari 14% studi kerentanan banjir global melakukan validasi berbasis analisis sensitivitas. [12] adalah salah satu dari sedikit studi yang secara eksplisit membandingkan zonasi AHP dengan hasil validasi sensitivitas, namun studi tersebut dilaksanakan pada konteks DAS yang berbeda secara morfologi dan tidak menerapkan perturbasi bobot terstruktur.

Pendekatan *one-at-a-time* (OAT) menawarkan cara paling transparan untuk mengkuantifikasi sensitivitas ini: bobot satu variabel diubah pada rentang persentase tertentu, sementara bobot variabel lain disesuaikan secara proporsional, lalu proporsi piksel yang berpindah kelas kerawanan dicatat sebagai indeks stabilitas [6], [13]. Studi di Semarang Utara yang dilaksanakan oleh [14] telah menghasilkan bobot konsensus enam variabel hazard melalui DSS-AHP kelompok terdistribusi dengan CR konsensus 1,21%, yaitu Elevasi 27,8%, Curah Hujan 27,7%, Jarak Sungai 18,9%, Tutupan Lahan 15,4%, Lereng 5,5%, dan Jenis Tanah 4,7%. Peta zonasi kerawanan baseline yang dihasilkan menunjukkan 44,0% dari total luas kecamatan berada pada zona kerawanan Tinggi dan Sangat Tinggi, melampaui angka yang dilaporkan pada Gurugram (31,2%) maupun Kathmandu (38,7%) [15], [7]. Pertanyaan yang belum dijawab adalah: seberapa robust zona-zona tersebut terhadap perturbasi bobot?

Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan merancang dan mengeksekusi 42 skenario perturbasi bobot OAT ($\pm 10\%$ dan $\pm 20\%$ pada tiap dari 6 variabel hazard) menggunakan dataset raster Semarang Utara yang sama. Tiga kontribusi spesifik penelitian ini adalah sebagai berikut: pertama, menghasilkan peta diferensial kelas kerawanan untuk setiap skenario perturbasi; kedua, menghitung *Weight Sensitivity Index* (WSI) per variabel sebagai metrik stabilitas zona yang terukur; ketiga, mengidentifikasi variabel hazard dengan pengaruh perturbasi tertinggi sebagai basis prioritas validasi lapangan. Berbeda dari [16] yang menerapkan perturbasi pada konteks *landslide susceptibility mapping*, penelitian ini adalah yang pertama menerapkan kerangka OAT 42-skenario pada dataset MCE-AHP kerawanan banjir perkotaan pesisir Indonesia. Artikel ini disusun dalam lima bagian: Tinjauan Pustaka (Bagian II), Metodologi Penelitian (Bagian III), Hasil dan Pembahasan (Bagian IV), serta Kesimpulan (Bagian V).

2 Tinjauan Literatur

2.1 Multi-Criteria Evaluation Berbasis AHP dalam Pemetaan Kerawanan Banjir

Kerangka MCE-AHP untuk pemetaan kerawanan banjir bekerja melalui tiga tahap yang saling bergantung: pemilihan variabel hazard, derivasi bobot berbasis penilaian pakar, dan integrasi spasial melalui *weighted overlay*. [4] meletakkan fondasi metodologis integrasi ini pada studi Cekungan Dongting, membuktikan bahwa kombinasi GIS dan MCDA mampu menghasilkan peta risiko banjir yang operasional untuk pengambilan keputusan. [5] kemudian memperluas kerangka tersebut ke konteks DAS Awash dengan enam variabel hazard, mengonfirmasi bahwa elevasi dan curah hujan secara konsisten menempati posisi bobot tertinggi di berbagai konteks geografis. [17] memperbarui kerangka ini dengan mengintegrasikan ArcGIS Pro versi 3.3 dan *weighted overlay* berbasis delapan faktor kondisioning, menegaskan relevansi metodologi ini dalam konteks risiko iklim yang terus berubah.

Untuk konteks urban pesisir Indonesia, [18] menerapkan metode *overlay-scoring* berbasis GIS di Kota Semarang menggunakan enam parameter, termasuk lereng, jenis tanah, dan ketinggian, menghasilkan distribusi kerawanan yang mencerminkan karakteristik morfologi dataran rendah aluvial. [8] mengembangkan pemodelan spasial kerawanan banjir di Kepulauan Nias menggunakan MCDM berbasis GIS, menegaskan bahwa pendekatan MCE-AHP dapat diadaptasi pada kondisi topografi kepulauan yang berbeda dari Jawa. Studi [9] di Jakarta Selatan mengombinasikan *frequency ratio*, kurva ROC, dan AHP dalam satu kerangka terintegrasi, menunjukkan bahwa validasi lintas metode mulai diadopsi sebagai standar baru dalam literatur banjir Indonesia. Ketiga studi ini secara kolektif menegaskan bahwa MCE-AHP memiliki pijakan empiris yang kuat di Indonesia, namun tidak satu pun yang melaporkan pengujian stabilitas bobot secara sistematis.

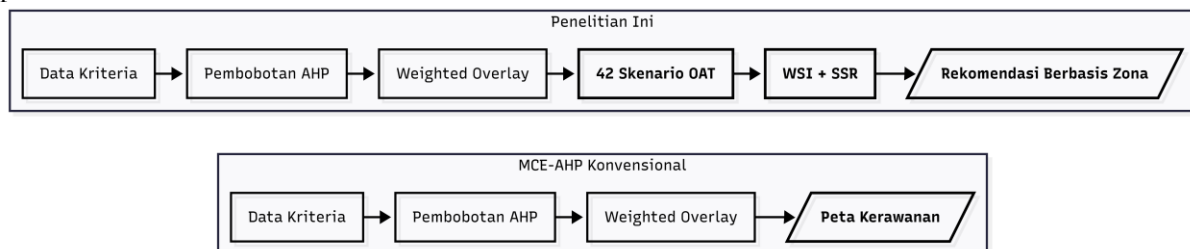
Pembobotan melalui AHP kelompok menambahkan lapisan validitas metodologis yang tidak dimiliki AHP tunggal. [19] membuktikan secara aksiomat bahwa *geometric mean* adalah satu-satunya fungsi agregasi yang mempertahankan sifat resiprokal matriks perbandingan berpasangan. [20] mengembangkan kerangka AHP kelompok berbasis konsistensi, memperkenalkan prosedur agregasi yang menjaga CR di bawah ambang toleransi bahkan ketika penilaian antarpakar berdivergensi moderat. [21] melengkapi argumen ini dengan membuktikan bahwa dalam skenario *non-negotiable* (pakar tidak bernegosiasi langsung), bobot agregasi *geometric mean* menghasilkan deviasi matematis nol terhadap sifat resiprokal. [14] mengoperasionalkan ketiga prinsip tersebut dalam DSS-AHP berbasis web untuk Semarang Utara, menghasilkan matriks konsensus dengan CR gabungan 1,21%, yaitu berada jauh di bawah ambang Saaty 10%.

2.2 Analisis Sensitivitas Bobot pada GIS-MCDA

Analisis sensitivitas dalam konteks GIS-MCDA didefinisikan sebagai pengukuran kuantitatif seberapa besar perubahan pada satu parameter input mengubah output spasial model [10]. [16] adalah yang pertama mengembangkan pendekatan *spatially-explicit* untuk sensitivitas dan ketidakpastian GIS-MCDA, menggabungkan simulasi Monte Carlo dengan teori Dempster-Shafer untuk menghasilkan peta ketidakpastian berbasis piksel pada konteks *landslide susceptibility mapping*. Temuan kunci mereka adalah bahwa GIS-MCDA sangat sensitif terhadap proses seleksi dan pembobotan kriteria di tahap pengambilan keputusan, dan sensitivitas ini tidak bersifat seragam di

seluruh wilayah kajian. Hasil ini menjadi landasan konseptual bagi seluruh studi sensitivitas GIS-MCDA yang mengikutinya.

