

PENGEMBANGAN DECISION SUPPORT SYSTEM BERBASIS AHP UNTUK PENENTUAN BOBOT KRITERIA DALAM PEMETAAN SPASIAL KERAWANAN BANJIR

Marhaeni ¹⁾, Lely Mustika ²⁾, *Riadi Marta Dinata³⁾,
Kurniawan Atmaja⁴⁾, Bandot Sumardiyono⁵⁾

¹⁾ Arsitektur, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi Informasi, ISTN

²⁾ Sistem Informatika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi Informasi, ISTN

³⁾⁵⁾ Teknik Informatika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi Informasi, ISTN

⁴⁾ Matematika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi Informasi, ISTN

marhaeni@istn.ac.id, riadimrt@gmail.com

ABSTRAK

Pemetaan kerawanan banjir berbasis *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) memerlukan mekanisme pembobotan variabel spasial yang transparan, konsisten, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. *Analytical Hierarchy Process* (AHP) telah terbukti memenuhi tuntutan tersebut, namun implementasinya dalam penelitian lapangan masih bergantung pada prosedur manual yang tidak terintegrasi, rentan terhadap kesalahan komputasional, dan tidak memiliki jejak audit yang terstruktur. Penelitian ini mengembangkan *Decision Support System* (DSS) berbasis web menggunakan PHP 8.x dan MySQL 8.x yang dirancang secara domain-spesifik untuk mendukung penentuan bobot kriteria dalam pemetaan spasial kerawanan banjir. Sistem dikembangkan mengikuti siklus rekayasa perangkat lunak *waterfall* yang menghasilkan artefak terverifikasi pada setiap tahap: dokumen *requirement* dengan delapan kebutuhan fungsional, diagram use case dua aktor, skema basis data sembilan tabel, dan protokol pengujian dua tahap. Validasi dilakukan pada studi kasus kawasan bantaran Sungai Ciliwung, Jakarta, dengan empat variabel kerawanan dan tiga ahli dari bidang hidrologi, perencanaan wilayah, dan arsitektur. Hasil pengujian fungsional menunjukkan seluruh delapan fungsi inti sistem lulus tanpa kegagalan. Ketiga ahli menghasilkan penilaian dengan *Consistency Ratio* (CR) antara 0,0075 dan 0,0254, seluruhnya konsisten. Bobot gabungan yang diperoleh melalui *geometric mean* adalah: jarak sungai (55,4%), elevasi (28,0%), kemiringan lereng (9,1%), dan penggunaan lahan (7,6%). Validasi matematis menunjukkan deviasi nol antara output sistem dan kalkulasi manual pada presisi empat desimal. Kontribusi utama penelitian ini adalah kerangka *requirement* DSS domain-spesifik untuk AHP kerawanan banjir yang dapat diadopsi pada konteks geografis lain, arsitektur tiga lapis yang memisahkan logika bisnis AHP dari antarmuka dan basis data, serta protokol pengujian terstruktur yang mencakup *black-box testing* dan validasi matematis.

Kata kunci: *decision support system; Analytical Hierarchy Process; pemetaan kerawanan banjir; rekayasa perangkat lunak; weighted overlay; PHP; MySQL; consistency ratio*

ABSTRACT

Flood vulnerability mapping based on *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) requires a mechanism for weighting spatial variables that is transparent, consistent, and scientifically accountable. The *Analytical Hierarchy Process* (AHP) has proven to meet these demands; however, its implementation in field research still relies on unintegrated manual procedures that are prone to computational errors and lack structured audit trails. This study develops a web-based *Decision Support System* (DSS) using PHP 8.x and MySQL 8.x, designed specifically for the domain of criteria weight determination in spatial flood vulnerability mapping. The system was developed following a *waterfall* software engineering cycle that produces verifiable artifacts at each stage: a requirement document with eight functional requirements, a two-actor use case diagram, a nine-table database schema, and a two-stage testing protocol. Validation was conducted on a case study of the Ciliwung River riparian zone, Jakarta, involving four vulnerability variables and three experts from hydrology, spatial planning, and architecture. Functional testing results show that all eight core system functions passed without

failure. All three experts produced assessments with Consistency Ratio (CR) values between 0.0075 and 0.0254, all consistent. The combined weights obtained through geometric mean are: distance to river (55.4%), elevation (28.0%), slope (9.1%), and land use (7.6%). Mathematical validation showed zero deviation between system output and manual calculations at four decimal precision. The main contributions of this study are: a domain-specific DSS requirement framework for flood vulnerability AHP that can be adopted in other geographic contexts, a three-tier architecture that separates AHP business logic from the interface and database, and a structured testing protocol encompassing black-box testing and mathematical validation.

Keywords: decision support system; Analytical Hierarchy Process; flood vulnerability mapping; software engineering; weighted overlay; PHP; MySQL; consistency ratio

PENDAHULUAN

Bencana banjir merupakan ancaman yang paling konsisten dan berulang di kawasan perkotaan Asia Tenggara, khususnya di kota-kota besar yang tumbuh di atas dataran rendah dengan drainase yang tidak memadai. Jakarta adalah contoh paling gamblang: hampir setiap tahun, kawasan bantaran sungai seperti Ciliwung mengalami genangan yang melumpuhkan aktivitas warga, merusak infrastruktur, dan menghancurkan aset properti dalam skala yang tidak kecil. Respons terhadap ancaman ini menuntut lebih dari sekadar pembangunan fisik; ia memerlukan perangkat analitik yang mampu mengidentifikasi zona risiko secara spasial, terstruktur, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Pemetaan kerawanan banjir berbasis *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) telah berkembang menjadi pendekatan yang diakui luas untuk keperluan tersebut. Inti dari pendekatan ini adalah pembobotan variabel spasial (seperti jarak terhadap Sungai), elevasi lahan, kemiringan lereng, dan penggunaan lahan; yang mencerminkan kontribusi relatif masing-masing faktor terhadap risiko genangan. Wang et al. (2011) mendemonstrasikan bahwa integrasi *spatial multi-criteria analysis* berbasis AHP dalam lingkungan GIS menghasilkan peta risiko banjir yang terstratifikasi dan operasional untuk pengambilan keputusan. Studi-studi berikutnya di berbagai konteks geografis, mulai dari cekungan sungai Awash di Ethiopia (Hagos et al., 2022) hingga kawasan perkotaan Swat di Pakistan (Waseem et al., 2023), mengkonfirmasi konsistensi metodologi ini. Untuk konteks Indonesia, Puspitasari et al. (2026) memperlihatkan bahwa AHP yang diintegrasikan dengan

metode *frequency ratio* dan validasi ROC-AUC mampu menghasilkan peta kerentanan banjir perkotaan Jakarta Selatan yang operasional pada skala 1:25.000.

Metode pembobotan yang digunakan dalam seluruh studi tersebut adalah *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Sejak Saaty (1987) memformalkannya sebagai prosedur pengukuran berbasis skala rasio, AHP telah menempatkan diri sebagai metode pembobotan multi-kriteria yang paling banyak diadopsi, sebagaimana dikonfirmasi oleh tinjauan bibliometrik Emrouznejad dan Marra (2017) terhadap 8.441 publikasi dalam rentang 1979 hingga 2017. Kekuatan utama AHP terletak pada mekanisme uji konsistensi melalui *Consistency Ratio* (CR) — sebuah fitur yang membedakannya dari metode pembobotan intuitif dan menjadikan hasilnya dapat diverifikasi secara intersubjektif.

