

Pengembangan dan Evaluasi Simulatif Indeks Prioritas Pemeliharaan Jalan Berbasis Fuzzy AHP–SAW Menggunakan Parameter Kerusakan Permukaan serta Intensitas Lalu Lintas

Arizi Majdanawan^{*1}, Prihatin Timur², Reja Putra Jaya³, Sigit Umar Anggono⁴

Email: arizimajdanawan@stekom.ac.id, prihatin.timur2@stekom.ac.id, rejaputra@stekom.ac.id, sigitumaranggono@stekom.ac.id

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-5450-7165> ⁽²⁾; <https://orcid.org/0009-0005-1104-9701> ⁽³⁾; <https://orcid.org/0000-0002-8044-0668> ⁽⁴⁾

^{1,2,3,4}Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia

*Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: Fuzzy AHP; road maintenance; Simple Additive Weighting; surface distress; traffic intensity.	<i>Limited road maintenance budgets require transparent prioritization methods that integrate pavement condition and road-use intensity. This study develops and evaluates, through structured simulation, a Road Maintenance Priority Index using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Simple Additive Weighting (FAHP–SAW). Twelve hypothetical flexible-pavement sections were represented by seven criteria: cracking, potholes, rutting, ravelling, edge deterioration, traffic volume, and heavy-vehicle proportion. All numerical inputs, including the decision matrix and pairwise-comparison matrices, are treated as simulated data for methodological proof-of-concept rather than field observations. FAHP generated demonstration weights, while SAW produced relative scores and rankings. Sensitivity analysis yielded Spearman correlations of 0.9860–0.9930 with a maximum one-position shift; however, A_{11} and A_5 differed by only 0.29 points and were therefore interpreted as a near-tie priority group. Correlation analysis further showed very high redundancy among the five distress criteria (Pearson $r = 0.997$–0.999; Spearman $\rho = 1.000$), indicating potential double counting. The framework is transparent and traceable, but empirical application requires field data, independently elicited expert weights, multicollinearity control, and a clear separation between section prioritization and maintenance-treatment selection.</i>
Kata Kunci: Fuzzy AHP; intensitas lalu lintas; kerusakan permukaan; pemeliharaan jalan; Simple Additive Weighting.	Abstrak Keterbatasan anggaran pemeliharaan jalan menuntut metode prioritas yang transparan dan mampu mengintegrasikan kondisi perkerasan dengan intensitas pemanfaatan ruas. Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi secara simulatif Indeks Prioritas Pemeliharaan Jalan menggunakan Fuzzy Analytical Hierarchy Process dan Simple Additive Weighting (FAHP–SAW). Dua belas ruas hipotetik direpresentasikan oleh tujuh kriteria: retak, lubang, alur, pelepasan butir, kerusakan tepi, volume lalu lintas, dan proporsi kendaraan berat. Seluruh input numerik, termasuk matriks keputusan dan matriks perbandingan berpasangan, diposisikan sebagai data simulasi terstruktur untuk proof-of-concept metodologis, bukan hasil observasi lapangan. FAHP menghasilkan bobot demonstratif, sedangkan SAW membentuk skor dan ranking relatif. Analisis sensitivitas menghasilkan korelasi Spearman 0,9860–0,9930 dengan perpindahan maksimum satu posisi; namun A_{11} dan A_5 hanya berbeda 0,29 poin sehingga ditafsirkan sebagai kelompok prioritas near-tie. Uji korelasi juga menunjukkan redundansi sangat tinggi pada lima kriteria kerusakan (Pearson $r = 0,997$ – $0,999$; Spearman $\rho = 1,000$), sehingga terdapat risiko double counting.



I. PENDAHULUAN

Kebutuhan penanganan jaringan jalan umumnya lebih besar daripada anggaran yang tersedia. Kondisi tersebut menuntut pengelola menyusun urutan intervensi karena tidak seluruh ruas dapat ditangani secara bersamaan [1], [2]. Menegaskan bahwa keterbatasan anggaran menjadi dasar pemilihan proyek rehabilitasi dan pemeliharaan berdasarkan faktor relevan. [3] dan [4] juga menunjukkan bahwa prioritas pemeliharaan dapat dirumuskan melalui indeks matematis. Namun, indeks berbasis persamaan empiris belum selalu mampu menjelaskan dasar pembobotan, proses penilaian, dan pengaruh kriteria terhadap urutan penanganan ruas. Penggunaan indeks terstruktur juga diperlukan agar hasil pemeringkatan dapat dipertanggungjawabkan kepada pemangku kepentingan dan penyusun anggaran daerah.

Kondisi fisik perkerasan merupakan komponen utama karena jenis, tingkat keparahan, dan luas kerusakan mencerminkan penurunan fungsi jalan [3]. Meskipun demikian, tingkat kerusakan saja belum cukup menentukan urgensi apabila tidak dikaitkan dengan intensitas pemanfaatan ruas. Jalan dengan kerusakan sedang tetapi dilalui arus kendaraan tinggi dapat menimbulkan dampak operasional lebih luas daripada ruas dengan kerusakan berat tetapi berarus rendah. [1] menjelaskan bahwa keputusan pemeliharaan perlu mempertimbangkan kinerja perkerasan, kekuatan struktur, beban lalu lintas, umur perkerasan, dan kelas jalan. Karena itu, integrasi kerusakan permukaan dan intensitas lalu lintas diperlukan agar penilaian mencerminkan kondisi aset dan pengguna terdampak.

Kerusakan permukaan menunjukkan kebutuhan teknis, sedangkan intensitas lalu lintas merepresentasikan fungsi pelayanan dan tingkat paparan pengguna. [4] menunjukkan bahwa prioritas pemeliharaan dapat dibentuk berdasarkan kondisi lapangan terukur. [5] juga menempatkan kondisi perkerasan dan volume lalu lintas sebagai komponen penting dalam prioritas. Kedua parameter mewakili dimensi berbeda sehingga dominasi salah satunya dapat menghasilkan prioritas tidak seimbang. Oleh sebab itu, diperlukan model agregasi yang mempertahankan kontribusi kedua parameter dalam satu indeks yang konsisten dan transparan.

Penentuan prioritas pemeliharaan jalan merupakan persoalan pengambilan keputusan multikriteria karena melibatkan indikator dengan karakteristik berbeda. Bobot kriteria ditentukan tidak hanya oleh data pengamatan, tetapi juga penilaian profesional mengenai konsekuensi teknis dan operasional. Analytical Hierarchy Process digunakan karena mampu menyusun persoalan secara hierarkis dan menghasilkan bobot. [3] menunjukkan bahwa AHP merepresentasikan pertimbangan teknis lebih sistematis daripada indeks empiris tanpa dasar keputusan jelas. Namun, nilai tegas pada AHP konvensional belum sepenuhnya mengakomodasi keraguan pakar saat membandingkan antarkriteria.

Fuzzy Analytical Hierarchy Process memperluas AHP dengan merepresentasikan penilaian berpasangan dalam bentuk bilangan fuzzy. [6] mengembangkan pendekatan extent analysis menggunakan triangular fuzzy number untuk mengolah penilaian yang tidak dapat dinyatakan secara presisi. Istilah linguistik diterjemahkan ke dalam rentang batas bawah, tengah, dan atas. Dalam pemeliharaan jalan, FAHP mengurangi kekakuan saat pakar membandingkan konsekuensi berbagai jenis kerusakan. Metode ini relevan karena evaluasi visual masih dipengaruhi pengalaman evaluator. Dengan demikian, FAHP menghasilkan bobot yang lebih toleran terhadap ketidakpastian.

Bobot hasil FAHP memerlukan metode agregasi untuk mengubah kinerja setiap ruas menjadi skor prioritas. Simple Additive Weighting menormalisasi nilai alternatif, mengalikannya dengan bobot kriteria, kemudian menjumlahkan menjadi nilai preferensi. Struktur aditif tersebut memungkinkan pengaruh kriteria ditelusuri dan memudahkan perbandingan antaralternatif. Kombinasi FAHP-SAW memisahkan tahap penentuan kepentingan kriteria dari pemeringkatan ruas sehingga proses keputusan lebih transparan dan dapat direplikasi.

Penelitian terdahulu telah menerapkan metode multikriteria dengan rancangan berbeda. [3] menggunakan AHP untuk membentuk prioritas pemeliharaan, [4] mengembangkan objective-based AHP berbasis data kondisi aktual, sedangkan [7] mengembangkan model prioritas berbasis GPR dan menguji sensitivitasnya. Studi lain menggunakan Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS, FAHP-VIKOR, AHP-TOPSIS, dan ANP untuk memisahkan tahap pembobotan dan pemeringkatan atau untuk mengevaluasi skema penanganan. Namun, penerapan FAHP sebagai metode pembobotan dan SAW sebagai agregasi sederhana yang secara eksplisit mengintegrasikan kerusakan permukaan serta intensitas lalu lintas masih relatif terbatas.

Keandalan model prioritas juga dipengaruhi kestabilan hasil ketika bobot berubah. Bobot berbasis penilaian pakar dapat berbeda akibat variasi komposisi pakar, karakteristik jaringan, atau kebijakan pemeliharaan. Perubahan kecil dapat menggeser posisi alternatif, terutama ketika beberapa ruas memiliki skor berdekatan. Karena itu, penelitian ini tidak hanya membentuk skor SAW, tetapi juga menguji konsistensi ranking melalui skenario perubahan bobot.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi secara simulatif indeks prioritas pemeliharaan jalan yang mengintegrasikan kerusakan permukaan dan intensitas lalu lintas menggunakan FAHP-SAW. FAHP digunakan untuk membentuk bobot relatif dari matriks penilaian terstruktur, sedangkan SAW menormalisasi kinerja, menghitung skor preferensi, dan menyusun ranking ruas hipotetik. Kebaruan penelitian terletak pada pengembangan indeks yang sederhana untuk ditelusuri dan pada evaluasi eksplisit terhadap sensitivitas bobot, kedekatan skor,

serta redundansi antarkriteria. Hasil pada tahap ini diposisikan sebagai proof-of-concept metodologis dan belum sebagai bukti empiris jaringan jalan tertentu.