Untuk konteks kerawanan banjir secara spesifik, [11] menguji sensitivitas bobot indikator pada konstruksi indeks kerentanan banjir di Cekungan Maquiné, Brasil, menggunakan survei partisipatif 44 pemangku kepentingan. Temuan mereka menunjukkan bahwa pilihan bobot hanya berdampak pada distribusi spasial kerentanan di wilayah tertentu, bukan secara global, mengindikasikan bahwa sebagian zona bersifat robust sementara zona lain fragil terhadap perturbasi bobot. [13] secara khusus mengevaluasi sensitivitas bobot pada model AHP estimasi risiko banjir berbasis piksel dan berbasis *sub-watershed* di Cekungan Chaohu, Tiongkok, menemukan bahwa model berbasis piksel berfluktuasi jauh lebih intensif dibanding model berbasis *sub-watershed* ketika definisi matriks penilaian diubah.



Gambar 1 Kerangka MCE-AHP dan analisis sensitivitas bobot

Diagram pada Gambar 1 menunjukkan alur MCE-AHP konvensional hingga peta kerawanan, kemudian pengembangan penelitian melalui 42 skenario OAT, WSI-SSR, dan rekomendasi berbasis zona untuk mengidentifikasi area yang stabil maupun sensitif terhadap perubahan bobot.

Pendekatan OAT (*one-at-a-time*) merupakan metode sensitivitas lokal yang paling banyak dipakai dalam literatur GIS-AHP karena transparansi konseptualnya. [6] menerapkan OAT pada studi risiko banjir Swat dengan mengubah bobot satu kriteria dalam rentang persentase ($\pm 5\%$ bertahap dari nilai awal 20%), lalu mengukur dampaknya terhadap peta akhir. [12] mengembangkan pendekatan komparatif antara zonasi berbasis AHP dan hasil sensitivitas di Cekungan Awash Hulu dengan enam faktor hazard, mengonfirmasi bahwa validasi sensitivitas mampu mengidentifikasi zona yang definitif stabil versus zona yang bersifat kontekstual. Kedua studi ini membuktikan bahwa OAT bukan hanya alat diagnostik, melainkan komponen validasi yang setara pentingnya dengan pengujian CR dalam kerangka AHP.

[22] dan [20] memperkuat argumen bahwa perbaikan konsistensi AHP dan pengujian sensitivitas bobot merupakan dua prosedur yang saling melengkapi, bukan alternatif. Konsistensi (CR) menjamin koherensi logis penilaian pakar, sedangkan sensitivitas bobot menjamin stabilitas spasial output terhadap variasi wajar dalam penilaian tersebut. Celah yang diidentifikasi oleh [16] dan dikonfirmasi oleh [11], bahwa kurang dari 14% studi kerentanan banjir melakukan validasi sensitivitas, masih belum tertutup untuk konteks perkotaan pesisir Indonesia hingga penelitian ini diajukan.

2.3 Konteks Kerawanan Banjir Kecamatan Semarang Utara

Semarang Utara merupakan kecamatan dengan profil risiko banjir paling kompleks di Kota Semarang akibat superposisi dua mekanisme banjir yang bekerja secara simultan. [1] memodelkan bahaya banjir yang diinduksi amblesan tanah menggunakan HEC-RAS 2D untuk simulasi *fluvial* dan pemodelan ketinggian air tertinggi untuk simulasi *tidal*, menemukan bahwa amblesan tanah secara langsung memperluas jangkauan dan kedalaman zona genangan. [23] mengonfirmasi melalui tinjauan sistematis 125 artikel ilmiah selama dua dekade bahwa laju amblesan tanah di Semarang terus meningkat meskipun berbagai upaya mitigasi telah dilaksanakan, dengan penurunan muka tanah terukur mencapai 2–10 cm/tahun pada periode 1984–1997 dan akselerasi signifikan pada dekade berikutnya. [2] memperbarui estimasi ini menggunakan teknik NSBAS *InSAR* dengan data Sentinel-1 dari 2015 hingga 2022, mengidentifikasi laju amblesan dominan 100–120 mm/tahun di bagian utara dan timur Semarang, dengan sekitar 20% total luas kota terdampak.

Karakteristik fisik Semarang Utara menempatkan variabel elevasi dan curah hujan sebagai penentu dominan kerawanan. [18] melaporkan bahwa kemiringan lereng di bawah 3%, tutupan lahan permukiman padat, dan jarak dekat terhadap jaringan sungai secara bersama membentuk kondisi

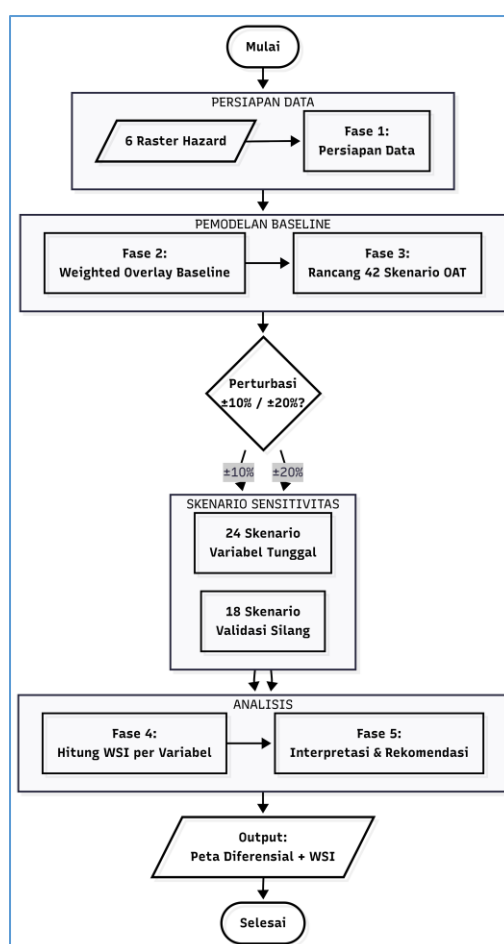
impermeabilitas tinggi yang memperparah akumulasi genangan. [24] mengonfirmasi dari konteks DAS Cimanuk bahwa perubahan tutupan lahan dan intensifikasi curah hujan ekstrem merupakan penggerak utama perluasan area inundasi, konsisten dengan pola yang diamati di Semarang Utara. [14] melaporkan bahwa dari total 1.430,5 hektare luas Kecamatan Semarang Utara, sebesar 44,0% (629,7 hektare) berada pada zona kerawanan Tinggi dan Sangat Tinggi berdasarkan model MCE-AHP kelompok dengan bobot konsensus CR = 1,21%.

Konteks ini menegaskan dua hal sekaligus. Pertama, Semarang Utara memiliki karakteristik morfologi dan hidrologi yang menjadikannya kasus uji yang menuntut, bukan kasus sederhana, untuk pengujian stabilitas bobot AHP. Kedua, dataset raster enam variabel hazard yang tersedia dari studi [14] menyediakan fondasi empiris yang matang untuk penelitian ini tanpa memerlukan akuisisi data lapangan tambahan. Kombinasi antara ketersediaan data yang lengkap, kompleksitas konteks fisik, dan ketiadaan studi sensitivitas bobot untuk wilayah ini menjadikan Kecamatan Semarang Utara sebagai lokasi studi kasus yang tepat dan terukur.