Namun di balik kokohnya fondasi teoritisnya, AHP menyimpan persoalan implementasi yang kerap diabaikan. Dalam praktik penelitian lapangan, proses pengumpulan penilaian dari para ahli, kalkulasi bobot, uji konsistensi, hingga ekspor hasil ke dalam sistem GIS masih dilakukan secara manual atau dengan bantuan spreadsheet yang tidak terintegrasi. Tidak ada mekanisme validasi konsistensi secara langsung saat ahli mengisi penilaian. Tidak ada kontrol terhadap keabsahan proses; siapa yang mengisi, kapan, dan apakah hasilnya konsisten. Ketika penelitian melibatkan lebih dari satu ahli dari institusi berbeda, koordinasinya menjadi hambatan metodologis yang nyata.

Kesenjangan ini bukan persoalan teknis semata. Ia menyentuh validitas metodologis penelitian itu sendiri. *Decision Support System* (DSS); yaitu sistem yang dirancang untuk mendukung pengambilan keputusan

kompleks berbasis data dan model analitik; yang seharusnya menjadi jawaban atas kesenjangan tersebut. Namun DSS yang dikembangkan khusus untuk domain pemetaan kerawanan banjir berbasis AHP, dengan arsitektur yang mengikuti siklus pengembangan perangkat lunak yang terstruktur, masih sangat terbatas. Susanto et al. (2023) menunjukkan bahwa sistem berbasis web dengan logika keputusan terstruktur dapat dikembangkan secara aksesibel untuk domain pengetahuan yang kompleks. Marhaeni et al. (2026) mengkonfirmasi bahwa sistem terdistribusi berbasis web dengan validasi berlapis mampu mencapai reliabilitas tinggi dalam konteks operasional nyata. Kedua temuan ini memberi landasan bahwa pendekatan serupa layak dan perlu diterapkan dalam domain AHP-kerawanan banjir.

Di sinilah celah penelitian yang hendak diisi. Pertama, belum ada DSS berbasis web yang dikembangkan secara eksplisit mengikuti metodologi rekayasa perangkat lunak; dari analisis *requirement*, perancangan use case dan ERD, implementasi, hingga pengujian terstruktur; khusus untuk domain pemetaan kerawanan banjir berbasis AHP. Kedua, sistem yang ada seperti AHP-OS (Goepel, 2018) dan AHP-WEB (Françoze et al., 2023) berfungsi sebagai alat kalkulasi generik, bukan DSS domain-spesifik yang mengintegrasikan konteks variabel kerawanan, scoring spasial, dan ekspor formula GIS dalam satu alur kerja. Ketiga, aspek pengujian sistem; khususnya validasi kesesuaian antara output sistem dengan kalkulasi matematis manual, jarang didokumentasikan secara eksplisit dalam literatur pengembangan sistem AHP.

Penelitian ini menjawab ketiga celah tersebut dengan mengembangkan DSS berbasis web menggunakan PHP dan MySQL yang dirancang secara domain-spesifik untuk mendukung penentuan bobot kriteria dalam pemetaan spasial kerawanan banjir. Sistem dikembangkan mengikuti siklus rekayasa perangkat lunak yang terstruktur: analisis *requirement* → perancangan sistem (use case, ERD, DFD) → implementasi → pengujian *black-box* dan validasi matematis. Studi kasus dilakukan pada kawasan bantaran Sungai Ciliwung, Jakarta, dengan empat variabel kerawanan dan tiga ahli dari bidang yang

berbeda. Kontribusi utama penelitian ini adalah: (1) kerangka *requirement* DSS domain-spesifik untuk AHP kerawanan banjir yang dapat diadopsi pada konteks geografis lain, (2) arsitektur tiga lapis DSS berbasis web yang memisahkan logika bisnis AHP dari antarmuka dan basis data, dan (3) protokol pengujian terstruktur yang mencakup *black-box testing* fungsional dan validasi matematis kalkulasi AHP.

Artikel ini disusun sebagai berikut. Bagian II memaparkan tinjauan pustaka yang melingkupi DSS dalam konteks pemetaan kerawanan, metodologi AHP, dan sistem berbasis web untuk pengambilan keputusan. Bagian III menguraikan metode penelitian yang mencakup siklus pengembangan perangkat lunak, perancangan sistem, dan prosedur pengujian. Bagian IV menyajikan hasil dan pembahasan, termasuk artefak desain, implementasi sistem, dan hasil pengujian. Bagian V menutup dengan kesimpulan dan rekomendasi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Decision Support System dalam Konteks Pemetaan Kerawanan Banjir

Decision Support System (DSS) didefinisikan sebagai sistem berbasis komputer yang dirancang untuk mendukung pengambilan keputusan semi-terstruktur dengan mengintegrasikan data, model analitik, dan antarmuka pengguna dalam satu platform yang kohesif. Dalam konteks pemetaan kerawanan banjir, DSS berperan sebagai jembatan antara data geospasial mentah dan keputusan perencanaan yang memerlukan justifikasi ilmiah. Bloch et al. (2012) menegaskan bahwa manajemen risiko banjir perkotaan yang efektif mensyaratkan integrasi antara instrumen analitik, data spasial, dan kapasitas kelembagaan; tiga elemen yang secara konseptual selaras dengan arsitektur DSS modern.

Dalam praktiknya, DSS untuk pemetaan kerawanan banjir beroperasi pada tiga fungsi utama: akuisisi dan normalisasi data spasial multivariabel, pembobotan kriteria berbasis penilaian ahli, dan sintesis hasil dalam format yang dapat langsung digunakan oleh perencana atau pembuat kebijakan. Fungsi kedua (pembobotan kriteria) adalah titik di mana AHP menemukan posisinya yang

paling strategis. Diriba et al. (2024) menggunakan kombinasi GIS dan AHP untuk menilai bahaya banjir di Cekungan Gidabo dengan enam faktor penentu, mengkonfirmasi bahwa integrasi model keputusan berbasis ahli ke dalam alur GIS menghasilkan peta hazard dengan koefisien korelasi ROC 0,943. Shrestha et al. (2025) melangkah lebih jauh dengan mengintegrasikan sepuluh faktor penyebab banjir ke dalam DSS berbasis GIS-AHP untuk Davidson County, Tennessee, dan memvalidasi hasilnya terhadap peta hazard FEMA.

Relevansi DSS dalam konteks ini bukan sekadar otomatisasi kalkulasi. Ia menyentuh dimensi yang lebih mendasar: reproduktibilitas dan transparansi proses. Ketika bobot kriteria dihasilkan melalui sistem yang terdokumentasi dengan baik (dengan jejak audit, log aktivitas, dan validasi konsistensi yang terstruktur) legitimasi ilmiah dari peta kerawanan yang dihasilkan menjadi jauh lebih kuat dibandingkan bila pembobotan dilakukan secara manual tanpa rekaman proses.

2.2 Analytical Hierarchy Process

AHP beroperasi melalui konstruksi matriks perbandingan berpasangan berukuran $n \times n$, di mana setiap elemen a_{ij} merepresentasikan tingkat kepentingan kriteria i terhadap j pada skala Saaty 1–9, dengan syarat resiprokal $a_{ji} = 1/a_{ij}$ (Saaty, 1987). Dari matriks ini, vektor prioritas (bobot) diturunkan melalui normalisasi kolom dan rata-rata baris:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}$$

Kualitas penilaian dikontrol melalui *Consistency Ratio*:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{(\lambda_{max} - n)/(n - 1)}{RI}$$

dengan $RI = 0,90$ untuk $n = 4$. Penilaian dinyatakan konsisten jika $CR \leq 0,10$ (Salomon & Gomes, 2024).