II. PENELITIAN TERKAIT

Pemeliharaan jalan pada tingkat jaringan menuntut penilaian terhadap banyak ruas untuk menentukan urutan intervensi ketika seluruh kebutuhan tidak dapat ditangani sekaligus karena keterbatasan anggaran [1], [3]. Pada tingkat jaringan, keputusan tidak hanya menyangkut kondisi perkerasan, tetapi juga alokasi sumber daya, target kinerja, dan pada beberapa sistem bahkan pertimbangan pemerataan antardistrik [3]. Dalam praktiknya, pemeringkatan digunakan untuk memilih ruas yang didahulukan di antara banyak kandidat penanganan. [3] menegaskan bahwa indeks empiris memang praktis, tetapi sering tidak memiliki makna fisik yang jelas dan dapat menyembunyikan pengaruh masing-masing faktor pembentuk prioritas. Karena itu, struktur keputusan yang lebih eksplisit diperlukan agar penilaian prioritas lebih dekat dengan pertimbangan teknis pengelola jalan

A. Parameter Kondisi Perkerasan dan Intensitas Lalu Lintas

Kondisi perkerasan dalam korpus banyak direpresentasikan dengan Pavement Condition Index yang menilai kerusakan berdasarkan jenis distress, densitas, dan tingkat keparahan pada skala 0 sampai 100 [3]. Pendekatan berbasis distress mempertahankan informasi kerusakan seperti retak, lubang, alur, ravelling, deformasi, dan tambalan, sehingga lebih informatif daripada indeks tunggal yang tidak menjelaskan kontribusi tiap komponen [7]. Kritik utama terhadap indeks empiris adalah bahwa penggabungan faktor ke dalam satu angka dapat menutupi karakteristik aktual distress.

Karakteristik operasional diperlukan untuk melengkapi informasi kondisi fisik. Dua ruas dengan tingkat kerusakan serupa dapat memiliki urgensi berbeda apabila volume dan komposisi lalu lintasnya tidak sama. Studi pemeliharaan jaringan menunjukkan bahwa kondisi perkerasan dan faktor lalu lintas dapat secara bersama-sama memengaruhi urutan prioritas [5], [8]. Karena itu, kerusakan permukaan dan intensitas lalu lintas diperlakukan sebagai dimensi yang saling melengkapi: yang pertama menggambarkan kebutuhan teknis, sedangkan yang kedua menunjukkan besarnya paparan pelayanan.

B. Pendekatan MCDM dalam Pemeliharaan Jalan

Prioritas pemeliharaan termasuk dalam permasalahan Multi-Criteria Decision-Making karena melibatkan indikator dengan satuan, arah preferensi, dan tingkat kepentingan berbeda. Studi pavement-management telah menggabungkan kondisi jalan dengan biaya, aspek lingkungan, dan kinerja sosial dalam kerangka multikriteria [9]–[11]. Kerangka sustainability-informed juga

memasukkan kriteria seperti keselamatan, kebisingan, dan polusi dalam proses ranking pavement sections [12], sedangkan ANP telah digunakan untuk memasukkan faktor sosial dan ekonomi serta hubungan antarkriteria [23]. Beragamnya kriteria tersebut memperlihatkan pentingnya prosedur pembobotan dan agregasi yang dapat diperiksa secara transparan.

AHP banyak diterapkan karena mampu menyusun tujuan, kriteria, dan alternatif dalam struktur hierarkis. [3] membandingkan AHP distributif, ideal, dan absolut serta menemukan bahwa AHP absolut lebih sesuai ketika alternatif yang dinilai berjumlah besar. [13] dan [14] menggunakan AHP untuk membentuk bobot faktor dan menghasilkan ranking pemeliharaan tingkat jaringan. [4] kemudian mengembangkan objective-based AHP dengan memanfaatkan data kerusakan lapangan agar penilaian lebih dekat dengan kondisi terukur. Namun, penggunaan nilai tegas belum sepenuhnya mengakomodasi perbedaan interpretasi pakar terhadap konsekuensi setiap kriteria.

C. Fuzzy AHP dalam Penentuan Bobot

FAHP mengatasi keterbatasan tersebut dengan merepresentasikan perbandingan berpasangan dalam bentuk bilangan fuzzy. [6] mengembangkan metode extent analysis yang menggunakan triangular fuzzy number untuk menghasilkan bobot dari penilaian linguistik. Rentang nilai fuzzy memungkinkan preferensi pakar dinyatakan tanpa harus dipaksakan menjadi satu angka pasti. Karakteristik ini relevan ketika kriteria teknis dan operasional sulit dibandingkan secara absolut.

Penerapan fuzzy dalam pemeliharaan jalan telah dilakukan melalui berbagai kombinasi. [2] menggabungkan AHP dan logika fuzzy untuk memprioritaskan rehabilitasi jalan perkotaan, sedangkan [15] membandingkan Fuzzy AHP dan Fuzzy TOPSIS. [16] dan [17] menggunakan FAHP untuk pembobotan dan VIKOR untuk menentukan solusi kompromi, [18] menerapkan teknik komputasi lunak dalam penilaian kondisi perkerasan. Studi-studi tersebut menunjukkan relevansi pendekatan fuzzy, tetapi metode agregasi yang digunakan masih beragam dan umumnya memerlukan prosedur perhitungan yang relatif kompleks.

D. Simple Additive Weighting sebagai Metode Pemeringkatan

SAW menentukan nilai alternatif melalui penjumlahan kinerja yang telah dinormalisasi dan dikalikan dengan bobot kriteria. Landasan model aditif dapat ditelusuri pada konsep pengukuran nilai berbobot oleh [19] serta teori utilitas aditif oleh [20]. [21] menjelaskan bahwa struktur aditif memungkinkan kontribusi setiap kriteria terhadap skor akhir dihitung secara langsung. Sifat ini penting ketika hasil pemeringkatan perlu dijelaskan kepada pengelola jalan dan pemangku kepentingan lainnya.

Normalisasi dalam SAW diperlukan agar nilai dengan satuan berbeda dapat dibandingkan dalam skala yang sama. Pada penelitian prioritas pemeliharaan, nilai kerusakan dan intensitas lalu lintas diperlakukan sebagai peningkat urgensi, sehingga skor yang lebih besar menunjukkan kebutuhan penanganan yang lebih tinggi. FAHP dan SAW memiliki fungsi yang terpisah tetapi saling melengkapi. FAHP menghasilkan bobot yang mengakomodasi ketidakpastian penilaian, sedangkan SAW mengagregasikan kinerja aktual setiap ruas secara transparan.

E. Analisis Sensitivitas dalam Model Prioritas

Tabel 1. Ringkasan penelitian terdahulu mengenai prioritas pemeliharaan jalan

Penelitian	Metode	Parameter atau fokus utama	Temuan utama	Keterbatasan terhadap penelitian ini
[3]	AHP distributif, ideal, absolut	Aktivitas pemeliharaan perkerasan	AHP absolut efektif untuk banyak alternatif	Belum memodelkan ketidakpastian dengan fuzzy
[2]	AHP + logika fuzzy	Rehabilitasi/pemeliharaan jalan perkotaan	Fuzzy merepresentasikan ketidakpastian penilaian	Agregasi berbeda; fokus kriteria tidak sama
[15]	Fuzzy AHP + Fuzzy TOPSIS	Kondisi perkerasan dan prioritas	Kedua metode menghasilkan ranking prioritas	Bukan integrasi FAHP-SAW
[16]	FAHP-VIKOR	Indeks perkerasan dan alternatif pemeliharaan	FAHP untuk bobot; VIKOR untuk solusi kompromi	Prosedur ranking lebih kompleks
[4]	Objective-based AHP	Data kerusakan perkerasan	Data objektif memperkuat penentuan prioritas	Ketidakpastian pakar belum difuzzifikasi
[17]	AHP + analisis sensitivitas	Keputusan pemeliharaan tingkat jaringan	AHP menghasilkan prioritas dan sensitivitas bobot	AHP tegas; tidak menggunakan SAW
[18]	Soft computing / FAHP	Penilaian kondisi perkerasan	Mendukung evaluasi kondisi multikriteria	Fokus utama pada condition assessment
[22]	IMO-DRSA	Tujuan pemeliharaan dan alokasi anggaran	Aturan keputusan interaktif untuk tindakan pemeliharaan	Membutuhkan interaksi/optimasi lebih kompleks
[23]	ANP	Faktor sosial-ekonomi dan lingkungan	Memperluas dasar prioritas proyek	Fokus proyek dan dependensi antarkriteria
[24]	AHP-TOPSIS	Preventive maintenance jalan	Bobot AHP dan kedekatan ke solusi ideal	Berorientasi pemilihan treatment, bukan indeks ruas
[25]	Pavement management system	PCI/IRI dan strategi pemeliharaan	Menghubungkan kondisi dengan strategi pemeliharaan	Fokus pada sistem manajemen dan treatment
[26]	AHP + GIS	Kondisi, lalu lintas, kecepatan, tata guna lahan	Integrasi kondisi dan karakteristik jalan untuk prioritas	AHP tegas dan konteks jaringan spesifik

Pemeringkatan MCDM dapat berubah ketika bobot kriteria dimodifikasi. [17] menunjukkan bahwa analisis sensitivitas pada keputusan pemeliharaan tingkat jaringan penting untuk menilai seberapa kuat hasil terhadap perubahan faktor keputusan. Pada SAW, hasil juga dipengaruhi oleh struktur trade-off weights yang digunakan [21]. Oleh karena itu, pengujian sensitivitas diperlukan untuk membedakan alternatif yang stabil dari alternatif yang hanya unggul pada satu konfigurasi bobot.

Tabel 1 memperlihatkan pergeseran dari indeks empiris menuju model MCDM yang menggabungkan beberapa tujuan dan kriteria. Pendekatan fuzzy kemudian berkembang untuk mengakomodasi ketidakpastian penilaian, sedangkan metode hibrida digunakan untuk memisahkan proses pembobotan dan pemeringkatan. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian menggunakan AHP tegas, FAHP–VIKOR, Fuzzy TOPSIS, ANP, atau model optimasi interaktif. Kombinasi FAHP–SAW yang secara khusus mengintegrasikan kerusakan permukaan dan intensitas lalu lintas masih belum banyak digunakan.

Kesenjangan lain terletak pada keseimbangan antara ketelitian metode dan kemudahan implementasi. Model yang kompleks dapat menghasilkan evaluasi komprehensif, tetapi menyulitkan pembaruan rutin pada instansi dengan sumber daya analitis terbatas. Sebaliknya, pendekatan yang terlalu sederhana kurang mampu menangkap ketidakpastian penilaian dan perbedaan kepentingan antarkriteria. Selain itu, analisis sensitivitas belum selalu digunakan untuk memeriksa kestabilan ranking. Kondisi ini menunjukkan perlunya model yang menggabungkan pembobotan yang fleksibel, agregasi yang mudah ditelusuri, dan pengujian ketahanan hasil.