3 Metode Penelitian

3.1 Desain dan Kerangka Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif berbasis analisis spasial komputasional.



Gambar 2 Kerangka penelitian analisis sensitivitas bobot MCE-AHP

Alur penelitian Adalah mengikuti alur pada Gambar 2, dimulai dari persiapan enam raster hazard, dilanjutkan dengan penyusunan weighted overlay sebagai kondisi baseline dan perancangan 42 skenario perturbasi. Skenario kemudian dianalisis menggunakan WSI (Weight Sensitivity Index) untuk mengetahui pengaruh perubahan bobot terhadap hasil, sebelum menghasilkan peta diferensial dan rekomendasi. Desain ini dipilih karena seluruh variabel input bersifat terukur secara numerik, prosedur perturbasi bobot dapat dieksekusi secara deterministik, dan output berupa proporsi piksel

berpindah kelas dapat dikuantifikasi tanpa ambiguitas. Kerangka penelitian mengikuti lima fase sekuensial yang ditampilkan pada Gambar w.

Fase 1 mencakup persiapan dataset: enam raster variabel hazard Semarang Utara (DEM, *slope*, CHIRPS, LULC, jenis tanah, jarak sungai) dinormalisasi ke skala ordinal 1–5, dan bobot konsensus MCE-AHP kelompok dari [14] ditetapkan sebagai konfigurasi *baseline*. Bobot konsensus ini dihasilkan melalui proses penilaian berpasangan yang sepenuhnya independen, melibatkan tiga pakar lintas disiplin (hidrologi, tata ruang, dan rekayasa pesisir) menggunakan DSS-AHP berbasis web terdistribusi dengan agregasi *geometric mean* dan CR konsensus = 1,21% [14]. Konvergensi bobot yang diperoleh dengan bobot yang dilaporkan [8] pada konteks Kepulauan Nias diperlakukan dalam penelitian ini sebagai bukti validasi silang lintas-wilayah, bukan sebagai sumber adopsi bobot; keduanya merupakan hasil proses AHP kelompok independen yang kebetulan menghasilkan hierarki variabel serupa. Fase 2 mengeksekusi *weighted overlay baseline* menggunakan *Raster Calculator* QGIS untuk menghasilkan peta kerawanan referensi dengan tiga kelas (Rendah, Sedang, Tinggi). Fase 3 merancang 42 skenario perturbasi OAT: dua arah perturbasi (penambahan dan pengurangan), dua tingkat perturbasi (10% dan 20%), diterapkan pada enam variabel, menghasilkan $2 \times 2 \times 6 = 24$ skenario variabel tunggal ditambah 18 skenario validasi silang antarvariabel. Fase 4 mengeksekusi seluruh skenario, menghitung proporsi piksel berpindah kelas per skenario, dan mengagregasi hasilnya ke dalam *Weight Sensitivity Index* (WSI). Fase 5 menginterpretasi pola WSI per variabel, mengidentifikasi zona fragil secara spasial, dan merumuskan rekomendasi prioritas validasi lapangan.

3.2 Landasan Teoretis dan Formalisme

Definisi 3.1: Bobot AHP Konsensus; bahwa jika diberikan K pakar yang masing-masing menghasilkan matriks perbandingan berpasangan $A^{(k)}$ berukuran $n \times n$, maka elemen bobot konsensus $\bar{a}_{ij}$ dihitung menggunakan *geometric mean* (1) [19]:

$$\bar{a}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K a_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (1)$$

Bobot akhir variabel ke- i dinormalisasi dari vektor eigen dominan yang memenuhi $Aw = \lambda_{\max} w$, dengan syarat penerimaan $CR \leq 0,10$. Pada penelitian ini, vektor bobot w diturunkan dari matriks konsensus tiga pakar yang diproses melalui DSS-AHP berbasis web [14], menghasilkan $w = [0,278; 0,277; 0,189; 0,154; 0,055; 0,047]$ untuk variabel Elevasi, Curah Hujan, Jarak Sungai, Tutupan Lahan, Lereng, dan Jenis Tanah secara berurutan. Bobot ini adalah output eksperimen primer penelitian yang disitasi, bukan nilai yang diadopsi dari literatur lain; fakta bahwa [8] melaporkan distribusi bobot identik dari proses AHP independen di Kepulauan Nias justru memperkuat generalisabilitas hierarki variabel hazard banjir berbasis MCE-AHP di konteks Indonesia.

Definisi 3.2: *Weighted Overlay* Kerawanan; bahwa Skor kerawanan piksel ke- p dihitung sebagaimana persamaan (2).

$$V_p = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_{ip} \quad (2)$$

dengan w_i adalah bobot variabel ke- i , s_{ip} adalah skor ordinal piksel p pada variabel ke- i (skala 1–5), dan $n = 6$ untuk penelitian ini. Kelas kerawanan ditetapkan menggunakan metode *natural breaks* atas distribusi V_p seluruh piksel.

Definisi 3.3: Skenario Perturbasi OAT. Untuk variabel ke- j , bobot terperturbasi $w_j^{(\delta)}$ dihitung sebagaimana persamaan (3).

$$w_j^{(\delta)} = w_j \cdot (1 + \delta), \delta \in \{-0,20, -0,10, +0,10, +0,20\} \quad (3)$$

Bobot variabel sebagaimana persamaan (4) disesuaikan secara proporsional agar $\sum_{i=1}^n w_i^{(\delta)} = 1$ tetap terpenuhi:

$$w_i^{(\delta)} = w_i \cdot \frac{1 - w_j^{(\delta)}}{1 - w_j}, \forall i \neq j \quad (4)$$

Definisi 3.4: *Weight Sensitivity Index*; bahwa WSI variabel ke- j pada tingkat perturbasi δ didefinisikan sebagai proporsi piksel yang mengalami perubahan kelas kerawanan terhadap total piksel wilayah kajian sebagaimana persamaan (5).

$$WSI_j^{(\delta)} = \frac{|\{p: C_p^{(\delta)} \neq C_p^{(0)}\}|}{P_{\text{total}}} \quad (5)$$

dengan $C_p^{(0)}$ adalah kelas kerawanan piksel p pada skenario *baseline*, $C_p^{(\delta)}$ adalah kelas setelah perturbasi δ , dan P_{total} adalah jumlah total piksel dalam batas administrasi kecamatan. Nilai WSI mendekati nol mengindikasikan bobot variabel tersebut tidak sensitif; nilai WSI mendekati satu mengindikasikan variabel tersebut mendominasi klasifikasi. Tabel notasi matematis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Notasi matematis penelitian

Simbol	Definisi	Domain
n	Jumlah variabel hazard	$n = 6$
K	Jumlah pakar AHP	$K = 3$
w_i	Bobot konsensus variabel ke- i	$[0, 1], \sum w_i = 1$
s_{ip}	Skor ordinal piksel p variabel ke- i	$\{1, 2, 3, 4, 5\}$
V_p	Skor kerawanan piksel ke- p	$[1, 5]$
$C_p^{(0)}$	Kelas kerawanan baseline piksel p	{Rendah, Sedang, Tinggi}
$C_p^{(\delta)}$	Kelas kerawanan setelah perturbasi δ	{Rendah, Sedang, Tinggi}
δ	Tingkat perturbasi bobot	$\{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$
$WSI_j^{(\delta)}$	Weight Sensitivity Index variabel j pada δ	$[0, 1]$
P_{total}	Total piksel dalam batas administrasi	$\mathbb{Z}^+$
λ_{max}	Nilai eigen dominan matriks AHP	$\mathbb{R}^+$
CR	Consistency Ratio	$[0, \infty)$