Dalam konteks penilaian kelompok, bobot dari beberapa ahli diagregasi menggunakan

geometric mean — satu-satunya metode yang secara aksiomatis mempertahankan sifat resiprokal matriks AHP (Aczél & Saaty, 1983):

$$\bar{w}_i = \frac{\left(\prod_{k=1}^K w_i^{(k)} \right)^{1/K}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{k=1}^K w_i^{(k)} \right)^{1/K}}$$

Aguarón et al. (2019) mengembangkan kerangka konsensus berbasis konsistensi untuk AHP kelompok yang memungkinkan pencapaian konsensus tanpa memaksakan homogenisasi penilaian individual. Ini penting secara praktis: dalam penelitian multi-disiplin, perbedaan bobot antar ahli adalah sinyal informasi, bukan noise yang harus dieliminasi.

Tabel 1. Perbandingan Antar Metode

Metode	Input Utama	Konsistensi	Ahli	Transparansi	Referensi
AHP	Pairwise + data spasial	Ya	Tinggi	Tinggi	Saaty (1987); Wang et al. (2011)
Equal Weighting	Data spasial	Tidak	Tidak	Sedang	Shrestha et al. (2025)
Frequency Ratio	Data banjir historis	Tidak	Rendah	Sedang	Puspitasari et al. (2026)
Fuzzy AHP	Pairwise + fuzzy	Parsial	Tinggi	Sedang	Wang et al. (2011)
TOPSIS	Matriks keputusan	Tidak	Sedang	Sedang	Ho & Ma (2018)
Weighted Overlay	Bobot eksternal	Tidak	Variatif	Rendah	Hagos et al. (2022)
ML (RF/SVM)	Data training besar	Tidak	Rendah	Rendah	Diriba et al. (2024)

Tabel 1. Merupakan perbandingan metode pembobotan multi-kriteria yang umum digunakan dalam pemetaan kerawanan banjir. Dan AHP dipilih karena menyediakan uji konsistensi terstruktur sekaligus mempertahankan penilaian ahli secara eksplisit dan transparan.

2.3 Variabel dan Skoring Spasial

Pemilihan dan skoring variabel kerawanan merupakan keputusan metodologis yang menentukan kualitas peta akhir. Tinjauan terhadap literatur terkini mengungkap konsistensi yang cukup kuat pada empat variabel utama yang berulang kali muncul sebagai determinan dominan.

Jarak terhadap sungai secara konsisten menempati bobot tertinggi dalam studi AHP-GIS untuk kawasan perkotaan. Wang et al. (2011) menempatkannya sebagai faktor dengan pengaruh terbesar dalam model SMCA di kawasan Danau Dongting, dan temuan ini direplikasi oleh Waseem et al. (2023) di Swat, Pakistan, di mana jarak ke sungai bersama curah hujan mendapat bobot tertinggi dibanding tujuh faktor lain.

Elevasi lahan berkaitan langsung dengan durasi dan luas genangan. Di dataran rendah perkotaan seperti Jakarta — di mana sebagian besar kawasan berada pada elevasi 3–15 mdpl; variasi elevasi yang relatif kecil tetap menjadi pembeda kritis antara zona yang tergenang beberapa jam versus beberapa hari (Puspitasari et al., 2026).

Kemiringan lereng memengaruhi kecepatan aliran permukaan dan kapasitas drainase alami. Meski variasinya sangat terbatas di dataran rendah Jakarta (umumnya < 3%), Hagos et al. (2022) menunjukkan bahwa lereng tetap relevan sebagai penentu arah aliran dan akumulasi air bahkan pada medan yang hampir datar.

Penggunaan lahan (LULC) menentukan kapasitas infiltrasi. Permukiman padat dengan koefisien dasar bangunan 85–95% seperti yang mendominasi kawasan Ciliwung secara drastis mereduksi infiltrasi dan memaksimalkan limpasan permukaan (Diriba et al., 2024; Shrestha et al., 2025).

Skoring variabel menggunakan skala ordinal 1–5 yang kemudian digabungkan melalui *weighted overlay* dengan formula:

Indeks Kerawanan = $\sum_{i=1}^n \bar{w}_i \times \text{Skor}_i$

Formula ini diimplementasikan langsung dalam QGIS *Raster Calculator*, menjadikan output DSS berupa formula siap-pakai yang dapat diterapkan tanpa konversi manual.

Tabel 2. Perbandingan Variabel dan Bobot

Studi	Lokasi	n V ar	Bobot Domi nan	CR	Valida si
Wang et al. (2011)	China	8	Sungai , hujan	<0,10	Histori s banjir
Hagos et al. (2022)	Ethiopi a	5	Elevas i, sungai	<0,10	Survei
Waseem et al. (2023)	Pakista n	9	Hujan, sungai	<0,10	Overla y
Diriba et al. (2024)	Ethiopi a	6	Elevas i, draina se	<0,10	ROC (0,943)
Puspita sari et al. (2026)	Jakarta Selatan	4	Sungai , elevasi	<0,10	ROC-AUC
Shrestha et al. (2025)	Tennes see	10	Hujan, sungai	<0,10	FEMA
Peneliti an ini	Ciliwu ng	4	Sungai (55,4 %), elevasi (28,0 %)	0,007 5– 0,025 4	Matem atis

Tabel 2. merupakan perbandingan variabel dan bobot AHP yang digunakan pada studi-studi terkini Penelitian ini menggunakan variabel minimum yang difokuskan pada karakteristik dominan kawasan Ciliwung: dataran rendah padat, lereng kecil, dan penggunaan lahan relatif homogen.

2.4 Perangkat Lunak untuk DSS

Pengembangan DSS yang andal memerlukan pendekatan rekayasa perangkat lunak yang terstruktur, bukan sekadar pemrograman ad-hoc. Dalam paradigma *waterfall* yang masih relevan untuk sistem dengan *requirement* yang terdefinisi dengan baik, siklus pengembangan mengikuti alur: analisis kebutuhan → perancangan sistem → implementasi → pengujian → pemeliharaan. Setiap tahap menghasilkan artefak yang dapat diverifikasi — dari dokumen *requirement* hingga laporan pengujian — yang secara kolektif membangun jejak audit pengembangan.

Untuk DSS berbasis web, arsitektur tiga lapis (*three-tier architecture*) telah menjadi standar

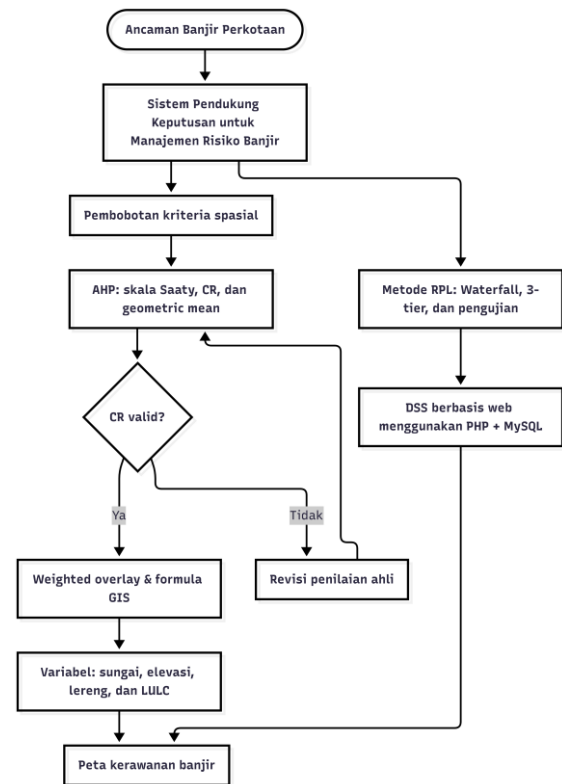
de facto: lapisan presentasi menangani antarmuka pengguna, lapisan logika bisnis mengenkapsulasi model analitik (dalam hal ini, kalkulasi AHP), dan lapisan data mengelola persistensi melalui sistem manajemen basis data relasional. Pemisahan ini bukan sekadar konvensi arsitektur — ia memungkinkan pengujian unit yang terisolasi pada setiap lapisan dan mempermudah pemeliharaan serta pengembangan lanjutan.