Penelitian ini menempatkan FAHP sebagai metode pembobotan dan SAW sebagai metode penyusunan indeks prioritas dalam lingkungan simulasi terstruktur. Kerusakan permukaan digunakan untuk merepresentasikan kebutuhan teknis, sedangkan intensitas lalu lintas menggambarkan tingkat pemanfaatan dan dampak pelayanan. Model menghasilkan skor preferensi, ranking ruas hipotetik, evaluasi perubahan posisi melalui beberapa skenario sensitivitas, serta uji korelasi untuk mendeteksi potensi redundansi antarkriteria. Tahap simulasi digunakan untuk menguji logika metode sebelum validasi lapangan dilakukan.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif metodologis dengan kerangka Multi-Criteria Decision-Making untuk mengembangkan Indeks Prioritas Pemeliharaan Jalan (IPPJ). Pada versi penelitian ini, seluruh nilai numerik yang dianalisis—termasuk matriks kondisi ruas, profil lalu lintas, dan matriks perbandingan berpasangan—merupakan data simulasi terstruktur yang disusun untuk menguji perilaku metode. Dua belas alternatif hipotetik (A_1 – A_{12}) merepresentasikan ruas jalan berperkerasan lentur, sedangkan tujuh kriteria mewakili kerusakan permukaan dan intensitas

lalu lintas. Karena belum menggunakan observasi lapangan aktual, hasil tidak ditafsirkan sebagai kondisi jaringan jalan tertentu.

Struktur alternatif simulasi dirancang menyerupai kondisi yang lazim ditemui pada evaluasi tingkat jaringan: setiap ruas hipotetik memiliki panjang minimal konseptual 500 m, dapat dibagi menjadi unit 100 m, dan mempunyai kombinasi tingkat kerusakan serta lalu lintas yang berbeda. Nilai disusun agar mencakup kasus kerusakan tinggi–lalu lintas rendah, kerusakan rendah–lalu lintas tinggi, serta kombinasi menengah. Desain ini dimaksudkan sebagai stress-test terhadap logika agregasi, bukan sebagai pengganti survei lapangan. Implementasi empiris pada tahap berikutnya harus menggunakan lokasi, panjang ruas, unit inspeksi, periode pengamatan, dokumentasi lapangan, dan rekaman lalu lintas yang dapat diaudit.

A. Variabel dan Pengumpulan Data

Penilaian prioritas menggunakan tujuh kriteria yang mewakili kondisi permukaan dan intensitas lalu lintas. Dimensi kerusakan permukaan terdiri atas retak, lubang, alur, pelepasan butir, dan kerusakan tepi. Dimensi intensitas lalu lintas terdiri atas volume lalu lintas rata-rata dan proporsi kendaraan berat. Seluruh kriteria diperlakukan sebagai peningkat prioritas dalam model simulasi karena nilai yang lebih tinggi didefinisikan sebagai representasi urgensi yang lebih besar. Definisi operasional simulatif setiap variabel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Definisi operasional variabel penelitian

Kode	Kriteria	Definisi operasional	Satuan	Sumber data
C ₁	Retak	Luas retak berbobot tingkat keparahan terhadap luas ruas	%	Data simulasi terstruktur
C ₂	Lubang	Jumlah lubang berbobot per kilometer	titik/km	Data simulasi terstruktur
C ₃	Alur	Kedalaman alur rata-rata pada jejak roda	mm	Data simulasi terstruktur
C ₄	Pelepasan butir	Luas pelepasan butir berbobot terhadap luas ruas	%	Data simulasi terstruktur
C ₅	Kerusakan tepi	Panjang kerusakan tepi berbobot terhadap panjang ruas	%	Data simulasi terstruktur
C ₆	Volume lalu lintas	Rata-rata kendaraan bermotor per hari survei	kendaraan/hari	Data simulasi terstruktur
C ₇	Kendaraan berat	Proporsi kendaraan berat terhadap total kendaraan bermotor	%	Data simulasi terstruktur

Untuk membentuk data kerusakan terstruktur, setiap jenis distress diasumsikan memiliki tiga tingkat keparahan: rendah, sedang, dan tinggi. Faktor 1, 2, dan 3 digunakan sebagai pengkodean ordinal internal untuk mempertahankan urutan tingkat keparahan ketika nilai suatu distress diagregasikan. Faktor tersebut bukan koefisien teknis terkalibrasi dan tidak diklaim sebagai standar fisik. Penggunaan skala berjarak sama merupakan asumsi penyederhanaan pada tahap

simulasi; pada studi lapangan, faktor ini harus diganti atau dikalibrasi menggunakan manual inspeksi, data historis, atau model kerusakan yang relevan.

Kepadatan lubang berbobot dihitung menggunakan:

$$C_{2i} = \frac{N_{L,i} + 2N_{M,i} + 3N_{H,i}}{L_i} \quad (1)$$

Kedalaman alur rata-rata dihitung menggunakan rumus (2).

$$C_{3i} = \frac{\sum_{q=1}^{Q_i} d_{iq}}{Q_i} \quad (2)$$

Nilai pelepasan butir berbobot dihitung menggunakan rumus (3).

$$C_{4i} = \frac{A_{PL,i} + 2A_{PM,i} + 3A_{PH,i}}{3A_i} \times 100 \quad (3)$$

Kerusakan tepi berbobot dihitung menggunakan (4).

$$C_{5i} = \frac{E_{L,i} + 2E_{M,i} + 3E_{H,i}}{3L_i} \times 100 \quad (4)$$

dengan A_i merupakan luas konseptual permukaan ruas, L_i merupakan panjang konseptual ruas, dan Q_i merupakan jumlah titik pengukuran alur pada skenario simulasi. Notasi RL, RM, dan RH menunjukkan retak pada keparahan rendah, sedang, dan tinggi; PL, PM, dan PH menunjukkan pelepasan butir; EL, EM, dan EH menunjukkan kerusakan tepi; sedangkan NL, NM, dan NH menunjukkan jumlah lubang. Faktor keparahan hanya berfungsi sebagai pengkodean ordinal dalam jenis kerusakan yang sama dan berbeda dari bobot kepentingan FAHP.

Profil lalu lintas juga disusun sebagai data simulasi dengan struktur yang meniru pencacahan tiga hari: dua hari kerja dan satu akhir pekan, masing-masing direkap sebagai nilai harian. Struktur tiga hari dipilih hanya untuk mendemonstrasikan pengolahan data dan tidak dianggap mewakili Average Annual Daily Traffic atau variasi musiman. Karena itu, tidak digunakan faktor koreksi tahunan pada tahap ini. Pada penerapan empiris, periode pengamatan harus diperpanjang atau dikoreksi menggunakan faktor hari, musim, atau data lalu lintas tahunan dari instansi terkait.

Volume lalu lintas rata-rata dihitung menggunakan rumus (5).

$$C_{6i} = \frac{V_{i1} + V_{i2} + V_{i3}}{3} \quad (5)$$

Proporsi kendaraan berat dihitung menggunakan rumus (6).

$$C_{7i} = \frac{H_i}{V_i} \times 100 \quad (6)$$

dengan V_{i1} , V_{i2} , dan V_{i3} merupakan volume simulasi pada hari pertama, kedua, dan ketiga. H_i merupakan jumlah kendaraan berat simulasi, sedangkan V_i merupakan jumlah seluruh kendaraan bermotor simulasi pada alternatif ke- i . Nilai akhir dipertahankan dalam bentuk numerik agar variasi antaralternatif tidak hilang akibat klasifikasi awal, kemudian disusun dalam matriks keputusan SAW.

B. Pembobotan Menggunakan Fuzzy AHP

Pembobotan FAHP menggunakan lima matriks penilaian berpasangan simulatif (P_1 – P_5) yang dirancang untuk merepresentasikan variasi penilaian profesional terhadap urgensi pemeliharaan. Matriks ini bukan hasil wawancara pakar aktual. Masing-masing matriks diperiksa konsistensinya menggunakan prosedur AHP; matriks yang memenuhi $CR \leq 0,10$ kemudian dikonversi menjadi triangular fuzzy numbers dengan extent analysis Chang [6]. Dengan posisi ini, bobot yang dihasilkan diperlakukan sebagai bobot demonstratif untuk pengujian metode, bukan konsensus empiris dari panel pakar.

Tabel 3. Skala linguistik dan bilangan fuzzy segitiga

Intensitas	Definisi	Bilangan fuzzy
1	Sama penting	(1, 1, 1)
2	Antara sama dan sedikit lebih penting	(1, 2, 3)
3	Sedikit lebih penting	(2, 3, 4)
4	Antara sedikit dan lebih penting	(3, 4, 5)
5	Lebih penting	(4, 5, 6)
6	Antara lebih dan sangat lebih penting	(5, 6, 7)
7	Sangat lebih penting	(6, 7, 8)
8	Antara sangat dan mutlak lebih penting	(7, 8, 9)
9	Mutlak lebih penting	(8, 9, 9)

Bilangan fuzzy segitiga dinyatakan sebagai berikut:

$$\tilde{M}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \quad (7)$$

Nilai kebalikan dari penilaian tersebut dihitung menggunakan rumus (8).

$$\tilde{M}_{ji} = \tilde{M}_{ij}^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}} \right) \quad (8)$$

Konsistensi penilaian diuji melalui *Consistency Index* dan *Consistency Ratio*. Nilai eigen maksimum diperoleh dari matriks perbandingan tegas sebelum dilakukan proses fuzzifikasi. Karena penelitian menggunakan tujuh kriteria, nilai *Random Index* yang digunakan adalah 1,32. Matriks diterima apabila nilai CR tidak melebihi 0,10. Matriks yang belum memenuhi ketentuan dikembalikan kepada pakar untuk ditinjau kembali.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

Penilaian lima pakar yang telah konsisten diagregasikan menggunakan rata-rata geometrik fuzzy. Agregasi dilakukan secara terpisah terhadap batas bawah, nilai tengah, dan batas atas. Metode ini mempertahankan sifat resiprokal matriks dan mengurangi dominasi nilai ekstrem. Nilai hasil agregasi digunakan untuk membentuk matriks fuzzy kelompok. Perhitungannya dilakukan menggunakan rumus (11).