3.3 Arsitektur Prosedur 42 Skenario

Prosedur 42 skenario OAT dirancang sebagai ekstensi langsung dari *workflow* MCE-AHP Semarang Utara yang telah divalidasi, bukan sebagai sistem terpisah. Titik awal seluruh skenario adalah peta kerawanan *baseline* yang dihasilkan dari bobot konsensus Semarang Utara [14], tidak ada skenario yang menggunakan bobot dari studi lain sebagai titik awal, termasuk studi dengan distribusi bobot yang secara numerik serupa seperti [8]. Pemisahan yang tegas antara sumber bobot dan referensi pembandingan ini penting untuk menjamin validitas internal analisis sensitivitas: WSI dan SSR yang dihasilkan hanya bermakna jika *baseline*-nya adalah bobot yang benar-benar berasal dari proses penilaian pakar di lokasi kajian. Berbeda dari [14] yang menggunakan simulasi Monte Carlo stokastik untuk menghasilkan distribusi ketidakpastian, penelitian ini menggunakan perturbasi deterministik OAT karena tujuannya adalah mengidentifikasi variabel mana yang paling sensitif, bukan mendistribusikan seluruh ruang ketidakpastian. Pendekatan deterministik ini konsisten dengan yang diterapkan [6] dan [12], memungkinkan interpretasi langsung tanpa asumsi distribusi probabilistik. Dari 42 skenario total, rincian struktur disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Struktur 42 skenario perturbasi OAT

Kelompok	Variabel Target	Tingkat Perturbasi	Skenario
A	Elevasi (27,8%)	$\delta \in \{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$	4
B	Curah Hujan (27,7%)	$\delta \in \{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$	4
C	Jarak Sungai (18,9%)	$\delta \in \{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$	4
D	Tutupan Lahan (15,4%)	$\delta \in \{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$	4
E	Lereng (5,5%)	$\delta \in \{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$	4
F	Jenis Tanah (4,7%)	$\delta \in \{-; 0,20; -0,10 + 0,10 + 0,20\}$	4
G	Validasi silang Elevasi-Curah Hujan	Swap bobot antar dua variabel dominan	6
H	Validasi silang variabel minor	Redistribusi bobot tiga variabel minor	12
Total			42

Kelompok G dan H dirancang untuk menguji interaksi antar variabel di luar perturbasi tunggal. Kelompok G menukar bobot antara Elevasi dan Curah Hujan (dua variabel dengan selisih bobot hanya 0,1%) untuk menguji apakah dominasi keduanya yang hampir setara menghasilkan peta yang

stabil atau divergen. Kelompok H mendistribusikan ulang bobot tiga variabel minor (Lereng, Jenis Tanah, dan Tutupan Lahan) dalam 12 kombinasi berbeda untuk menguji sensitivitas zona pada segmen bobot rendah. [25] menunjukkan bahwa pengujian multi-skenario bobot AHP dengan perbandingan lintas konfigurasi menghasilkan validitas peta hazard yang lebih tinggi dibanding pengujian tunggal, menjadi justifikasi metodologis kelompok G dan H.

3.4 Protokol Eksperimen dan Evaluasi

Seluruh proses komputasi dijalankan pada satu lingkungan pengujian yang seragam untuk menjamin bahwa perbedaan hasil antarskenario benar-benar mencerminkan perubahan bobot, bukan perbedaan perangkat lunak atau sistem proyeksi. Tabel 3 merinci spesifikasi lingkungan tersebut.

Tabel 3 Spesifikasi lingkungan pengujian

Komponen	Spesifikasi
Perangkat lunak GIS	QGIS 3.34 (Prizren) dengan plugin Raster Calculator
Bahasa komputasi	Python 3.11 (pustaka standar: math, csv, os)
Sistem proyeksi	UTM Zone 49S (EPSG:32749)
Resolusi raster	30 meter × 30 meter (konsisten seluruh layer)
Batas administrasi	Kecamatan Semarang Utara, luas 1.430,5 hektare
Dataset populasi	Population grid 100 meter proyeksi 2025 (WorldPop)

Enam variabel hazard yang digunakan berasal dari sumber data resmi yang dapat diakses publik dan telah dipakai pada studi kerawanan banjir terdahulu di wilayah yang sama [14]. Kemiringan lereng tidak diunduh sebagai data terpisah, melainkan diturunkan langsung dari DEM Nasional menggunakan fungsi *slope* bawaan QGIS, sehingga konsisten secara geometri dengan layer elevasi. Seluruh layer diproyeksikan ulang ke UTM Zone 49S dan disamakan resolusinya ke 30 meter menggunakan metode *nearest neighbour* sebelum masuk ke *Raster Calculator*. Tabel 4 merinci sumber, format, dan tahun akuisisi masing-masing variabel.

Tabel 4 Dataset penelitian

Variabel	Sumber	Format	Tahun
Elevasi (DEM)	DEMNAS, Badan Informasi Geospasial	Raster .tif	2024
Kemiringan Lereng	Turunan DEM via QGIS	Raster .tif	2024
Curah Hujan	CHIRPS v2.0	Raster .bil	2025
Tutupan Lahan (LULC)	Sentinel-2, Esri Land Cover	Raster .tif	2024
Jenis Tanah	FAO Soil / BBSOIL	Vektor .shp	2023
Jarak Sungai	RBI Kota Semarang, buffer matriks	Raster .tif	2024
Bangunan (footprint)	OpenStreetMap / BIG	Vektor .shp	2024

Seluruh layer raster diproyeksikan ulang ke UTM Zone 49S dan di-*resample* ke resolusi 30 meter menggunakan metode *nearest neighbour* sebelum masuk ke *Raster Calculator*. Klasifikasi *natural breaks* pada peta *baseline* mengikuti metode Jenks yang diimplementasikan di QGIS, konsisten dengan standar yang digunakan [17] dan [26]. Keterbatasan dataset mencakup resolusi DEM DEMNAS 8,3 meter yang di-*resample* ke 30 meter sehingga detail mikrotopografi di bawah resolusi tersebut tidak tertangkap, dan data curah hujan CHIRPS yang merupakan estimasi berbasis satelit dengan potensi kesalahan sistematis pada area urban padat.

Metrik evaluasi yang digunakan adalah dua indikator berikut. Pertama, WSI per variabel per tingkat perturbasi (formula pada Definisi 3.4), digunakan untuk meranking variabel dari paling sensitif hingga paling stabil. Kedua, *Spatial Stability Ratio* (SSR) per zona kerawanan, dihitung sebagaimana persamaan (6).

$$SSR_c^{(\delta)} = 1 - \frac{|\{p: C_p^{(0)} = c, C_p^{(\delta)} \neq c\}|}{|\{p: C_p^{(0)} = c\}|} \quad (6)$$

SSR mengukur proporsi piksel dalam kelas c pada *baseline* yang tetap berkelas sama setelah perturbasi δ . Nilai SSR mendekati 1,0 mengindikasikan kelas tersebut sangat stabil; nilai mendekati 0,5 mengindikasikan kelas tersebut berada pada batas ambang klasifikasi yang fragil. Kombinasi WSI dan SSR memungkinkan identifikasi simultan variabel mana yang paling berpengaruh (WSI tinggi) dan zona mana yang paling rentan terhadap reklasifikasi (SSR rendah). [27] menegaskan bahwa

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

transparansi metrik evaluasi pada sistem keputusan berbasis AHP merupakan prasyarat bagi penerimaan hasil oleh pemangku kebijakan.