Susanto et al. (2023) mendemonstrasikan bahwa sistem pakar berbasis web dengan logika *forward chaining* dapat diimplementasikan secara aksesibel menggunakan PHP tanpa instalasi tambahan di sisi klien, dengan antarmuka yang dapat digunakan oleh pengguna non-teknis. Ini mengkonfirmasi kelayakan platform PHP untuk DSS domain-spesifik yang memerlukan aksesibilitas luas. Marhaeni et al. (2026), dalam konteks yang berbeda, menunjukkan bahwa sistem terdistribusi berbasis web dengan validasi multi-faktor — NFC, GPS, NTP, dan kamera — mampu mencapai *Task Success Rate* 100% dengan waktu respons *end-to-end* rata-rata 5,25 detik, menegaskan bahwa reliabilitas tinggi dapat dicapai pada sistem web terdistribusi bahkan dengan infrastruktur yang terjangkau.

2.5 Posisi Penelitian

Sintesis tinjauan pustaka di atas mengungkap peta literatur yang dapat divisualisasikan dalam dua dimensi: (1) tingkat integrasi sistem (dari kalkulasi AHP manual hingga DSS terintegrasi penuh), dan (2) spesifisitas domain (dari alat generik hingga sistem domain-spesifik). Penelitian ini menempati kuadran yang paling jarang dihuni: DSS terintegrasi penuh yang domain-spesifik untuk pemetaan kerawanan banjir berbasis AHP, dikembangkan dengan metodologi rekayasa perangkat lunak yang terstruktur dan dapat direplikasi.

Flowchart Gambar 1. menggambarkan kerangka konseptual pengembangan sistem pendukung keputusan untuk manajemen risiko banjir perkotaan. Proses dimulai dari identifikasi kebutuhan sistem, kemudian terbagi menjadi dua alur utama, yaitu proses pembobotan spasial menggunakan metode AHP dan pengembangan sistem berbasis web.



Gambar 1. Flowchart Kerangka Konseptual SPK Risiko Banjir Berbasis AHP dan GIS

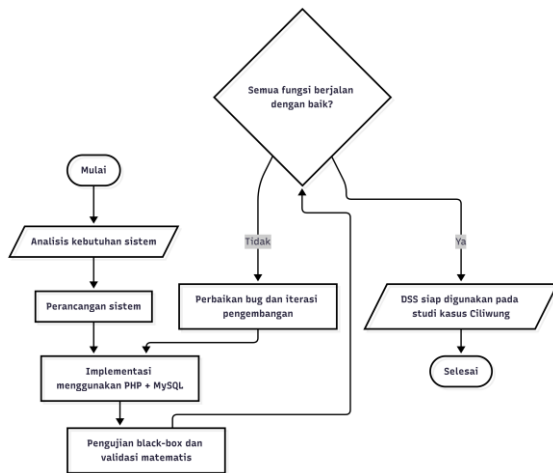
Hasil pembobotan kriteria spasial digunakan dalam proses weighted overlay untuk menghasilkan peta kerawanan banjir yang diintegrasikan dengan sistem pendukung keputusan yang dikembangkan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendekatan dan Siklus Pengembangan

Penelitian ini menggunakan metodologi *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan perangkat lunak *waterfall*. Model ini dipilih karena *requirement* sistem terdefinisi dengan jelas sejak awal dan perubahan spesifikasi di tengah pengembangan tidak diharapkan. Siklus pengembangan terdiri dari empat tahap utama yang menghasilkan artefak terverifikasi pada setiap tahapnya.

Flowchart Gambar 3. menggambarkan tahapan pengembangan sistem pendukung keputusan berbasis web yang dimulai dari analisis kebutuhan sistem, perancangan, implementasi menggunakan PHP dan MySQL, hingga tahap pengujian sistem.



Gambar 3. Flowchart Metodologi Pengembangan SPK Berbasis Web

Proses pengujian dilakukan menggunakan pendekatan black-box dan validasi matematis untuk memastikan seluruh fungsi berjalan sesuai kebutuhan. Apabila ditemukan kesalahan, proses dilakukan iterasi perbaikan hingga sistem siap digunakan pada studi kasus penelitian.

3.2 Analisis Kebutuhan Sistem

Analisis *requirement* dilakukan melalui studi literatur terhadap alur kerja AHP kelompok dan kebutuhan peneliti yang menggunakannya dalam konteks pemetaan spasial. Hasil analisis menghasilkan dua kategori kebutuhan.

Kebutuhan fungsional mencakup: manajemen proyek multi-pengguna oleh administrator; pendaftaran dan penugasan ahli ke proyek; pengisian penilaian perbandingan berpasangan oleh ahli dengan umpan balik CR *real-time*; pencegahan pengisian ganda per proyek per ahli; kalkulasi bobot gabungan otomatis via *geometric mean*; ekspor formula *weighted overlay* untuk QGIS; dan log aktivitas seluruh pengguna.

Kebutuhan non-fungsional mencakup: aksesibilitas via peramban web tanpa instalasi tambahan; keamanan berbasis *role-based access control* (RBAC) dengan dua peran (administrator dan ahli); proteksi CSRF pada seluruh formulir POST; dan presisi kalkulasi AHP setara dengan perhitungan manual pada empat desimal.

Pemetaan antara *requirement* dan fitur sistem disajikan pada Tabel 3.

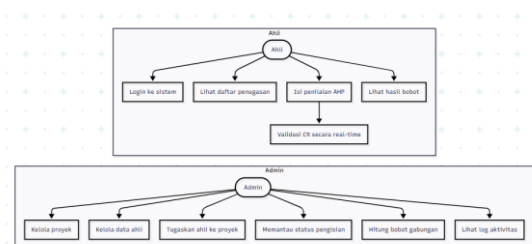
Tabel 3. Pemetaan *requirement* fungsional ke fitur DSS yang dikembangkan.

Kode	Fungsional	Fitur Sistem	Modul
RF-01	Manajemen proyek	CRUD proyek, status proses/selesai	Admin
RF-02	Manajemen ahli	Daftar, tambah, nonaktifkan akun ahli	Admin
RF-03	Penugasan ahli	Assign/remove ahli per proyek	Admin
RF-04	Pengisian penilaian	Form 6 pasangan, CR <i>real-time</i>	Ahli
RF-05	Pencegahan duplikasi	Blokir pengisian kedua, log tercatat	Ahli
RF-06	Kalkulasi gabungan	<i>Geometric mean</i> , normalisasi bobot	Admin
RF-07	Ekspor formula QGIS	String formula otomatis, salin satu klik	Admin
RF-08	Log aktivitas	Rekam seluruh aksi pengguna dengan <i>timestamp</i>	Sistem

3.3 Perancangan Sistem

3.3.1 Use Case

Sistem memiliki dua aktor utama dengan hak akses yang berbeda. Administrator bertanggung jawab atas pengelolaan proyek dan pengguna, pemantauan status pengisian, dan kalkulasi akhir. Ahli mengakses daftar proyek yang ditugaskan, mengisi penilaian, dan melihat hasil bobotnya sendiri.



Gambar 4. Flowchart Fungsionalitas Pengguna pada SPK Berbasis AHP Kelompok

Flowchart Gambar 4. menggambarkan pembagian fungsionalitas sistem berdasarkan peran pengguna, yaitu administrator dan ahli.