$$\tilde{M}_{ij} = \left[\left(\prod_{k=1}^p l_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{p}}, \left(\prod_{k=1}^p m_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{p}}, \left(\prod_{k=1}^p u_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (11)$$

dengan p merupakan jumlah pakar. Nilai *fuzzy synthetic extent* kemudian dihitung untuk setiap kriteria dengan menjumlahkan nilai pada setiap baris dan mengalikannya dengan invers jumlah seluruh elemen matriks. Tahap ini menghasilkan satu bilangan fuzzy yang mewakili posisi relatif setiap kriteria. Nilai tersebut selanjutnya dibandingkan melalui derajat kemungkinan. Persamaan *synthetic extent* dituliskan sebagai berikut:

$$\tilde{S}_i = \left(\sum_{j=1}^n \tilde{M}_{ij} \right) \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{M}_{ij} \right)^{-1} \quad (12)$$

Derajat kemungkinan digunakan untuk menentukan dominasi relatif antara dua nilai *synthetic extent*. Setiap kriteria dibandingkan dengan seluruh kriteria lainnya, kemudian nilai minimum dari hasil perbandingan digunakan sebagai bobot awal. Prosedur ini mempertahankan ketidakpastian penilaian sampai tahap penentuan prioritas relatif. Bobot awal selanjutnya dinormalisasi agar jumlahnya sama dengan satu. Rumus yang digunakan adalah rumus 13 dan 14.

$$d_i = \min V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_k), k \neq i \quad (13)$$

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (14)$$

Bobot akhir harus memenuhi ketentuan (15) dan (16).

$$0 \leq w_i \leq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (16)$$

C. Pemeringkatan SAW dan Pembentukan IPPJ

Matriks keputusan simulasi terdiri atas 12 baris alternatif dan tujuh kolom kriteria. Perbedaan satuan antarvariabel diatasi melalui normalisasi SAW. Seluruh kriteria diperlakukan sebagai benefit terhadap urgensi pemeliharaan, bukan benefit terhadap kualitas jalan. Normalisasi maksimum pada persamaan (17) mengasumsikan utilitas keputusan yang monoton dan linier dalam rentang data simulasi: kenaikan nilai kriteria menghasilkan kenaikan kontribusi skor secara proporsional. Asumsi ini merupakan penyederhanaan matematis SAW dan tidak berarti bahwa hubungan fisik antara kerusakan dan konsekuensi teknis selalu linier. Pada studi empiris, fungsi utilitas piecewise, threshold-based, atau nonlinier perlu diuji apabila tersedia batas teknis yang lebih representatif.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (17)$$

dengan r_{ij} merupakan nilai normalisasi alternatif ke- i pada kriteria ke- j dan x_{ij} merupakan nilai awal simulasi. Alternatif dengan nilai terbesar pada suatu kriteria memperoleh nilai normalisasi satu, sedangkan alternatif lain dinyatakan secara proporsional terhadap nilai maksimum simulasi. Karena skala ini bersifat relatif terhadap himpunan alternatif, skor tidak boleh ditafsirkan sebagai ukuran absolut kondisi teknis.

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (18)$$

dengan V_i merupakan nilai preferensi alternatif ke- i , w_j merupakan bobot kriteria, dan r_{ij} merupakan nilai normalisasi. Alternatif diurutkan berdasarkan nilai V_i dari terbesar hingga terkecil. Nilai terbesar ditempatkan pada ranking pertama karena menunjukkan kombinasi kerusakan dan intensitas lalu lintas paling kritis. Kontribusi setiap kriteria terhadap skor akhir tetap dapat ditelusuri melalui hasil perkalian $w_j r_{ij}$. Karakteristik tersebut memungkinkan alasan suatu ruas memperoleh prioritas tinggi dijelaskan secara transparan.

Nilai preferensi dikonversi menjadi Indeks Prioritas Pemeliharaan Jalan agar lebih mudah dibaca oleh pengelola jalan. Konversi dilakukan ke skala 0–100 tanpa mengubah urutan alternatif. Nilai indeks yang lebih besar menunjukkan kebutuhan penanganan yang semakin mendesak. Penghitungan indeks dilakukan menggunakan rumus (19).

$$IPPJ_i = 100 \times V_i \quad (19)$$

Kategori prioritas dibentuk berdasarkan kuintil distribusi IPPJ dan karena itu bersifat relatif terhadap 12 alternatif simulasi. Label sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi hanya menunjukkan posisi relatif di dalam himpunan ini; label tersebut bukan threshold teknis absolut dan tidak ekuivalen dengan tingkat kerusakan standar. Ruas dapat masuk kuintil teratas

hanya karena memiliki skor relatif paling besar dalam sampel. Pada aplikasi lapangan, kategori relatif sebaiknya dilengkapi dengan threshold teknis atau aturan intervensi yang dikalibrasi.

D. Analisis Sensitivitas dan Validasi

Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah struktur bobot dan menghitung kembali skor serta ranking seluruh alternatif. Perubahan mencakup peningkatan bobot kelompok kerusakan, peningkatan bobot lalu lintas, penurunan bobot kriteria dominan, dan penggunaan bobot sama. Setelah modifikasi, seluruh bobot dinormalisasi kembali agar jumlahnya tetap satu. Hasil setiap skenario dibandingkan dengan ranking dasar FAHP-SAW. Skenario yang digunakan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Skenario analisis sensitivitas

Skenario	Perubahan bobot
S ₀	Bobot awal FAHP
S ₁	Bobot C ₁ –C ₅ dinaikkan 10%
S ₂	Bobot C ₁ –C ₅ diturunkan 10%
S ₃	Bobot C ₆ dinaikkan 20%
S ₄	Bobot C ₇ dinaikkan 20%
S ₅	Bobot C ₆ dan C ₇ dinaikkan 15%
S ₆	Seluruh kriteria diberi bobot sama
S ₇	Bobot kriteria dominan diturunkan 20%

Bobot pada skenario ke-*s* dinormalisasi menggunakan rumus (20).

$$w_j^{(s)} = \frac{w_j (1 + \delta_j^{(s)})}{\sum_{k=1}^n w_k (1 + \delta_k^{(s)})} \quad (20)$$

Stabilitas ranking dievaluasi menggunakan korelasi Spearman dan rata-rata perubahan absolut ranking. Korelasi yang mendekati satu menunjukkan bahwa urutan alternatif relatif stabil. Nilai perubahan absolut yang rendah menunjukkan perpindahan posisi yang terbatas. Kedua ukuran digunakan bersama karena korelasi tinggi belum selalu menjamin bahwa ruas pada kelompok prioritas utama tidak berubah. Persamaannya dituliskan sebagai persamaan 21 dan 22.

$$\rho^{(s)} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m (d_i^{(s)})^2}{m(m^2 - 1)} \quad (21)$$

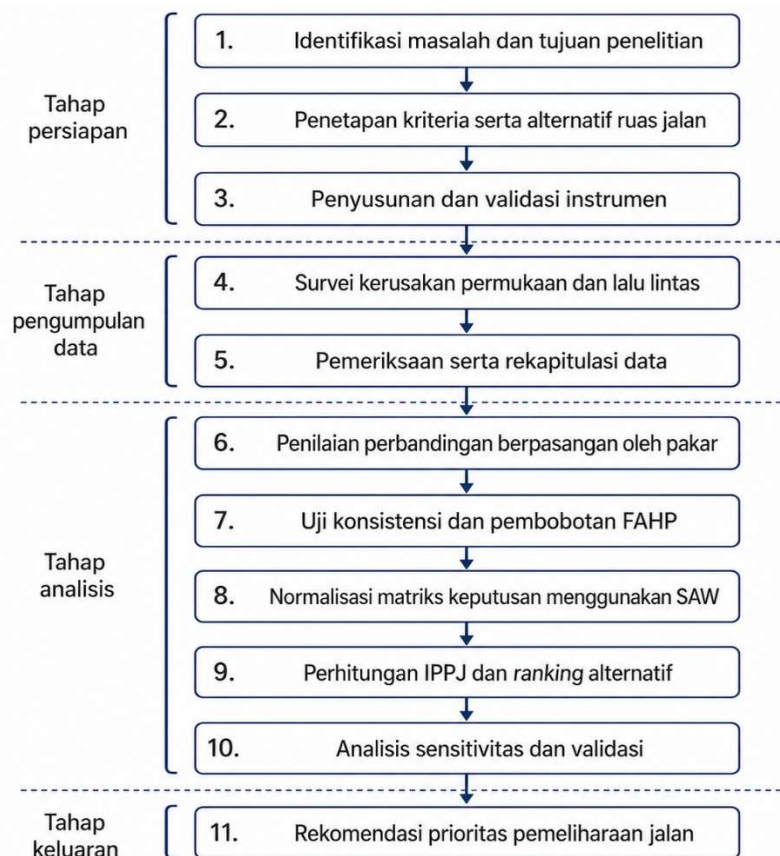
$$MARC^{(s)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |R_i^{(s)} - R_i^{(0)}| \quad (22)$$

Evaluasi internal model dilakukan melalui uji konsistensi matriks simulasi, verifikasi perhitungan, analisis sensitivitas bobot, dan pemeriksaan korelasi antarkriteria. Tidak dilakukan validasi pakar independen pada tahap ini karena seluruh input numerik diposisikan sebagai simulasi. Oleh sebab itu, ukuran seperti CR, korelasi Spearman antar-skenario, dan kestabilan

ranking hanya menunjukkan konsistensi internal model, bukan validitas empiris terhadap keputusan praktisi. Validasi eksternal memerlukan panel independen dan data lapangan aktual pada penelitian lanjutan.

E. Alur Penelitian

Penelitian dilaksanakan sebagai alur pengembangan dan evaluasi simulatif. Tahap awal menetapkan kriteria serta struktur alternatif, kemudian membentuk data kondisi dan lalu lintas sintetis, menyusun matriks penilaian berpasangan simulatif, menguji konsistensi, menghitung bobot FAHP, melakukan normalisasi SAW, membentuk IPPJ, serta menguji sensitivitas dan redundansi kriteria. Alur pada Gambar 1 dipahami sebagai kerangka implementasi; tahap pengumpulan data lapangan pada gambar merupakan tahapan yang harus dilakukan ketika model divalidasi secara empiris.



Gambar 1. Diagram alir pengembangan dan evaluasi simulatif IPPJ; tahap survei menunjukkan alur implementasi empiris yang direncanakan.