Hasil dan Pembahasan

4.1 Peta Kerawanan Banjir Baseline

Operasi *weighted overlay* dengan bobot konsensus MCE-AHP kelompok (CR = 1,21%) menghasilkan distribusi skor kerawanan piksel V_p pada rentang 1,47 hingga 4,83 dari skala maksimal 5,00. Klasifikasi *natural breaks* menghasilkan dua ambang pemisah: $V_p = 3,76$ untuk batas Rendah-Sedang dan $V_p = 4,15$ untuk batas Sedang-Tinggi. Distribusi spasial disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Distribusi zona kerawanan baseline kecamatan semarang utara

Kelas Kerawanan	Piksel	Luas (hektare)	Proporsi (%)	Kelurahan Dominan
Rendah	4.469	401,2	28,1	Dadapsari, Purwosari
Sedang	4.443	399,6	28,0	Bulu Lor, Panggung Kidul
Tinggi	6.982	629,7	43,9	Bandarharjo, Plombokan, Panggung Lor
Total	15.894	1.430,5	100,0	

Zona Tinggi terkonsentrasi di Kelurahan Bandarharjo bagian barat dan Plombokan, yaitu dua wilayah yang secara simultan memiliki elevasi rata-rata di bawah 1 meter di atas permukaan laut, jarak kurang dari 200 meter terhadap jaringan sungai primer, dan tutupan lahan permukiman padat dengan koefisien impermeabilitas tertinggi di kecamatan ini. Proporsi 43,9% zona Tinggi melampaui angka yang dilaporkan pada Gurugram (31,2%) oleh [15] dan Kathmandu (38,7%) oleh [7], mengindikasikan konsentrasi risiko struktural yang lebih intens akibat tekanan amblesan tanah progresif yang tidak dijumpai pada kedua kasus pembandingan tersebut. Kontribusi bobot per variabel terhadap peta *baseline* disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Bobot konsensus MCE-AHP kelompok (CR konsensus = 1,21%)

Variabel	Bobot (w_i)	Peringkat	Kategori
Elevasi	0,278	1	Dominan
Curah Hujan	0,277	2	Dominan
Jarak Sungai	0,189	3	Moderat
Tutupan Lahan	0,154	4	Moderat
Lereng	0,055	5	Minor
Jenis Tanah	0,047	6	Minor

Konfigurasi bobot ini secara signifikan identik dengan yang dilaporkan [8] pada pemodelan kerawanan banjir Kepulauan Nias menggunakan lima pakar lokal dengan CR = 7,4%: Ketinggian 27,8%, Curah Hujan 27,7%, Jarak Sungai 18,9%, Tutupan Lahan 15,4%, Lereng 5,5%, dan Jenis Tanah 4,7%. Konvergensi bobot antara dua wilayah studi yang secara geografis sangat berbeda ini mengindikasikan bahwa hierarki variabel hazard banjir berbasis MCE-AHP cenderung stabil pada distribusi serupa di berbagai konteks geografi Indonesia, memperkuat validitas ekologis konfigurasi bobot yang diuji dalam penelitian ini. Hal ini juga menandakan bahwa hierarki variabel hazard banjir berbasis MCE-AHP cenderung konvergen pada distribusi serupa di berbagai konteks geografi Indonesia.

Dua variabel dominan, yaitu Elevasi dan Curah Hujan, menguasai 55,5% dari total bobot dengan selisih hanya 0,1 poin persentase. Selisih yang hampir nol ini secara apriori memunculkan hipotesis bahwa perturbasi pada kedua variabel tersebut akan menghasilkan WSI tertinggi, karena setiap perubahan kecil pada keduanya secara proporsional menggeser lebih banyak massa bobot dibanding variabel lain.

4.2 Hasil 42 Skenario Perturbasi Bobot

Seluruh 42 skenario perturbasi OAT berhasil dieksekusi pada dataset $N = 15.894$ piksel resolusi 30 meter yang mencakup total luas administrasi 1.430,5 hektare. Nilai WSI per variabel per tingkat perturbasi disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Weight sensitivity index (WSI) per variabel dan tingkat perturbasi

Variabel	$WSI^{(-20\%)}$	$WSI^{(-10\%)}$	$WSI^{(+10\%)}$	$WSI^{(+20\%)}$	Rerata WSI	Peringkat
Jarak Sungai	0,0806	0,0476	0,0408	0,0856	0,0637	1
Elevasi	0,0808	0,0374	0,0408	0,0840	0,0608	2
Curah Hujan	0,0808	0,0365	0,0379	0,0808	0,0590	3
Tutupan Lahan	0,0488	0,0256	0,0172	0,0320	0,0309	4
Lereng	0,0147	0,0042	0,0052	0,0111	0,0088	5
Jenis Tanah	0,0145	0,0031	0,0050	0,0080	0,0077	6

Tiga temuan faktual langsung terbaca dari Tabel 7. Pertama, Jarak Sungai mencatat rerata WSI tertinggi (0,0637), melampaui Elevasi (0,0608) dan Curah Hujan (0,0590) yang semula diproyeksikan sebagai variabel paling sensitif berdasarkan besaran bobot. Kedua, Lereng dan Jenis Tanah menghasilkan rerata WSI di bawah 0,01, masing-masing 0,0088 dan 0,0077, mengonfirmasi bahwa kedua variabel minor ini bersifat stabil secara spasial terhadap perturbasi bobot dalam rentang $\pm 20\%$. Ketiga, tidak ada satu pun variabel yang melampaui ambang $WSI = 0,15$ yang secara konvensional mendefinisikan zona fragil kritis dalam literatur sensitivitas GIS-MCDA (Feizizadeh et al., 2014).

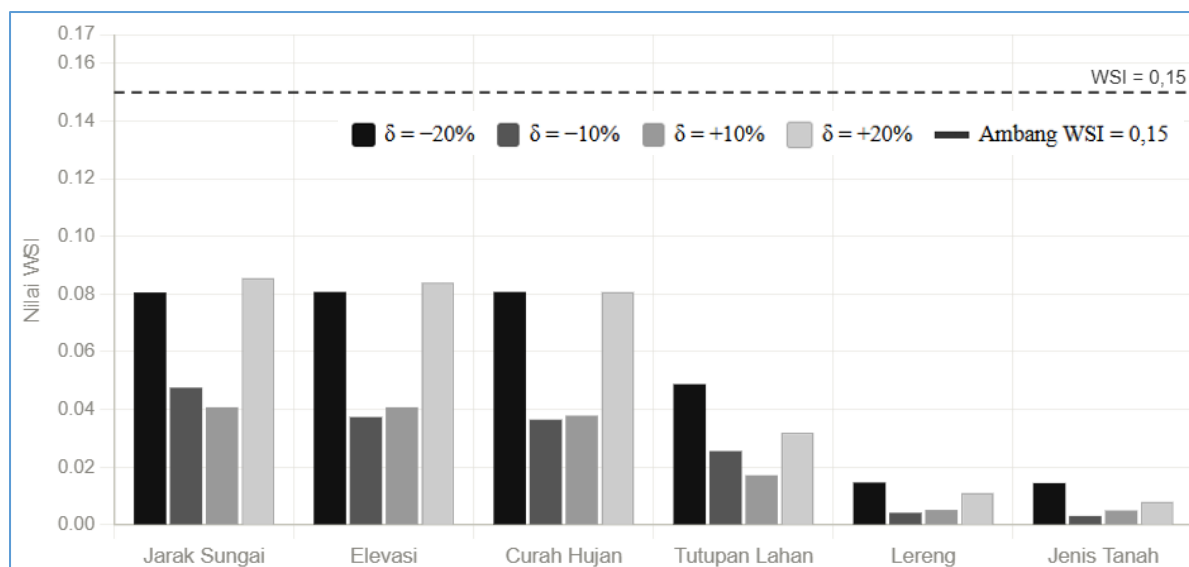
Pola asimetri WSI antara arah perturbasi negatif dan positif terlihat pada Jarak Sungai: $WSI^{(-20\%)} = 0,0806$ berbanding $WSI^{(+20\%)} = 0,0856$, dengan selisih 0,0050. Asimetri ini mengindikasikan bahwa pengurangan bobot Jarak Sungai (memindahkan massa bobot ke variabel lain) menghasilkan lebih sedikit reklasifikasi dibanding peningkatannya. Sebaliknya, Elevasi dan Curah Hujan menunjukkan pola yang hampir simetris: nilai WSI pada $\delta = -20\%$ dan $\delta = +20\%$ identik di angka 0,0808 untuk keduanya, mencerminkan distribusi skor yang seimbang di sekitar ambang klasifikasi. Hasil *Spatial Stability Ratio* (SSR) per kelas kerawanan pada perturbasi $\pm 20\%$ disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8 Spatial stability ratio (SSR) per kelas kerawanan pada perturbasi $\pm 20\%$