Administrator bertanggung jawab terhadap pengelolaan proyek, manajemen ahli, penugasan, pemantauan proses, serta perhitungan bobot gabungan. Sementara itu, ahli berinteraksi dengan sistem untuk melihat penugasan, melakukan penilaian AHP, serta memperoleh hasil pembobotan. Sistem juga menyediakan validasi Consistency Ratio (CR) secara real-time untuk memastikan konsistensi penilaian yang diberikan.

3.3.2 Arsitektur dan Skema Basis Data

Sistem mengimplementasikan arsitektur tiga lapis: lapisan presentasi (antarmuka PHP), lapisan logika bisnis (modul kalkulasi AHP dan manajemen proyek dalam functions.php), dan lapisan data (MySQL dengan sembilan tabel relasional). Pemisahan lapisan ini memungkinkan pengujian unit yang terisolasi pada modul kalkulasi tanpa bergantung pada antarmuka.

Skema basis data terdiri dari sembilan tabel: users, proyek, proyek_ahli, variabel, penilaian_ahp, hasil_ahp, bobot_gabungan, log_aktivitas, dan v_statistik_proyek (view). Relasi antar tabel disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Skema relasi antar tabel basis data DSS.

Tabel	Prima ry Key	Foreign Key	Fungsi
users	id	—	Menyimpan data pengguna dan peran
proyek	id	admin_id → users.id	Data proyek dan status
proyek_ahli	id	proyek_id, ahli_id → users.id	Penugasan ahli, status isian
variabel	id	—	Master variabel kerawanan
penilaian_ahp	id	proyek_id, ahli_id, var_baris_id, var_kolom_id	Nilai matriks a_{ij} per ahli
hasil_ahp	id	proyek_id,	Bobot

	ahli_id, variabel_id	w_i , λ_{max} , CI, CR per ahli
bobot_gabungan	id	proyek_id, variabel_id Bobot final geometri c mean
log_aktivitas	id	user_id → users.id Jejak audit seluruh aksi
v_statistik_proyek	—	— View agregasi status proyek

3.3.3 Alur Kalkulasi AHP dalam DSS

Modul kalkulasi AHP diimplementasikan sepenuhnya di sisi server dalam fungsi hitungAHP(). Prosedur mengikuti standar Saaty (1987) dengan tambahan agregasi kelompok berbasis Aczél dan Saaty (1983):

1. Bangun matriks Aberukuran 4×4 dari input penilaian ahli
2. Normalisasi kolom: $\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_k a_{kj}$
3. Hitung eigenvector: $w_i = \frac{1}{n} \sum_j \bar{a}_{ij}$
4. Hitung λ_{max} , CI, dan CR
5. Jika $CR \leq 0,10$: simpan hasil; jika tidak: notifikasi revisi
6. Setelah semua ahli selesai: hitung *geometric mean* lintas ahli dan normalisasi bobot gabungan
7. Generate formula *weighted overlay* QGIS secara otomatis

3.4 Implementasi

Sistem diimplementasikan menggunakan PHP 8.x sebagai bahasa *server-side*, MySQL 8.x sebagai basis data relasional, dan JavaScript murni (*vanilla JS*) untuk kalkulasi CR *real-time* di sisi klien. Tidak ada *framework* pihak ketiga yang digunakan — keputusan ini disengaja untuk meminimalkan dependensi eksternal dan memudahkan replikasi pada infrastruktur dengan akses internet terbatas.

Umpan balik CR *real-time* diimplementasikan dengan mengadaptasi

prinsip deteksi inkonsistensi interaktif yang diusulkan oleh Frish et al. (2025): setiap kali ahli mengubah satu nilai perbandingan, JavaScript membangun ulang matriks dan menghitung CR tanpa *reload* halaman. Ini memberi ahli kesempatan untuk mengoreksi inkonsistensi sebelum menyimpan penilaian.

3.5 Studi Kasus Validasi

Validasi sistem dilakukan pada proyek pemetaan kerawanan banjir kawasan bantaran Sungai Ciliwung, Jakarta, mencakup empat kelurahan: Bukit Duri, Kampung Pulo, Kampung Melayu, dan Kali Bata (± 340 hektar). Tiga ahli dari bidang berbeda dilibatkan sebagai responden: pakar hidrologi (ITB), perencana wilayah (Bappenas), dan arsitek senior (IAI Jakarta). Keempat variabel kerawanan yang dinilai adalah jarak terhadap sungai, elevasi, kemiringan lereng, dan penggunaan lahan — konsisten dengan variabel yang digunakan pada studi-studi terkini (Wang et al., 2011; Hagos et al., 2022; Diriba et al., 2024).

3.6 Protokol Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua tahap yang saling melengkapi:

Pengujian fungsional (*black-box testing*): memverifikasi delapan fungsi inti sistem terhadap skenario *happy path* dan *edge case*. Kriteria kelulusan: seluruh fungsi menghasilkan output sesuai spesifikasi *requirement* (Tabel 3) tanpa kegagalan.

Validasi matematis; membandingkan output kalkulasi CR, bobot individual, dan bobot gabungan sistem dengan perhitungan independen menggunakan spreadsheet. Kriteria kelulusan: deviasi antara output sistem dan kalkulasi manual $\leq 0,0001$ pada presisi empat desimal.

Kombinasi dua protokol pengujian ini memastikan bahwa sistem tidak hanya berfungsi secara operasional, tetapi juga benar secara komputasional — dua dimensi yang sama pentingnya untuk DSS yang digunakan dalam penelitian ilmiah.

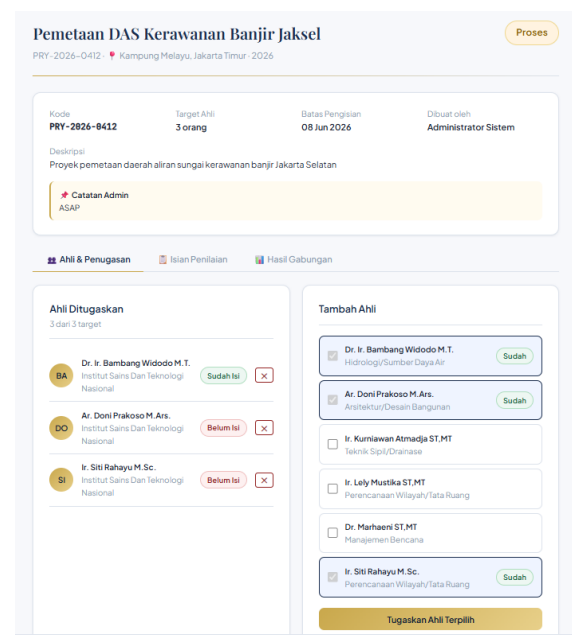
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penyajian Hasil Penelitian

4.1.1 Artefak Desain Sistem

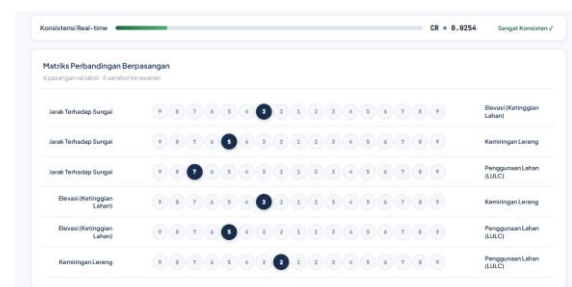
Tahap perancangan menghasilkan empat

artefak utama yang menjadi fondasi implementasi. Pertama, diagram use case yang mendefinisikan delapan interaksi administrator dan tiga interaksi ahli sebagaimana telah disajikan pada Bab III. Kedua, skema basis data relasional dengan sembilan tabel yang relasi lengkapnya telah didokumentasikan pada Tabel 4. Ketiga, spesifikasi *requirement* yang dipetakan langsung ke fitur sistem pada Tabel 3 — pemetaan ini memastikan tidak ada *requirement* yang terlewat dalam implementasi, sekaligus menyediakan dasar *traceability* untuk pengujian. Keempat, spesifikasi modul kalkulasi AHP yang mendefinisikan alur komputasi dari input penilaian hingga output formula QGIS.