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Karakteristik Kerusakan Permukaan dan Lalu Lintas

Data simulasi pada 12 alternatif menunjukkan variasi yang cukup lebar pada seluruh kriteria. Nilai retak berada pada rentang 8,9–28,3%, kepadatan lubang 2,8–14,1 titik/km, dan kedalaman alur

6,2–18,1 mm. Volume lalu lintas simulasi berkisar 11.900–26.700 kendaraan/hari, dengan proporsi kendaraan berat 8,2–15,2%. Matriks keputusan yang digunakan dalam pengujian SAW disajikan pada Tabel 5. Seluruh nilai pada bagian hasil ini harus dibaca sebagai keluaran simulasi, bukan hasil survei jalan aktual.

Tabel 5. Matriks keputusan simulasi alternatif ruas jalan

Alternatif	C ₁ Retak (%)	C ₂ Lubang (titik/km)	C ₃ Alur (mm)	C ₄ Pelepasan butir (%)	C ₅ Kerusakan tepi (%)	C ₆ Lalu lintas (kendaraan/hari)	C ₇ Kendaraan berat (%)
A ₁	18,4	8,6	12,2	15,6	11,8	14.800	9,8
A ₂	12,7	5,2	8,6	9,4	7,6	21.600	12,4
A ₃	25,1	12,4	16,8	21,3	16,2	13.200	8,7
A ₄	9,8	3,1	6,9	7,1	5,4	25.200	14,1
A ₅	21,6	10,8	14,7	18,9	13,9	18.400	11,3
A ₆	14,9	6,4	9,4	11,8	8,7	16.500	10,6
A ₇	28,3	14,1	18,1	23,5	18,4	11.900	8,2
A ₈	11,2	4,6	7,8	8,7	6,8	23.100	13,5
A ₉	19,5	9,7	13,5	16,7	12,6	20.100	12,1
A ₁₀	16,1	7,3	10,7	13,1	9,9	17.600	10,9
A ₁₁	23,7	11,5	15,9	20,2	15,1	15.400	9,4
A ₁₂	8,9	2,8	6,2	6,5	4,7	26.700	15,2



Gambar 2. Heatmap karakteristik data simulasi kerusakan permukaan dan intensitas lalu lintas setiap alternatif.

Alternatif A₇ menunjukkan nilai tertinggi pada seluruh parameter kerusakan permukaan simulasi, tetapi mempunyai volume lalu lintas paling rendah. Sebaliknya, A₁₂ memiliki nilai kerusakan relatif lebih kecil namun volume dan proporsi kendaraan berat tertinggi. Pola tersebut sengaja dibentuk untuk menguji apakah integrasi dua dimensi mampu mencegah keputusan ditentukan

oleh satu kelompok kriteria saja. Visualisasi pada Gambar 2 menunjukkan karakteristik data simulasi tersebut.

Statistik deskriptif menunjukkan bahwa kepadatan lubang mempunyai koefisien variasi terbesar, yaitu 46,44%. Kerusakan tepi dan pelepasan butir juga memperlihatkan variasi tinggi dengan koefisien masing-masing sebesar 40,65 dan 40,42%. Volume lalu lintas mempunyai variasi yang lebih rendah dibandingkan sebagian besar indikator kerusakan. Proporsi kendaraan berat menjadi kriteria paling homogen dengan koefisien variasi sebesar 19,26%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbedaan alternatif lebih banyak dipengaruhi oleh variasi kondisi permukaan daripada variasi komposisi kendaraan.

Tabel 6. Statistik deskriptif data simulasi

Kriteria	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Simpangan baku	Koefisien variasi (%)
C ₁ Retak	8,90	28,30	17,52	6,32	36,07
C ₂ Lubang	2,80	14,10	8,04	3,73	46,44
C ₃ Alur	6,20	18,10	11,73	4,06	34,62
C ₄ Pelepasan butir	6,50	23,50	14,40	5,82	40,42
C ₅ Kerusakan tepi	4,70	18,40	10,93	4,44	40,65
C ₆ Volume lalu lintas	11.900	26.700	18.708,33	4.716,60	25,21
C ₇ Kendaraan berat	8,20	15,20	11,35	2,19	19,26

B. Konsistensi Penilaian Pakar dan Bobot FAHP

Kelima matriks perbandingan berpasangan simulatif memenuhi batas konsistensi yang ditetapkan. Nilai CR berada pada rentang 0,0359–0,0634. Nilai ini menunjukkan bahwa skenario penilaian yang dibentuk konsisten secara matematis, tetapi tidak dapat ditafsirkan sebagai bukti konsistensi panel pakar aktual. Ringkasan uji konsistensi disajikan pada Tabel 7. Pada skenario pembobotan simulatif, FAHP menempatkan volume lalu lintas sebagai kriteria dengan bobot terbesar (0,21), diikuti lubang (0,20) dan retak (0,18). Kedalaman alur dan proporsi kendaraan berat memperoleh bobot 0,13 dan 0,12, sedangkan pelepasan butir dan kerusakan tepi memiliki bobot lebih kecil. Bobot ini digunakan semata-mata untuk mengevaluasi perilaku model dan harus diestimasi ulang dari panel nyata pada studi empiris.

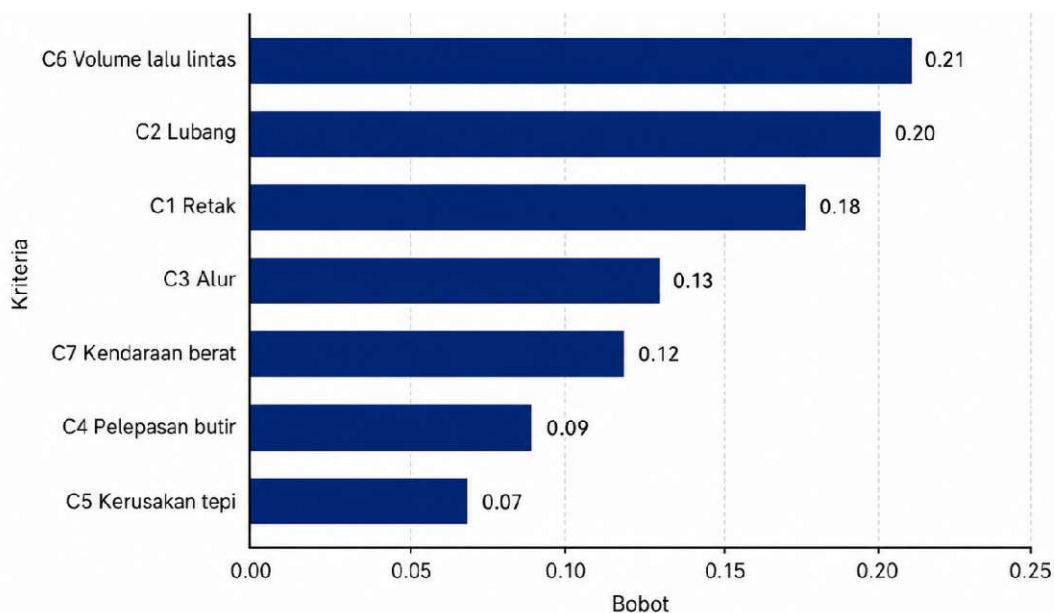
Tabel 7. Hasil uji konsistensi matriks penilaian simulatif

Pakar	λ_{maks}	CI	RI	CR	Status
P1 (sim.)	7,284	0,0473	1,32	0,0359	Konsisten
P2 (sim.)	7,416	0,0693	1,32	0,0525	Konsisten
P3 (sim.)	7,338	0,0563	1,32	0,0427	Konsisten
P4 (sim.)	7,502	0,0837	1,32	0,0634	Konsisten
P5 (sim.)	7,371	0,0618	1,32	0,0468	Konsisten

Bobot gabungan lima kriteria kerusakan mencapai 0,67, sedangkan dua kriteria lalu lintas menyumbang 0,33. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan teknis tetap menjadi dasar utama penentuan prioritas. Meskipun demikian, volume dan komposisi kendaraan memiliki pengaruh yang cukup besar untuk mengubah posisi ruas dengan kondisi kerusakan yang berdekatan. Perbandingan bobot antarkriteria ditampilkan pada Gambar 3.

Tabel 8. Bobot kriteria hasil Fuzzy AHP pada skenario simulasi

Ranking	Kriteria	Nilai d_i	Bobot	Persentase (%)
1	C ₆ Volume lalu lintas	0,84	0,21	21
2	C ₂ Lubang	0,80	0,20	20
3	C ₁ Retak	0,72	0,18	18
4	C ₃ Alur	0,52	0,13	13
5	C ₇ Kendaraan berat	0,48	0,12	12
6	C ₄ Pelepasan butir	0,36	0,09	9
7	C ₅ Kerusakan tepi	0,28	0,07	7
	Jumlah	4,00	1,00	100



Gambar 3. Distribusi bobot kriteria hasil Fuzzy AHP pada skenario simulasi.

C. Nilai Indeks dan Ranking Prioritas

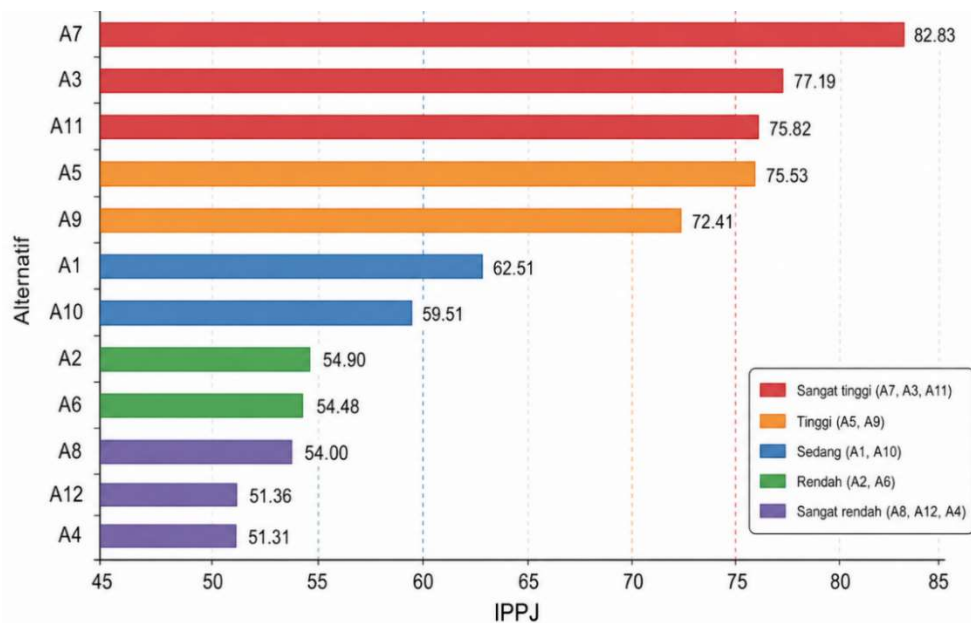
Normalisasi SAW menghasilkan nilai kinerja relatif 0–1 untuk setiap alternatif simulasi. Nilai tersebut dikalikan dengan bobot FAHP untuk memperoleh skor preferensi dan IPPJ. Secara numerik, A₇, A₃, dan A₁₁ berada pada tiga posisi teratas dengan IPPJ 82,83; 77,19; dan 75,82. Urutan lengkap disajikan pada Tabel 9, tetapi ranking ini merupakan hasil demonstrasi model dan tidak merujuk pada ruas jalan aktual.