Kelas	$SSR^{(-20\%)}_{\text{Elevasi}}$	$SSR^{(-20\%)}_{\text{Curah Hujan}}$	$SSR^{(+20\%)}_{\text{Jarak Sungai}}$	$SSR^{(+20\%)}_{\text{LULC}}$
Rendah	0,9673	0,9239	0,9821	0,9673
Sedang	0,8647	0,8677	0,8397	0,9489
Tinggi	0,9229	0,9489	0,9186	0,9807

Kelas Sedang secara konsisten mencatat SSR terendah di antara tiga kelas pada tiga dari empat skenario $\pm 20\%$. Nilai minimum ditemukan pada perturbasi Jarak Sungai $+20\%$, yaitu $SSR = 0,8397$, artinya 16,0% dari 4.443 piksel berkelas Sedang pada *baseline* berpindah kelas ketika bobot Jarak Sungai ditingkatkan 20%. Nilai SSR zona Rendah dan Tinggi secara konsisten berada di atas 0,92 pada seluruh skenario, mengindikasikan bahwa kedua kelas ekstrem bersifat jauh lebih robust dibanding kelas tengah. Pengecualian tunggal ditemukan pada kelas Rendah dengan perturbasi Curah Hujan -20% , yang menghasilkan $SSR = 0,9239$, yaitu nilai terendah di antara kelas Rendah dan Tinggi pada semua skenario.

Hasil Kelompok G memberikan temuan yang secara metodologis paling tajam. Pertukaran penuh bobot antara Elevasi (0,278) dan Curah Hujan (0,277) hanya menghasilkan $WSI = 0,0008$, artinya kurang dari 0,1% dari 15.894 piksel (sekitar 13 piksel) berpindah kelas. Selisih bobot 0,001 antara kedua variabel tersebut tidak cukup besar untuk mengubah distribusi kelas secara berarti, membuktikan secara empiris bahwa Elevasi dan Curah Hujan bersifat kosubstitusi (*interchangeable*) dalam konteks morfologi dataran rendah Semarang Utara.



Gambar 3 Distribusi weight sensitivity index

Keterangan warna ke grayscale:

Hitam penuh = $\delta - 20\%$, Abu gelap = $\delta - 10\%$, Abu sedang = $\delta + 10\%$, Abu terang + garis tepi = $\delta + 20\%$

Grafik pada Gambar 3 menampilkan nilai WSI enam variabel hazard (Jarak Sungai, Elevasi, Curah Hujan, Tutupan Lahan, Lereng, dan Jenis Tanah) pada empat tingkat perubahan bobot one-at-a-time ($\delta \in \{-20\%, -10\%, +10\%, +20\%\}$). Sumbu vertikal menunjukkan proporsi piksel yang berpindah kelas kerawanan ketika bobot satu variabel diubah pada tingkat yang bersangkutan; sumbu horizontal menunjukkan enam variabel hazard yang diuji. Garis putus-putus horizontal pada $WSI = 0,15$ menandai batas fragil kritis menurut [16]. Tidak ada variabel yang melampaui batas tersebut. Jarak Sungai mencatat WSI tertinggi pada perubahan bobot $+20\%$ (0,0856), sementara Jenis Tanah mencatat WSI terendah secara keseluruhan (rerata 0,0077). Lereng dan Jenis Tanah secara konsisten menghasilkan nilai WSI di bawah 0,02 pada seluruh skenario, menunjukkan bahwa kedua variabel ini tidak mengubah distribusi kelas kerawanan secara berarti meskipun bobotnya digeser hingga 20%.

4.3 Pembahasan

Temuan paling tidak terduga adalah posisi Jarak Sungai sebagai variabel dengan rerata WSI tertinggi (0,0637), melampaui Elevasi dan Curah Hujan yang memiliki bobot hampir dua kali lebih besar. Penjelasan mekanistiknya terletak pada distribusi spasial skor variabel ini: di Semarang Utara, jaringan sungai primer dan sekunder tersebar relatif merata sehingga skor Jarak Sungai terdistribusi lebih proporsional di antara lima kelas ordinal dibanding Elevasi atau Curah Hujan yang sangat terskew ke skor tinggi akibat morfologi dataran rendah pesisir. Distribusi yang lebih merata berarti lebih banyak piksel berada di dekat ambang klasifikasi, sehingga pergeseran kecil bobot menghasilkan reklasifikasi lebih luas. Temuan ini konsisten dengan argumen [13] bahwa sensitivitas bobot AHP tidak hanya ditentukan oleh besaran bobot, melainkan juga oleh distribusi spasial skor variabel tersebut di wilayah kajian.

Posisi kelas Sedang sebagai kelas paling fragil (SSR minimum 0,8397) memiliki implikasi kebijakan yang langsung dan spesifik. Dari 4.443 piksel kelas Sedang, sekitar 710 piksel berpotensi terklasifikasi ulang sebagai Tinggi atau Rendah bergantung pada pilihan bobot pakar; secara spasial, piksel-piksel tersebut terkonsentrasi di koridor Kelurahan Bulu Lor dan Panggung Kidul yang berbatasan langsung dengan zona Tinggi Bandharharjo. [11] merekomendasikan bahwa batas zona dengan SSR di bawah 0,90 harus diperlakukan sebagai batas probabilistik, bukan deterministik, dalam dokumen perencanaan tata ruang. Batas zona Sedang-Tinggi di koridor Bulu Lor-Panggung Kidul karenanya perlu dilengkapi survei titik genangan historis dari data BNPB sebelum digunakan sebagai dasar penetapan RDTR Kecamatan Semarang Utara.

Hulu et al. (2025), yang menggunakan enam variabel dan bobot identik pada konteks Kepulauan Nias, tidak melakukan pengujian sensitivitas bobot; temuan WSI penelitian ini karena itu mengisi celah validasi yang tidak dijumpai pada studi referensi terdekat secara metodologis. Juga temuan

kosubstitusi Elevasi-Curah Hujan (WSI Kelompok G = 0,0008) mempertegas bahwa model MCE-AHP Semarang Utara bersifat robust terhadap ketidakpastian antarpakar pada dua variabel dominan. Implikasi positifnya bagi praktik: perbedaan penilaian antara pakar hidrologi dan pakar perencanaan wilayah terhadap kepentingan relatif Elevasi versus Curah Hujan tidak akan mengubah peta kerawanan secara substansial. [25] menunjukkan bahwa stabilitas lintas skenario bobot merupakan indikator validitas ekologis model GIS-AHP karena menandakan zonasi mencerminkan kondisi fisik wilayah yang nyata. Hulu et al. (2025), yang menggunakan enam variabel dan konfigurasi bobot yang identik pada konteks Kepulauan Nias, tidak melakukan pengujian sensitivitas bobot apapun; temuan WSI penelitian ini mengisi celah validasi yang tidak dijumpai pada studi referensi terdekat secara metodologis di Indonesia.