Gambar 5: Dashboard Administrator menampilkan proyek PRY-2026-0412

Gambar 5. Adalah tangkapan layar antarmuka pengisian penilaian ahli, menampilkan enam baris pasangan variabel dengan tombol skala Saaty 1–9 pada kedua sisi, indikator CR *real-time* berwarna hijau, dan pratinjau bobot yang diperbarui otomatis.



Gambar 6: Tangkapan layar antarmuka

pengisian penilaian oleh ahli

Ketertelusuran antara *requirement* dan artefak desain adalah hal yang sering diabaikan dalam pengembangan sistem penelitian. Di sini, setiap fungsi yang diuji pada Tabel 5 dapat ditelusuri kembali ke kode *requirement* pada Tabel 3, yang pada gilirannya dapat ditelusuri ke celah metodologis yang diidentifikasi pada Bab I. Rantai ketertelusuran ini adalah salah satu kontribusi metodologis utama penelitian ini.

4.1.2 Hasil Pengujian Fungsional

Pengujian *black-box* dilakukan terhadap delapan fungsi inti sistem. Seluruh skenario uji (baik *happy path* maupun *edge case*) menghasilkan output sesuai spesifikasi tanpa kegagalan.

Tabel 5. Hasil pengujian fungsional (*black-box testing*) sistem DSS berbasis AHP.

Kode	Fungsi yang Diuji	Skenario Uji	Output Diharapkan	Status
RF-01	Pembuatan proyek	Admin buat proyek baru	Proyek tersimpan, kode unik tergenerasi	Lulus
RF-02	Manajemen ahli	Admin tambahkan/nonaktifkan akun ahli	Data tersimpan, status berubah	Lulus
RF-03	Penugasan ahli	Admin assign 3 ahli ke proyek	Ahli muncul di daftar penugasan	Lulus
RF-04	Pengisian penilaian	Ahli isi 6 pasangan, CR dihitung	Penilaian tersimpan, CR terhitung <i>real-time</i>	Lulus
RF-05	Pencegahan duplikasi	Ahli coba isi proyek yang sama dua kali	Akses diblokir, pesan muncul, log tercatat	Lulus
RF-06	Kalkulasi bobot	Admin picu setelah 3 ahli selesai	Bobot geometrik mean	Lulus

gabungan			terhitung, ternormalisasi	
RF-07	Eksport formula QGIS	Admin salin formula dari halaman hasil	Formula siap digunakan di QGIS	Lulus
RF-08	Log aktivitas	Setiap aksi pengguna dicatat	Entri log dengan <i>timestamp</i> dan IP	Lulus

Seluruh delapan fungsi lulus pengujian, mencakup 100% *requirement* fungsional yang ditetapkan. Tidak ditemukan kegagalan pada satu pun skenario uji, termasuk skenario *edge case* seperti pencegahan pengisian ganda (RF-05) yang merupakan mekanisme kritis untuk integritas data penilaian.

4.1.3 Hasil Penilaian AHP Tiga Ahli

Tiga ahli mengisi penilaian secara independen melalui sistem. Profil ahli: (1) Dr. Ir. Bambang Widodo, M.T. - hidrologi; (2) Ir. Siti Rahayu, M.Sc. - perencanaan wilayah; (3) Ar. Doni Prakoso, M.Ars. - arsitektur.

Tabel 6. Matriks perbandingan berpasangan dan bobot Ahli 1 (Hidrologi).

Variabel	Jarak Sungai	Elevasi	Lereng	LU LC	Bobot w_i	%
Jarak Sungai	1	3	5	7	0,5628	56,3%
Elevasi	1/3	1	3	5	0,2671	26,7%
Kemiringan Lereng	1/5	1/3	1	2	0,1079	10,8%
Penggunaan Lahan	1/7	1/5	1/2	1	0,0622	6,2%
λ_{max}					4,0687	
CR					0,0254	Konsisten

Tabel 7. Matriks perbandingan berpasangan dan bobot Ahli 2 (Perencanaan)

Varia bel	Jarak Sungai	Elevasi	Lereng	LU LC	Bobot w_i	%
-----------	--------------	---------	--------	-------	-------------	---

i						
Jarak Sungai i	1	2	5	7	0,5 254	52,5 %
Elevasi i	1/2	1	3	5	0,3 009	30,1 %
Kemiringan Lereng	1/5	1/3	1	2	0,1 104	11,0 %
Penggunaan Lahan	1/7	1/5	1/2	1	0,0 634	6,3 %
λ_{max}					4,0 201	
CR					0,0 075	Konsisten

Tabel 8. Matriks perbandingan berpasangan dan bobot Ahli 3 (Arsitektur).

Variabel	Jarak Sungai	Elevasi	Lereng	LU LC	Bobot w_i	%
Jarak Sungai	1	3	7	5	0,5 628	56,3 %
Elevasi	1/3	1	5	3	0,2 671	26,7 %
Kemiringan Lereng	1/7	1/5	1	1/2	0,0 622	6,2 %
Penggunaan Lahan	1/5	1/3	2	1	0,1 079	10,8 %
λ_{max}					4,0 687	
CR					0,0 254	Konsisten

Ketiga ahli menghasilkan penilaian dengan CR dalam rentang 0,0075 hingga 0,0254 — seluruhnya jauh di bawah ambang batas 0,10, bahkan masuk dalam kategori "Sangat Konsisten" ($CR \leq 0,05$) untuk Ahli 2. Tidak ada satu pun penilaian yang memerlukan revisi.

4.1.4 Bobot Gabungan dan Formula QGIS

Tabel 9. Bobot individual, *geometric mean*, dan bobot final ternormalisasi.

Variabel	Bobot Ahli 1	Bobot Ahli 2	Bobot Ahli 3	Geo m. Mean	Bobot Final $\bar{w}_i$	%
----------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------------------	---

Jarak Sungai	0,5 628	0,5 254	0,5 628	0,5 501	0,5 536	55,4 %
Elevasi	0,2 671	0,3 009	0,2 671	0,2 779	0,2 797	28,0 %
Kemiringan Lereng	0,1 079	0,1 104	0,0 622	0,0 904	0,0 910	9,1 %
Penggunaan Lahan	0,0 622	0,0 634	0,1 079	0,0 752	0,0 757	7,6 %
Total	1,0 000	1,0 000	1,0 000	0,9 936	1,0 000	100 %

Formula *weighted overlay* QGIS yang dihasilkan sistem secara otomatis:

Indeks Kerawanan

$$= (0,55 \times \text{Skor_Jarak}) + (0,28 \times \text{Skor_Elevasi}) + (0,09 \times \text{Skor_Lereng}) + (0,08 \times \text{Skor_LULC})$$

Bobot Akhir — Gabungan 3 Ahli

Dihitung dengan Geometric Mean - Proyek Selesai

0.5492

54.9%

Jarak Terhadap Sungai

0.2778

27.8%

Elevasi (Ketinggian Lahan)

0.1048

10.5%

Kemiringan Lereng

0.0682

6.8%

Penggunaan Lahan (LULC)

Variabel	Bambang Wldodo	Dori Prakoso	Siti Rahayu	Geom. Mean	Bobot Final	%
Jarak Terhadap Sungai	0.5628	0.5579	0.5254	0.5484	0.5492	54.9%
Elevasi (Ketinggian Lahan)	0.2671	0.2656	0.3009	0.2774	0.2778	27.8%
Kemiringan Lereng	0.1079	0.0963	0.1104	0.1047	0.1048	10.5%
Penggunaan Lahan (LULC)	0.0622	0.0802	0.0634	0.0681	0.0682	6.8%

Formula Raster Calculator QGIS

(0.55 * "skor_JRK_SUNGAI@1") + (0.28 * "skor_ELEVASI@1") + (0.1 * "skor_LERENG@1") + (0.07 * "skor_LULC@1")

Gambar 4. Tangkapan layar halaman hasil bobot gabungan pada panel administrator,

4.1.5 Validasi Matematis

Tabel 10. Perbandingan output sistem dengan kalkulasi manual (*spreadsheet* independen).