Selisih IPPJ A₁₁ dan A₅ hanya 0,29 poin. Perbedaan sekecil ini tidak diperlakukan sebagai pemisahan substantif. Kedua alternatif ditempatkan dalam satu kelompok prioritas operasional yang sama (near-tie group), sedangkan urutan 3–4 hanya dipertahankan sebagai keluaran numerik

SAW. Pendekatan kelompok ini mengurangi kesan kepastian berlebihan dan konsisten dengan analisis sensitivitas, karena A_{11} dan A_5 dapat bertukar posisi ketika bobot kerusakan atau lalu lintas diubah.

Tabel 9. Nilai preferensi, IPPJ, dan ranking relatif alternatif simulasi

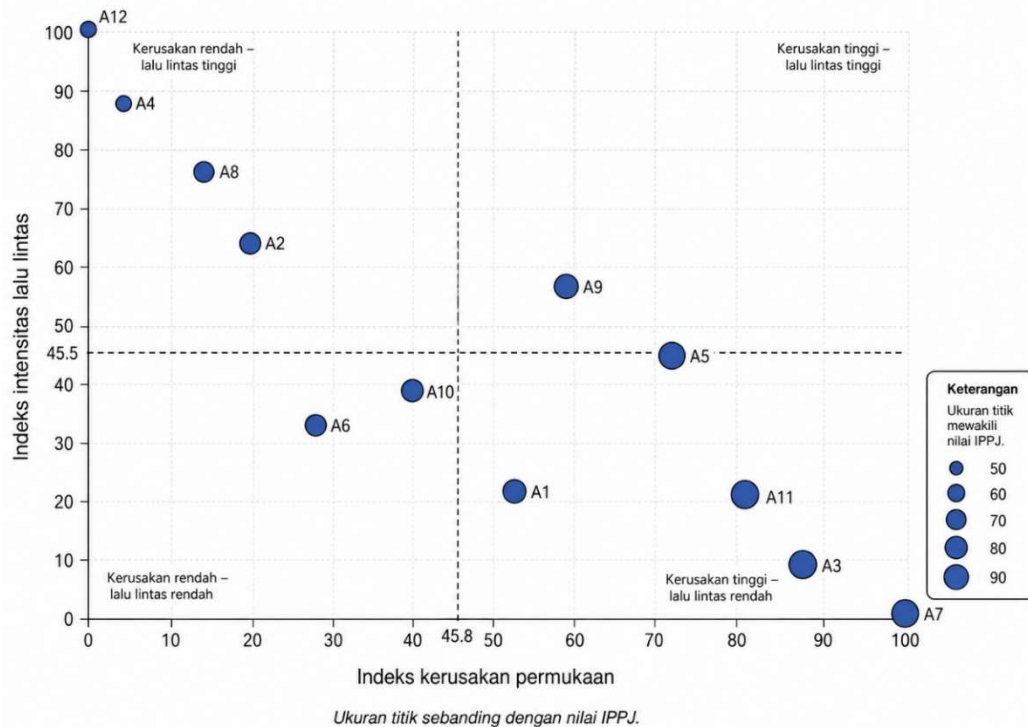
Ranking	Alternatif	Nilai preferensi	IPPJ	Kategori	Kontributor dominan
1	A_7	0,8283	82,83	Sangat tinggi (relatif)	Lubang
2	A_3	0,7719	77,19	Sangat tinggi (relatif)	Lubang
3	A_{11}	0,7582	75,82	Sangat tinggi (relatif)	Lubang; near-tie A_{11} – A_5
4	A_5	0,7553	75,53	Tinggi (relatif)	Lubang; near-tie A_{11} – A_5
5	A_9	0,7241	72,41	Tinggi (relatif)	Volume lalu lintas
6	A_1	0,6251	62,51	Sedang (relatif)	Lubang
7	A_{10}	0,5951	59,51	Sedang (relatif)	Volume lalu lintas
8	A_2	0,5490	54,90	Rendah (relatif)	Volume lalu lintas
9	A_6	0,5448	54,48	Rendah (relatif)	Volume lalu lintas
10	A_8	0,5400	54,00	Sangat rendah (relatif)	Volume lalu lintas
11	A_{12}	0,5136	51,36	Sangat rendah (relatif)	Volume lalu lintas
12	A_4	0,5131	51,31	Sangat rendah (relatif)	Volume lalu lintas



Gambar 4. Ranking IPPJ pada dataset simulasi.

D. Hubungan Kerusakan Permukaan dan Intensitas Lalu Lintas

Pemetaan dua dimensi memperlihatkan bahwa A_3 , A_5 , A_9 , dan A_{11} berada pada kelompok kerusakan serta lalu lintas relatif tinggi. A_7 menempati kuadran kerusakan tinggi–lalu lintas rendah, tetapi tetap memperoleh skor terbesar karena kondisi fisiknya jauh lebih buruk dibandingkan alternatif lain. A_4 , A_8 , dan A_{12} berada pada kelompok kerusakan rendah–lalu lintas tinggi. Ketiga ruas tersebut memerlukan pemantauan, tetapi belum mengungguli ruas dengan kerusakan lebih berat dalam ranking dasar. Posisi setiap alternatif berdasarkan dua dimensi keputusan ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Posisi alternatif simulasi berdasarkan kerusakan permukaan dan intensitas lalu lintas.

Pola simulasi memperlihatkan bahwa integrasi dua dimensi mencegah ranking ditentukan langsung oleh satu nilai ekstrem. Ruas hipotetik dengan lalu lintas tinggi tidak otomatis berada pada prioritas pertama ketika nilai kerusakannya rendah, sedangkan kerusakan sangat tinggi dapat menghasilkan urgensi besar meskipun volume lalu lintas lebih kecil. Namun, karena lima indikator distress pada data simulasi ternyata sangat berkorelasi, interpretasi agregat harus mempertimbangkan potensi double counting yang dianalisis pada Subbagian F.

Tabel 10. Hasil analisis sensitivitas ranking simulasi

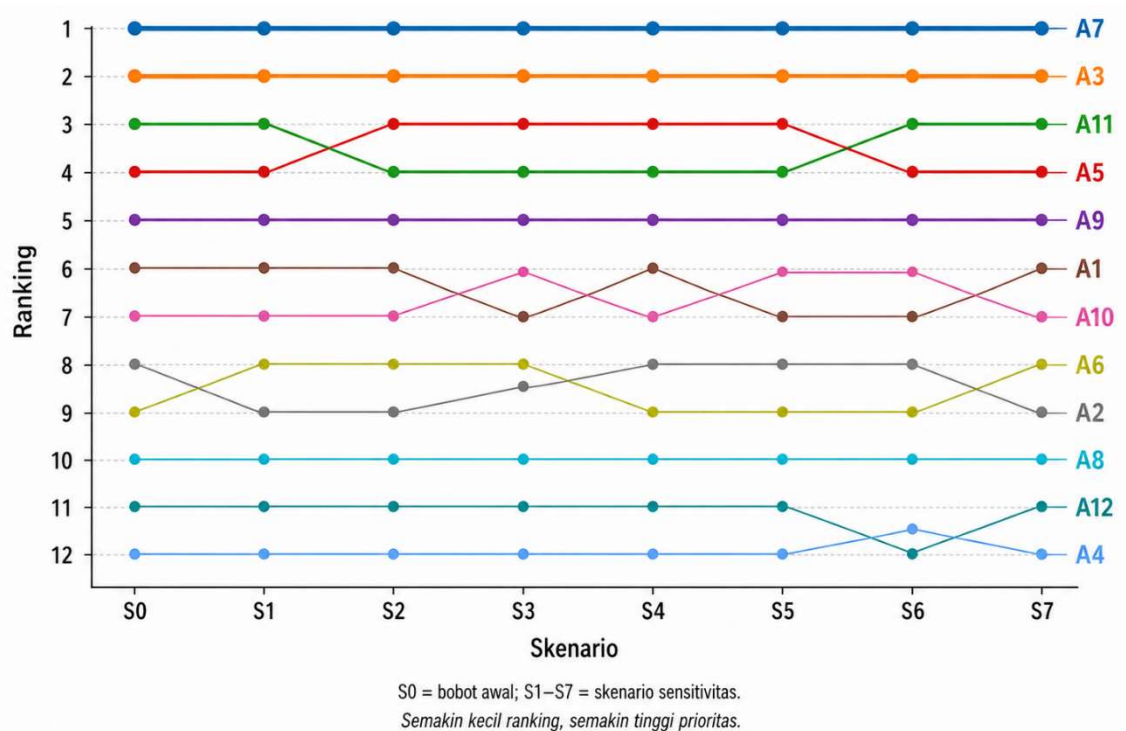
Skenario	Perubahan bobot	Spearman ρ	MARC	Perubahan maksimum	Kesamaan tiga besar (%)
S ₀	Bobot awal FAHP	1,0000	0,00	0	100,00
S ₁	C ₁ –C ₅ dinaikkan 10%	0,9860	0,33	1	100,00
S ₂	C ₁ –C ₅ diturunkan 10%	0,9860	0,33	1	66,67
S ₃	C ₆ dinaikkan 20%	0,9860	0,33	1	66,67
S ₄	C ₇ dinaikkan 20%	0,9930	0,17	1	66,67
S ₅	C ₆ dan C ₇ dinaikkan 15%	0,9860	0,33	1	66,67
S ₆	Bobot sama	0,9860	0,33	1	100,00
S ₇	Bobot kriteria dominan diturunkan 20%	0,9930	0,17	1	100,00

E. Analisis Sensitivitas

Perubahan bobot menghasilkan korelasi Spearman 0,9860–0,9930 terhadap ranking dasar simulasi, dengan MARC 0,17–0,33 dan perpindahan maksimum satu posisi. A₇ dan A₃ tetap

berada pada dua posisi teratas. Perubahan anggota tiga besar terjadi ketika pengaruh kerusakan diturunkan atau bobot lalu lintas dinaikkan, yaitu A_5 menggantikan A_{11} . Temuan ini menunjukkan bahwa urutan global relatif stabil terhadap variasi bobot yang diuji, tetapi alternatif dengan skor sangat berdekatan tetap tidak stabil secara ordinal.