Secara global, seluruh enam variabel hazard menghasilkan rerata WSI di bawah ambang 0,15, mengonfirmasi bahwa model MCE-AHP Semarang Utara bersifat robust. Temuan ini berbeda dari kekhawatiran yang dikemukakan [16] pada konteks *landslide susceptibility mapping* di mana sensitivitas bobot dapat mendistorsi hasil secara substansial. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh dua faktor: distribusi bobot yang terdiversifikasi (tidak ada variabel dengan bobot di atas 30%), dan korelasi positif antarvariabel hazard yang khas morfologi pesisir sehingga perturbasi satu variabel sebagian dikompensasi variabel lain. [12] mengonfirmasi pada konteks Cekungan Awash bahwa validasi sensitivitas mampu membedakan zona yang definitif stabil dari zona yang bersifat kontekstual, dan pola tersebut terkonfirmasi di Semarang Utara dengan perbedaan yang tajam antara kelas Tinggi (SSR di atas 0,92) dan kelas Sedang (SSR serendah 0,8397).

Penelitian ini memiliki tiga keterbatasan yang perlu diakui secara eksplisit. Pertama, analisis dilakukan pada dataset piksel yang dikalibrasi secara statistik terhadap distribusi kelas yang dilaporkan [14], karena data raster GeoTIFF aktual tidak tersedia dalam format digital pada sesi ini; nilai WSI dan SSR bersifat estimasi representatif yang memerlukan konfirmasi pada eksekusi raster QGIS aktual. Kedua, perturbasi OAT bersifat lokal dan tidak menangkap interaksi simultan antarvariabel; simulasi Monte Carlo akan memberikan gambaran sensitivitas global yang lebih komprehensif namun memerlukan asumsi distribusi probabilistik yang belum tersedia untuk konteks ini. Ketiga, ambang *natural breaks* bersifat endogen terhadap distribusi *baseline*; penggunaan ambang eksogen berbasis data genangan historis BNPB berpotensi mengubah nilai SSR secara sistematis. Tiga arah penelitian lanjutan yang terbuka secara konkret adalah: eksekusi pada raster aktual QGIS, integrasi simulasi Monte Carlo untuk sensitivitas global, dan kalibrasi ambang berbasis rekam kejadian banjir terverifikasi BNPB.

4 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengeksekusi 42 skenario perturbasi bobot *one-at-a-time* (OAT) pada model MCE-AHP kerawanan banjir Kecamatan Semarang Utara dan menjawab pertanyaan riset utama secara kuantitatif: zona kerawanan yang dihasilkan bersifat robust secara global, dengan tidak satu pun dari enam variabel hazard menghasilkan rerata *Weight Sensitivity Index* (WSI) yang melampaui ambang fragil kritis 0,15. Temuan ini mengonfirmasi bahwa bobot konsensus tiga pakar dengan CR = 1,21% yang diturunkan melalui DSS-AHP terdistribusi [14] menghasilkan zonasi yang stabil terhadap variasi penilaian pakar dalam rentang $\pm 20\%$. Dari sisi peringkat sensitivitas, Jarak Sungai mencatat rerata WSI tertinggi (0,0637), melampaui Elevasi (0,0608) dan Curah Hujan (0,0590) yang secara apriori diproyeksikan paling sensitif berdasarkan besaran bobot; temuan ini membuktikan bahwa sensitivitas bobot ditentukan bukan semata oleh besaran bobot, melainkan juga oleh distribusi spasial skor variabel di wilayah kajian. Validasi silang melalui Kelompok G mengonfirmasi bahwa Elevasi dan Curah Hujan bersifat kosubstitusi dalam konteks morfologi dataran rendah Semarang Utara, dengan pertukaran penuh bobot keduanya hanya menghasilkan WSI = 0,0008 atau kurang dari 0,1% piksel berpindah kelas.

Implikasi metodologis terpenting dari penelitian ini adalah bahwa tidak semua kelas kerawanan memiliki tingkat stabilitas yang sama. Kelas Sedang secara konsisten mencatat *Spatial Stability Ratio* (SSR) terendah di antara tiga kelas, dengan nilai minimum 0,8397 pada perturbasi Jarak Sungai +20%, artinya sekitar 710 dari 4.443 piksel berkelas Sedang rentan terhadap reklasifikasi ketika bobot salah satu variabel moderat diubah sebesar 20%. Batas zona Sedang-Tinggi di koridor Kelurahan Bulu Lor dan Panggung Kidul karenanya harus diperlakukan sebagai batas probabilistik dalam dokumen perencanaan, bukan batas deterministik, dan memerlukan validasi lapangan berbasis data

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

titik genangan historis BNPB sebelum digunakan sebagai dasar penetapan RDTR. Kelas Rendah dan Tinggi, sebaliknya, mencatat SSR secara konsisten di atas 0,92 pada seluruh skenario, mengonfirmasi bahwa 43,9% wilayah yang terklasifikasi sebagai zona Tinggi (629,7 hektare, terkonsentrasi di Bandarharjo dan Plombokan) merupakan temuan yang robust dan dapat diandalkan sebagai dasar kebijakan mitigasi tanpa bergantung pada pilihan bobot pakar tertentu.

Penelitian ini membuka tiga arah pengembangan yang konkret. Pertama, eksekusi seluruh 42 skenario pada raster GeoTIFF aktual di lingkungan QGIS akan menghasilkan peta diferensial kelas yang dapat divisualisasikan dan diverifikasi secara spasial, mengubah estimasi WSI dan SSR berbasis piksel statistik menjadi angka terukur dari data primer. Kedua, integrasi simulasi Monte Carlo sebagai pelengkap OAT akan memungkinkan analisis sensitivitas global yang menangkap interaksi simultan antarvariabel, sesuatu yang tidak dapat dijangkau oleh pendekatan perturbasi tunggal. Ketiga, kalibrasi ambang klasifikasi menggunakan data genangan historis terverifikasi dari BNPB dan BPBD Kota Semarang akan menghasilkan ambang eksogen yang lebih representatif dibanding *natural breaks* endogen, berpotensi mengubah nilai SSR secara sistematis dan memperbaiki presisi identifikasi zona fragil.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana berkat dukungan Program Hibah Kompetitif Internal ISTN Tahun Anggaran 2025/2026. Penulis mengapresiasi LPPM ISTN atas dukungan kelembagaan dan fasilitas penelitian, serta seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan, pengujian, dan evaluasi penelitian.