Metrik	Nilai Sistem	Nilai Manual	Deviasi
λ_{max} Ahli 1	4,0687	4,0687	0,0000
CR Ahli 1	0,0254	0,0254	0,0000
λ_{max} Ahli 2	4,0201	4,0201	0,0000
CR Ahli 2	0,0075	0,0075	0,0000
λ_{max} Ahli 3	4,0687	4,0687	0,0000
CR Ahli 3	0,0254	0,0254	0,0000
Bobot	0,5536	0,5536	0,0000

Gabungan - Jarak Sungai			
Bobot	0,2797	0,2797	0,0000
Gabungan – Elevasi			
Bobot	0,0910	0,0910	0,0000
Gabungan – Lereng			
Bobot	0,0757	0,0757	0,0000
Gabungan - LULC			

Seluruh output sistem identik dengan kalkulasi manual pada presisi empat desimal. Deviasi nol pada semua metrik mengkonfirmasi kebenaran implementasi algoritma *eigenvector* dan *geometric mean* dalam modul kalkulasi DSS.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Interpretasi Temuan Kunci

Dua temuan utama penelitian ini perlu diinterpretasikan secara bersama, bukan terpisah. Pertama, seluruh *requirement* fungsional terpenuhi tanpa kegagalan. Kedua, validasi matematis menunjukkan deviasi nol. Keduanya bersama-sama mengkonfirmasi bahwa DSS yang dikembangkan tidak hanya berfungsi secara operasional, tetapi juga benar secara komputasional — dua dimensi yang tidak selalu hadir bersamaan dalam sistem penelitian.

Yang lebih substantif adalah pola bobot yang dihasilkan. Jarak terhadap sungai (55,4%) dan elevasi (28,0%) bersama-sama menanggung 83,4% dari total indeks kerawanan — proporsi yang mencerminkan karakteristik fisik kawasan Ciliwung secara akurat. Di dataran rendah Jakarta dengan kemiringan lereng hampir nol dan penggunaan lahan yang hampir seragam (KDB 85–95%), kedua faktor tersebut memang secara logis mendominasi. Konvergensi peringkat variabel di antara tiga ahli dari disiplin berbeda memperkuat validitas substansial temuan ini.

Variasi yang paling menarik muncul pada urutan bobot antara kemiringan lereng dan penggunaan lahan. Ahli hidrologi dan perencana wilayah menempatkan lereng di atas LULC, sementara ahli arsitektur membalikkan urutan tersebut. Perbedaan ini koheren secara profesional: dari perspektif

desain bangunan, KDB 85–95% secara langsung menghilangkan kapasitas infiltrasi dan menjadi variabel yang lebih operasional dibanding kemiringan yang di kawasan ini hampir tidak bervariasi. DSS yang dikembangkan berhasil merekam perbedaan perspektif ini secara terstruktur dan mengakomodasinya melalui agregasi *geometric mean* tanpa memaksakan konsensus.

4.2.2 Kontekstualisasi dengan Literatur

Dari perspektif RPL, penelitian ini mendemonstrasikan bahwa pengembangan DSS domain-spesifik untuk AHP kerawanan banjir dapat dilakukan dengan siklus *waterfall* yang menghasilkan artefak terverifikasi di setiap tahap. Ini berbeda secara metodologis dari alat AHP yang ada. Goepel (2018) mengembangkan AHP-OS sebagai alat kalkulasi daring, bukan sebagai sistem yang dikembangkan melalui siklus RPL yang terdokumentasi. Françaço et al. (2023) mempublikasikan AHP-WEB sebagai perangkat lunak *open-source* dengan fokus pada reduksi jumlah perbandingan, namun tanpa dokumentasi *requirement* atau laporan pengujian terstruktur. Kontribusi penelitian ini bukan pada kecanggihan teknologi, melainkan pada ketelusuran proses: dari *requirement* ke desain, dari desain ke implementasi, dari implementasi ke pengujian.

Dari perspektif domain, pola bobot yang diperoleh konsisten dengan literatur terkini. Wang et al. (2011) menempatkan jarak sungai sebagai faktor dominan dalam model SMCA di kawasan Danau Dongting — pola yang direplikasi pada penelitian ini dengan bobot 55,4%. Hagos et al. (2022) dan Waseem et al. (2023) mengkonfirmasi dominasi faktor hidrologi dan topografi dalam berbagai konteks geografis. Shrestha et al. (2025), dalam studi yang menggunakan sepuluh variabel untuk Davidson County, menemukan bahwa penambahan variabel di luar empat variabel utama memberikan kontribusi marginal terhadap akurasi peta; temuan yang secara tidak langsung memvalidasi keputusan metodologis penelitian ini untuk membatasi pada empat variabel yang paling relevan untuk karakteristik kawasan Ciliwung.

Perbandingan CR antar studi juga layak dicermati. Nilai CR yang diperoleh dalam

penelitian ini (0,0075–0,0254) berada pada rentang yang secara konsisten lebih rendah dibanding studi-studi pada Tabel 2 yang hanya melaporkan " $CR < 0,10$ " tanpa nilai spesifik. Ini bukan kebetulan. Mekanisme umpan balik CR *real-time* yang disediakan system; yang mengadaptasi prinsip deteksi inkonsistensi interaktif dari Frish et al. (2025); memungkinkan ahli untuk mengoreksi inkonsistensi sebelum menyimpan penilaian, sehingga nilai CR final cenderung lebih rendah dari yang mungkin dicapai tanpa alat bantu tersebut.

Dari perspektif sistem, pendekatan Susanto et al. (2023) dalam mengimplementasikan logika keputusan berbasis pengetahuan melalui antarmuka web mengkonfirmasi kelayakan PHP sebagai platform untuk DSS domain-spesifik. Marhaeni et al. (2026) memperkuat argumen bahwa sistem web terdistribusi dengan validasi berlapis dapat mencapai reliabilitas operasional tinggi; prinsip yang diterapkan dalam DSS ini melalui RBAC, proteksi CSRF, dan log aktivitas.

4.2.3 Keterbatasan dan Arah Penelitian

Tiga keterbatasan utama perlu diakui. Pertama, validasi studi kasus terbatas pada satu konteks geografis dengan empat variabel dan hierarki tunggal. DSS yang dikembangkan belum diuji pada kasus dengan lebih dari empat kriteria atau struktur hierarki multi-level. Kedua, pengujian performa sistem dilakukan pada lingkungan terkontrol dengan tiga pengguna simultan. Perilaku sistem pada kondisi *concurrent access* skala besar belum dievaluasi. Ketiga, bobot validasi matematis menunjukkan deviasi nol pada presisi empat desimal, namun pengujian pada presisi yang lebih tinggi atau dengan nilai input yang lebih ekstrem belum dilakukan.