Penggunaan bobot sama pada S_6 tidak mengubah komposisi tiga alternatif teratas. Namun, kestabilan ini tidak boleh dibaca sebagai validasi empiris; ia hanya menunjukkan bahwa struktur angka simulasi menghasilkan urutan yang relatif tahan terhadap skenario bobot yang diuji. Pergeseran A_{11} – A_5 menegaskan pentingnya melaporkan kelompok prioritas, bukan hanya ranking tunggal. Perubahan posisi pada seluruh skenario disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perubahan ranking alternatif simulasi pada skenario analisis sensitivitas.

F. Uji Korelasi dan Potensi Double Counting

Pemeriksaan korelasi menunjukkan bahwa lima kriteria kerusakan permukaan (C_1 – C_5) pada data simulasi memiliki korelasi Pearson sangat tinggi, yaitu 0,997–0,999, dan korelasi Spearman sebesar 1,000 untuk seluruh pasangan. Temuan ini menunjukkan bahwa pola simulasi membuat tingkat distress bergerak hampir identik antaralternatif. Dalam kondisi seperti ini, memasukkan kelima indikator secara terpisah berpotensi menghitung sinyal kondisi yang sama lebih dari sekali. Oleh karena itu, hasil dasar dipertahankan hanya sebagai demonstrasi mekanisme FAHP–SAW, sedangkan interpretasinya dibatasi. Pada studi empiris, korelasi, VIF, atau analisis faktor perlu dilakukan sebelum agregasi; kriteria yang sangat redundan dapat digabungkan ke indeks distress komposit, direduksi bobotnya, atau dimodelkan dengan struktur nonkompensatoris.

Tabel 11. Korelasi antarkriteria dan indikasi redundansi pada data simulasi

Pasangan kriteria	Pearson r	Spearman ρ	Interpretasi
C ₁ –C ₂	0,997	1,000	Sangat tinggi
C ₁ –C ₃	0,997	1,000	Sangat tinggi
C ₁ –C ₄	0,997	1,000	Sangat tinggi
C ₁ –C ₅	0,999	1,000	Sangat tinggi
C ₂ –C ₃	0,997	1,000	Sangat tinggi
C ₂ –C ₄	0,998	1,000	Sangat tinggi
C ₂ –C ₅	0,999	1,000	Sangat tinggi
C ₃ –C ₄	0,998	1,000	Sangat tinggi
C ₃ –C ₅	0,998	1,000	Sangat tinggi
C ₄ –C ₅	0,998	1,000	Sangat tinggi
C ₆ –C ₇	0,995	0,993	Sangat tinggi
C ₁ –C ₅ (rentang)	0,997–0,999	1,000	Redundansi sangat kuat

Korelasi sangat tinggi di antara C₁–C₅ menegaskan bahwa ranking simulasi tidak boleh dipandang sebagai bukti bahwa lima distress tersebut memberikan informasi independen. Sebaliknya, C₆ dan C₇ juga sangat berkorelasi (Pearson 0,995; Spearman 0,993), sehingga struktur data simulasi secara keseluruhan memang dirancang dengan pola berurutan yang kuat. Temuan ini menjadi batasan utama dan sekaligus justifikasi untuk pengujian ulang menggunakan data lapangan yang lebih heterogen.

Diskusi

A. Struktur Bobot dan Makna Teknis Kriteria

Pada skenario simulasi, volume lalu lintas, lubang, dan retak memperoleh bobot individual terbesar. Interpretasi bobot ini harus dibatasi karena matriks penilaian bukan berasal dari panel pakar aktual. Secara metodologis, pembobotan menunjukkan bagaimana FAHP dapat menyeimbangkan dimensi kebutuhan teknis dan paparan pelayanan. Namun, uji korelasi mengungkap bahwa lima indikator distress pada data simulasi memiliki redundansi sangat tinggi; karena itu, kontribusi masing-masing indikator tidak boleh dibaca sebagai pengaruh empiris yang terpisah.

Temuan simulatif ini konsisten dengan literatur yang menempatkan kondisi perkerasan dan faktor lalu lintas sebagai komponen penting dalam prioritas tingkat jaringan. Li et al. [17] menggunakan AHP untuk membentuk ranking berdasarkan kinerja perkerasan, kekuatan struktur, beban lalu lintas, umur perkerasan, dan kelas jalan. Moazami et al. [2] memasukkan kondisi perkerasan dan volume lalu lintas ke dalam model prioritas berbasis fuzzy logic, sedangkan Ahmed et al. [4] menunjukkan bahwa data kondisi objektif dapat memperkuat penentuan prioritas. Perbandingan tersebut mendukung struktur konseptual model, tetapi bukan validasi terhadap angka simulasi pada penelitian ini.

B. Interpretasi Ranking Prioritas

A₇ berada pada ranking pertama simulasi karena mempunyai nilai tertinggi pada seluruh parameter kerusakan permukaan. Namun, karena indikator C₁–C₅ bergerak hampir identik, posisi tersebut sebagian mencerminkan redundansi data, bukan lima bukti independen. A₃ berada pada urutan berikutnya, sedangkan A₁₁ dan A₅ diperlakukan sebagai near-tie group karena selisih IPPJ hanya 0,29 dan keduanya dapat bertukar posisi pada skenario sensitivitas. Dengan demikian, keluaran model sebaiknya dibaca sebagai kelompok urgensi relatif sebelum keputusan proyek dibuat.

Posisi A₉ memperlihatkan pengaruh dimensi lalu lintas yang lebih kuat dibanding beberapa alternatif dengan kerusakan serupa. Akan tetapi, sifat aditif SAW memungkinkan kompensasi antar-kriteria; skor tinggi pada satu dimensi dapat mengimbangi nilai lebih rendah pada dimensi lain. Karena itu, ranking tidak boleh dijadikan diagnosis kerusakan atau keputusan treatment. Matriks kriteria harus tetap diperiksa bersama skor agregat.

C. Integrasi Kerusakan dan Intensitas Lalu Lintas

Perbandingan A₇ dan A₁₂ memberikan gambaran paling jelas mengenai fungsi integrasi dua dimensi keputusan. A₇ memiliki kerusakan paling berat dengan lalu lintas relatif rendah, sedangkan A₁₂ mempunyai kondisi permukaan paling ringan tetapi melayani volume kendaraan terbesar. Model tetap menempatkan A₇ pada urutan pertama dan A₁₂ pada kelompok bawah karena kontribusi lalu lintas tidak dirancang untuk sepenuhnya menggantikan kebutuhan teknis. Pada saat yang sama, nilai lalu lintas mencegah ruas dengan aktivitas tinggi kehilangan perhatian hanya karena kerusakannya belum mencapai tingkat ekstrem. Pendekatan ini menghasilkan prioritas yang lebih proporsional daripada pemeringkatan yang hanya memakai kondisi permukaan atau volume kendaraan.

Alternatif dengan nilai kerusakan dan lalu lintas sama-sama tinggi dapat ditempatkan pada kelompok perhatian awal, tetapi model hanya menentukan urutan atau kelompok prioritas ruas. Model tidak memilih jenis tindakan pemeliharaan. Keputusan penambalan, overlay, rehabilitasi, atau rekonstruksi memerlukan pemeriksaan tambahan terhadap kapasitas struktural, penyebab kerusakan, drainase, keselamatan, biaya, umur sisa, dan standar teknis. Pemisahan antara prioritas ruas dan pemilihan treatment ini penting agar IPPJ tidak digunakan di luar fungsi yang dirancang.

D. Posisi FAHP–SAW terhadap Penelitian Terdahulu

Penggunaan FAHP memperluas pendekatan AHP yang telah digunakan untuk prioritas pemeliharaan jalan. Farhan dan Fwa [3] menunjukkan bahwa AHP dapat merepresentasikan pertimbangan teknis secara lebih eksplisit daripada indeks empiris. Chang [6] menyediakan landasan metodologis extent analysis untuk triangular fuzzy numbers, tetapi tidak membahas

pemeringkatan ruas jalan; karena itu, referensi tersebut hanya digunakan untuk prosedur FAHP. Penelitian pavement-specific seperti Ouma et al. [15] dan Babashamsi et al. [16] memberikan dasar yang lebih langsung untuk membandingkan penggunaan metode fuzzy pada pemeliharaan perkerasan.

Ouma et al. [15] membandingkan Fuzzy AHP dan Fuzzy TOPSIS untuk prioritas pemeliharaan perkerasan dan memperoleh urutan yang relatif berdekatan. Babashamsi et al. [16] mengintegrasikan FAHP dan VIKOR dengan beberapa indeks jaringan perkerasan. Studi lain juga menggunakan AHP–TOPSIS untuk mengevaluasi skema preventive maintenance [24] serta pendekatan indikator berbobot yang menggabungkan pothole count, IRI, dan PCI [25]. Perbedaan penelitian ini terletak pada penggunaan SAW sebagai agregator sederhana dan pada evaluasi eksplisit terhadap near-tie serta redundansi kriteria.

Kesederhanaan SAW menjadi kelebihan ketika model ditujukan untuk penggunaan rutin oleh instansi pengelola jalan. Setiap skor akhir dapat diuraikan menjadi kontribusi retak, lubang, alur, pelepasan butir, kerusakan tepi, volume lalu lintas, dan kendaraan berat. Struktur ini memudahkan pemeriksa untuk menjelaskan alasan suatu ruas memperoleh posisi tertentu tanpa harus menafsirkan jarak terhadap solusi ideal atau nilai kompromi. Namun, sifat aditif SAW juga memungkinkan nilai rendah pada satu kriteria dikompensasi oleh nilai tinggi pada kriteria lain. Oleh sebab itu, hasil ranking perlu dibaca bersama matriks kerusakan dan tidak digunakan secara otomatis untuk menentukan jenis pekerjaan.