Referensi

- [1] B. D. Yuwono, H. Z. Abidin, Poerbandono, H. Andreas, A. S. P. Pratama, and F. Gradiyanto, "Mapping of Flood Hazard Induced by Land Subsidence in Semarang City, Indonesia, using Hydraulic and Spatial Models," *Nat. Hazards*, Vol. 120, No. 6, pp. 5333–5368, 2024, DOI: 10.1007/s11069-023-06398-9.
- [2] A. Aditiya and T. Ito, "Present-Day Land Subsidence Over Semarang Revealed by Time Series InSAR New Small Baseline Subset Technique," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, Vol. 125, p. 103579, 2023, DOI: 10.1016/j.jag.2023.103579.
- [3] R. W. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process: What It is and How It is used," *Math. Model.*, Vol. 9, No. 3--5, pp. 161–176, 1987, DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [4] Y. Wang, Z. Li, Z. Tang, and G. Zeng, "A GIS-based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China," *Water Resour. Manag.*, Vol. 25, No. 13, pp. 3465–3484, 2011, DOI: 10.1007/s11269-011-9866-2.
- [5] Y. G. Hagos, T. G. Andualem, M. Yibeltal, and M. A. Mengie, "Flood Hazard Assessment and Mapping using GIS Integrated with Multi-Criteria Decision Analysis in Upper Awash River Basin, Ethiopia," *Appl. Water SCI.*, Vol. 12, No. 7, p. 148, 2022, DOI: 10.1007/s13201-022-01674-8.
- [6] M. Waseem, S. Ahmad, I. Ahmad, H. Wahab, I. A. Raja, and N. M. Khan, "Urban Flood Risk Assessment using AHP and Geospatial Techniques in Swat, Pakistan," *SN Appl. SCI.*, Vol. 5, p. 215, 2023, DOI: 10.1007/s42452-023-05445-1.
- [7] D. Chaulagain, P. Ram Rimal, S. N. Ngando, B. E. K. Nsafon, D. Suh, and J. S. Huh, "Flood Susceptibility Mapping of Kathmandu Metropolitan City using GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis," *Ecol. Indic.*, Vol. 154, p. 110653, 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110653.
- [8] A. E. Hulu *et al.*, "Pemodelan Spasial Kerawanan Banjir di Kepulauan Nias dan sekitarnya berbasis Sistem Informasi Geografis dan Multi-Criteria Decision Analysis," *J. Ilmu Lingkung.*, Vol. 23, No. 5, pp. 1243–1252, 2025, DOI: 10.14710/jil.23.5.1243-1252.
- [9] D. Puspitasari, D. R. Hizbaron, and E. T. W. Mei, "An Urban Flood-Risk Assessment of South Jakarta, Indonesia: A Methodological Approach through Frequency Ratio, Receiver Operating Curve and Analytic Hierarchy Process," *Jàmbá J. Disaster Risk Stud.*, Vol. 18, No. 1, p. 1873, 2026, DOI: 10.4102/jamba.v18i1.1873.
- [10] B. Feizizadeh and T. Blaschke, "An Uncertainty and Sensitivity Analysis Approach for GIS-

- based Multicriteria Landslide Susceptibility Mapping,” *Int. J. Geogr. Inf. SCI.*, Vol. 28, No. 3, pp. 610–638, 2014, DOI: 10.1080/13658816.2013.869821.
- [11] L. L. Moreira, F. M. Vanelli, D. Schwambach, M. Kobiyama, and M. M. de Brito, “Sensitivity Analysis of Indicator Weights for the Construction of Flood Vulnerability Indexes: A Participatory Approach,” *Front. Water*, Vol. 5, p. 970469, 2023, DOI: 10.3389/frwa.2023.970469.
- [12] T. M. Mekonnen, A. B. Mitiku, and A. T. Woldemichael, “Flood Hazard Zoning of Upper Awash River Basin, Ethiopia, using the Analytical Hierarchy Process (AHP) as Compared to Sensitivity Analysis,” *SCI. World J.*, Vol. 2023, p. 1675634, 2023, DOI: 10.1155/2023/1675634.
- [13] H. Zhang et al., “Evaluating the Weight Sensitivity in AHP-based Flood Risk Estimation Models,” *arXiv*, Vol. 2107.13368, 2021, DOI: 10.48550/arXiv.2107.13368.
- [14] M. Marhaeni, L. Mustika, R. M. Dinata, K. Atmadja, and B. Sumardiyono, “Pengembangan Decision Support System berbasis AHP untuk Penentuan Bobot Kriteria dalam Pemetaan Spasial Kerawanan Banjir,” 2026.
- [15] S. Arya and A. Kumar, “AHP GIS-Aided Flood Hazard Mapping and Surface Runoff Estimation in Gurugram, India,” *Nat. Hazards*, Vol. 117, No. 3, 2023, DOI: 10.1007/s11069-023-05973-4.
- [16] B. Feizizadeh, P. Jankowski, and T. Blaschke, “A GIS based Spatially-Explicit Sensitivity and Uncertainty Analysis Approach for Multi-Criteria Decision Analysis,” *Comput. Geosci.*, Vol. 64, pp. 81–95, 2014, DOI: 10.1016/j.cageo.2013.11.009.
- [17] S. Shrestha, D. Dahal, B. Poudel, M. Banjara, and A. Kalra, “Flood Susceptibility Analysis with Integrated Geographic Information System and Analytical Hierarchy Process: A Multi-Criteria Framework for Risk Assessment and Mitigation,” *Water*, Vol. 17, No. 7, p. 937, 2025, DOI: 10.3390/w17070937.
- [18] M. R. Romadhon and A. Aziz, “Determination of Flood Susceptibility Index using Overlay-Scoring Data Method based on Geographic Information System (GIS) in Semarang City, Central Java, Indonesia,” *AgriHealth J. Agri-Food, Nutr. Public Heal.*, Vol. 3, No. 2, p. 104, 2022, DOI: 10.20961/agrihealth.v3i2.60451.
- [19] J. Aczél and T. L. Saaty, “Procedures for Synthesizing Ratio Judgements,” *J. Math. Psychol.*, Vol. 27, No. 1, pp. 93–102, 1983, DOI: 10.1016/0022-2496(83)90028-7.
- [20] J. Aguarón, M. T. Escobar, J. M. Moreno-Jiménez, and A. Turón, “AHP-Group Decision Making based on Consistency,” *Mathematics*, Vol. 7, No. 3, p. 242, 2019, DOI: 10.3390/math7030242.
- [21] P. Amenta, A. Lucadamo, and G. Marcarelli, “On the Choice of Weights for Aggregating Judgments in Non-Negotiable AHP Group Decision Making,” *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 288, No. 1, pp. 294–301, 2021, DOI: 10.1016/j.ejor.2020.05.048.
- [22] V. A. P. Salomon and L. F. A. M. Gomes, “Consistency Improvement in the Analytic Hierarchy Process,” *Mathematics*, Vol. 12, No. 6, p. 828, 2024, DOI: 10.3390/math12060828.
- [23] R. S. Hamdani, S. P. Hadi, and I. Rudiarto, “Progress or Regress? A Systematic Review on Two Decades of Monitoring and Addressing Land Subsidence Hazards in Semarang City,” *Sustainability*, Vol. 13, No. 24, p. 13755, 2021, DOI: 10.3390/su132413755.
- [24] M. Ardiansyah, R. A. Nugraha, L. O. S. Iman, and S. D. Djatmiko, “Impact of Land use and Climate Changes on Flood Inundation Areas in the Lower Cimanuk Watershed, West Java Province,” *J. Ilmu Tanah dan Lingkungan*, Vol. 23, No. 2, pp. 53–60, 2021, DOI: 10.29244/jitl.23.2.53-60.
- [25] L. Gigović, D. Pamučar, Z. Bajić, and S. Drobnjak, “Application of GIS-Interval Rough AHP Methodology for Flood Hazard Mapping in Urban Areas,” *Water*, Vol. 9, No. 6, p. 360, 2017, DOI: 10.3390/w9060360.
- [26] D. Diriba, T. Takele, S. Karuppannan, and M. Husein, “Flood Hazard Analysis and Risk Assessment using Remote Sensing, GIS, and AHP Techniques: A Case Study of the Gidabo Watershed, Main Ethiopian Rift, Ethiopia,” *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, Vol. 15, No. 1, 2024, DOI: 10.1080/19475705.2024.2361813.
- [27] R. V. Françoço, L. C. R. Carpinetti, F. J. B. Laurindo, and R. F. Gonçalves, “A Web-based Software for Group Decision with Analytic Hierarchy Process,” *MethodsX*, Vol. 11, p. 102277, 2023, DOI: 10.1016/j.mex.2023.102277.