Berdasarkan keterbatasan ini, tiga arah penelitian lanjutan diusulkan. Pertama, perluasan DSS untuk mendukung hierarki AHP multi-level dengan struktur kriteria-subkriteria, memperluas jangkauan sistem ke problem keputusan yang lebih kompleks. Kedua, integrasi modul pembobotan diferensial ahli berdasarkan rekam jejak konsistensi historis, mengikuti kerangka yang diusulkan oleh Amenta et al. (2021) untuk kasus dispersi penilaian tinggi. Ketiga, pengujian skalabilitas dan penambahan

antarmuka multibahasa untuk memperluas adopsi ke komunitas peneliti internasional, mengingat metodologi AHP-GIS untuk kerawanan banjir kini digunakan secara luas di berbagai negara berkembang (Emrouznejad & Marra, 2017).

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan DSS berbasis web yang secara domain-spesifik mendukung penentuan bobot kriteria dalam pemetaan spasial kerawanan banjir melalui siklus rekayasa perangkat lunak yang terstruktur dan terdokumentasi. Tiga kesimpulan utama dapat ditarik.

Pertama, pendekatan *waterfall* terbukti tepat untuk pengembangan DSS dengan *requirement* yang terdefinisi secara eksplisit. Setiap tahap menghasilkan artefak terverifikasi; dari pemetaan *requirement* ke fitur sistem, diagram use case, skema basis data, hingga laporan pengujian; yang secara kolektif membangun rantai ketertelusuran dari celah metodologis yang diidentifikasi hingga fungsi sistem yang diuji. Ketertelusuran ini adalah aspek yang paling sering absen dalam pengembangan sistem penelitian, dan kehadirannya memperkuat legitimasi ilmiah sistem yang dihasilkan.

Kedua, seluruh delapan *requirement* fungsional terpenuhi tanpa kegagalan dalam pengujian *black-box*, dan validasi matematis mengkonfirmasi bahwa implementasi algoritma *eigenvector* dan *geometric mean* bebas dari deviasi komputasional pada presisi empat desimal. Kombinasi kedua hasil ini memastikan DSS tidak hanya berfungsi secara operasional tetapi juga benar secara ilmiah.

Ketiga, pada studi kasus kawasan Ciliwung, pola bobot yang diperoleh menunjukkan konvergensi yang kuat di antara tiga ahli dari disiplin berbeda: jarak terhadap sungai dan elevasi bersama-sama menanggung 83,4% dari total indeks kerawanan, konsisten dengan temuan studi-studi AHP-GIS terkini di berbagai konteks geografis. Mekanisme umpan balik CR *real-time* yang disediakan sistem berkontribusi pada rendahnya nilai CR yang diperoleh (0,0075–0,0254); jauh di bawah ambang batas 0,10, mengkonfirmasi bahwa fitur interaktif dalam DSS secara nyata

meningkatkan kualitas penilaian ahli.

5.2 Rekomendasi

Tiga rekomendasi diajukan untuk pengembangan lanjutan. Pertama, perluasan arsitektur DSS untuk mendukung hierarki AHP multi-level dengan struktur kriteria-subkriteria, sehingga sistem dapat digunakan pada problem pemetaan kerawanan yang lebih kompleks dengan lebih dari empat variabel di satu tingkat hierarki. Kedua, integrasi modul pembobotan diferensial ahli berdasarkan rekam jejak konsistensi historis; mengikuti kerangka Amenta et al. (2021), untuk mengakomodasi situasi di mana tingkat keahlian antar pakar tidak setara. Ketiga, pengujian skalabilitas sistem pada kondisi *concurrent access* skala besar dan pengembangan antarmuka multibahasa untuk memperluas adopsi ke komunitas peneliti internasional yang menggunakan metodologi AHP-GIS dalam konteks kerawanan banjir.

DAFTAR PUSTAKA

- Aczél, J., & Saaty, T. L. (1983). Procedures for synthesizing ratio judgements. *Journal of Mathematical Psychology*, 27(1), 93–102. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(83\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0022-2496(83)90028-7)
- Aguarón, J., Escobar, M. T., Moreno-Jiménez, J. M., & Turón, A. (2019). AHP-group decision making based on consistency. *Mathematics*, 7(3), 242. <https://doi.org/10.3390/math7030242>
- Amenta, P., Lucadamo, A., & Marcarelli, G. (2021). On the choice of weights for aggregating judgments in non-negotiable AHP group decision making. *European Journal of Operational Research*, 288(1), 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.048>
- Bloch, R., Jha, A. K., & Lamond, J. (2012). *Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2>
- Diriba, D., Takele, T., Karuppannan, S., & Husein, M. (2024). 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, Natural Hazards and Risk*, 15(1), Article 2361813. <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2361813>
- Emrouznejad, A., & Marra, M. (2017). The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis. *International Journal of Production Research*, 55(22), 6653–6675. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1334976>
- Françoze, R. V., Carpinetti, L. C. R., Laurindo, F. J. B., & Gonçalves, R. F. (2023). A web-based software for group decision with analytic hierarchy process. *MethodsX*, 11, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102277>
- Frish, S., Talmor, I., Hadar, O., Shoshany, M., & Shapira, A. (2025). Enhancing consistency of AHP-based expert judgements: A new approach and its implementation in an interactive tool. *MethodsX*, 14, 103341. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103341>
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3), 469–487. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Hagos, Y. G., Andualem, T. G., Yibeltal, M., & Natnew, Y. (2022). Flood hazard assessment and mapping using GIS integrated with multi-criteria decision analysis in upper Awash River basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 12, 148. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01674-8>
- Ho, W., & Ma, X. (2018). The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 267(2), 399–414. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.007>
- Marhaeni, M., Dinata, R. M., Sofwan, A., Suryadi, D., & Purnomo, N. (2026). Desain dan implementasi sistem presensi portabel berbasis Internet of Things dengan validasi multi-faktor untuk akuntabilitas tenaga kerja lapangan. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 6(2), 651–662.
- Purwono, R., & Mustika, L. (2018). Rekayasa lansekap untuk penanganan banjir (studi kasus: Bukit Duri, Kampung Pulo, Kampung Melayu dan Kali Bata Jakarta). *Sabua: Jurnal Lingkungan Binaan dan Arsitektur*, 8(3), 32–39. <https://doi.org/10.35793/sabua.v8i3.18922>
- Puspitasari, D., Hizbaron, D. R., & Mei, E. T. W. (2026). An urban flood-risk assessment of South Jakarta, Indonesia: A methodological approach through frequency ratio, receiver operating curve and analytic hierarchy process. *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*, 18(1), 1873. <https://doi.org/10.4102/jamba.v18i1.1873>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process: What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Salomon, V. A. P., & Gomes, L. F. A. M. (2024). Consistency improvement in the analytic hierarchy process. *Mathematics*, 12(6), 828.

- <https://doi.org/10.3390/math12060828>
Shrestha, S., Dahal, D., Poudel, B., Banjara, M., & Kalra, A. (2025). Flood susceptibility analysis with integrated geographic information system and analytical hierarchy process: A multi-criteria framework for risk assessment and mitigation. *Water*, 17(7), 937.
<https://doi.org/10.3390/w17070937>
- Susanto, F., Hadi, H. S., & Dinata, R. M. (2023). Application of expert system for identification of damage to computers with web-based forward chaining method. *Jurnal STMIK Surya Intan*, 10(2), 312–323.
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), 3465–3484.
<https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2>
- Waseem, M., Ahmad, S., Ahmad, I., Wahab, H., Raja, I. A., & Khan, N. M. (2023). Urban flood risk assessment using AHP and geospatial techniques in Swat, Pakistan. *SN Applied Sciences*, 5, 215.
<https://doi.org/10.1007/s42452-023-05445-1>