E. Stabilitas Ranking

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa ranking simulasi relatif stabil terhadap perubahan bobot yang diuji. Akan tetapi, korelasi tinggi antar-kriteria berarti kestabilan tersebut sebagian dipengaruhi struktur data yang sangat teratur. Oleh karena itu, nilai Spearman 0,9860–0,9930 tidak diposisikan sebagai bukti robustness empiris, melainkan sebagai hasil internal dari dataset simulasi. Uji lapangan dengan variasi distress yang lebih independen tetap diperlukan.

Perubahan anggota tiga besar pada beberapa skenario memperlihatkan bahwa alternatif dengan skor berdekatan sensitif terhadap orientasi bobot. Pergeseran A_{11} dan A_5 memperkuat keputusan untuk menempatkan keduanya dalam satu near-tie group. Dalam penerapan praktis, alternatif pada kelompok yang sama dapat dipilah lebih lanjut menggunakan biaya, kesiapan desain, keselamatan, drainase, atau constraint anggaran, bukan dipaksakan sebagai urutan presisi tunggal.

F. Implikasi bagi Pengelolaan Jalan

IPPJ pada tahap ini merupakan prototype decision-support untuk penyaringan awal tingkat jaringan. Dalam implementasi empiris, instansi dapat menggunakan indeks untuk membentuk

kelompok prioritas relatif, lalu melakukan inspeksi rinci terhadap kelompok teratas. Penggunaan tersebut hanya layak setelah bobot dikalibrasi dari panel nyata, data lapangan diperoleh dengan prosedur terdokumentasi, dan redundansi kriteria ditangani.

Model memungkinkan penyesuaian arah kebijakan melalui perubahan bobot dan analisis sensitivitas. Namun, IPPJ tidak menentukan bentuk penanganan seperti penambalan, pelapisan ulang, rehabilitasi, atau rekonstruksi. Treatment selection merupakan tahap terpisah yang memerlukan data struktural, kondisi drainase, keselamatan, biaya, serta diagnosis penyebab kerusakan. Dengan demikian, prioritas ruas dan jenis tindakan harus selalu dipisahkan dalam interpretasi.

G. Kontribusi dan Keterbatasan

Kontribusi metodologis penelitian terletak pada pemisahan pembobotan dan pemeringkatan, penggunaan FAHP untuk merepresentasikan ketidakpastian penilaian, serta penggunaan SAW untuk membentuk skor yang mudah ditelusuri. Revisi ini juga menambahkan evaluasi terhadap asumsi linearitas SAW, near-tie ranking, dan korelasi antarkriteria. Karena seluruh input masih berupa simulasi terstruktur, kontribusi yang dapat diklaim pada tahap ini adalah pengembangan dan pengujian logika model, bukan validasi empiris jaringan jalan.

Keterbatasan utama penelitian adalah seluruh data numerik masih berupa simulasi terstruktur. Tidak terdapat survei aktual terhadap 12 ruas, pencacahan lalu lintas tiga hari, pemeriksaan ulang unit lapangan, ataupun panel pakar independen yang dapat diaudit. Selain itu, skala keparahan 1–2–3 merupakan pengkodean ordinal internal; normalisasi SAW mengasumsikan utilitas linier relatif; kategori kuintil bersifat relatif terhadap sampel; dan C_1 – C_5 menunjukkan korelasi sangat tinggi sehingga terdapat risiko double counting. Karena itu, seluruh nilai IPPJ, ranking, CR, korelasi Spearman sensitivitas, dan bobot hanya berlaku sebagai hasil simulasi metodologis.

Penelitian lanjutan harus menjalankan ulang seluruh analisis menggunakan data lapangan aktual, melaporkan lokasi dan panjang ruas, jumlah unit inspeksi 100 m, periode serta jam pencacahan, dokumentasi kualitas data, dan faktor koreksi lalu lintas apabila diperlukan. Bobot FAHP perlu diperoleh dari panel pakar nyata, sementara validasi ranking sebaiknya menggunakan panel independen atau benchmark operasional yang tidak berasal dari pemberi bobot. Sebelum agregasi, multikolinearitas antarkriteria perlu diuji dan kriteria redundan dapat digabungkan. Selanjutnya, model dapat diperluas dengan PCI, IRI, data struktural, drainase, keselamatan, biaya siklus hidup, GIS, serta optimasi anggaran.

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi secara simulatif Indeks Prioritas Pemeliharaan Jalan berbasis FAHP–SAW yang mengintegrasikan lima parameter kerusakan permukaan dengan volume lalu lintas dan proporsi kendaraan berat. Pada dataset simulasi, A_7 , A_3 , dan A_{11} memperoleh skor tertinggi, tetapi A_{11} dan A_5 harus dibaca sebagai near-tie karena selisih hanya 0,29 poin dan posisinya dapat bertukar pada skenario sensitivitas. Uji korelasi juga menunjukkan redundansi sangat tinggi pada C_1 – C_5 , sehingga potensi double counting harus ditangani sebelum implementasi. Hasil ini membuktikan alur perhitungan dan keterlacakan model, bukan validitas empiris terhadap jaringan jalan aktual. Penerapan praktis memerlukan pengumpulan data lapangan, estimasi bobot dari pakar nyata, validasi independen, evaluasi multikolinearitas, serta pemisahan tegas antara prioritas ruas dan pemilihan treatment.

Conflict of Interest

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik finansial maupun nonfinansial, yang dapat memengaruhi pelaksanaan penelitian, interpretasi hasil, penulisan, maupun publikasi artikel ini.

Data Availability

Dataset yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan data simulasi terstruktur untuk demonstrasi metodologis. Nilai numerik dan hasil ranking tidak merepresentasikan ruas jalan aktual. Data simulasi dan lembar perhitungan dapat disediakan oleh penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. Hadjidemetriou, M. Tsangaris, and S. Christodoulou, “Pavement Condition And Traffic Indices For Prioritizing Road Maintenance,” *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction*, pp. 213–221, 2019, doi: 10.35490/EC3.2019.239.
- [2] D. Moazami, H. Behbahani, and R. Muniandy, “Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 10, pp. 12869–12879, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.ESWA.2011.04.079.
- [3] J. Farhan and T. F. Fwa, “Pavement Maintenance Prioritization Using Analytic Hierarchy Process,” *Transp. Res. Rec.*, no. 2093, pp. 12–24, 2009, doi: 10.3141/2093-02.
- [4] S. Ahmed, P. Vedagiri, and K. V. Krishna Rao, “Prioritization of pavement maintenance sections using objective based Analytic Hierarchy Process,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 158–170, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.IJPRT.2017.01.001.

- [5] A. Nautiyal and S. Sharma, "Scientific approach using AHP to prioritize low volume rural roads for pavement maintenance," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 28, no. 2, pp. 411–429, Mar. 2022, doi: 10.1108/JQME-12-2019-0111.
- [6] D. Y. Chang, "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 95, no. 3, pp. 649–655, Dec. 1996, doi: 10.1016/0377-2217(95)00300-2.
- [7] A. Alzohairy, M. Metawie, E. M. Abdelkader, and M. Marzouk, "GPR-based model for maintenance prioritization of flexible pavement," *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 34, p. 101757, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.TRIP.2025.101757.
- [8] Y. U. Shah, S. S. Jain, and M. Parida, "Evaluation of prioritization methods for effective pavement maintenance of urban roads," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 238–250, 2014, doi: 10.1080/10298436.2012.657798.
- [9] D. A. Putri, A. Efendy, and M. Khalis Ilmi, "Penentuan Prioritas Pemeliharaan Jalan Berbasis Kondisi Permukaan dan Pengambilan Keputusan Multikriteria Menggunakan Metode SDI dan AHP," *Jurnal Konstruksi*, vol. 24, no. 1, pp. 1177–1189–1177–1189, Jun. 2026, doi: 10.33364/KONSTRUKSI/V.24-1.3480.
- [10] J. M. Bryce, G. Flintsch, and R. P. Hall, "A multi criteria decision analysis technique for including environmental impacts in sustainable infrastructure management business practices," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 32, pp. 435–445, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.TRD.2014.08.019.
- [11] J. Santos, J. Bryce, G. Flintsch, and A. Ferreira, "A comprehensive life cycle costs analysis of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 18, no. 8, pp. 727–743, Aug. 2017, doi: 10.1080/10298436.2015.1122190.
- [12] S. Abu Dabous, W. Zeiada, T. Zayed, and R. Al-Ruzouq, "Sustainability-informed multi-criteria decision support framework for ranking and prioritization of pavement sections," *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, p. 118755, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118755.
- [13] J. Huang, C. Han, W. Wei, and C. Zhao, "Analysis of long-term maintenance decision for asphalt pavement based on analytic hierarchy process and network level optimization decision," *Electronic Research Archive*, vol. 31, no. 9, pp. 5894–5916, 2023, doi: 10.3934/ERA.2023299.
- [14] L. Li, D. Guo, L. Teng, C. Peng, and R. Yang, "Sustainable Cold Mix Asphalt Repair: An Analytic Hierarchy Process–Grey Relational Analysis Optimization Framework," *Materials* 2025, Vol. 18, Page 2265, vol. 18, no. 10, p. 2265, May 2025, doi: 10.3390/MA18102265.
- [15] Y. O. Ouma, J. Opudo, and S. Nyambenya, "Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS for Road Pavement Maintenance Prioritization: Methodological Exposition and Case Study," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2015, no. 1, p. 140189, Jan. 2015, doi: 10.1155/2015/140189.
- [16] P. Babashamsi, A. Golzadfar, N. I. M. Yusoff, H. Ceylan, and N. G. M. Nor, "Integrated fuzzy analytic hierarchy process and VIKOR method in the prioritization of pavement

- maintenance activities,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 112–120, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.IJPRT.2016.03.002.
- [17] H. Li, F. Ni, Q. Dong, and Y. Zhu, “Application of analytic hierarchy process in network level pavement maintenance decision-making,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 345–354, 2018, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.09.015.
- [18] A. P. Singh, A. Sharma, R. Mishra, M. Wagle, and A. K. Sarkar, “Pavement condition assessment using soft computing techniques,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 564–581, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.IJPRT.2017.12.006.
- [19] C. W. Churchman and R. L. Ackoff, “An Approximate Measure of Value,” <https://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>, vol. 2, no. 2, pp. 172–187, May 1954, doi: 10.1287/OPRE.2.2.172.
- [20] P. C. Fishburn, “Interdependence and Additivity in Multivariate, Unidimensional Expected Utility Theory,” *Int. Econ. Rev. (Philadelphia)*, vol. 8, no. 3, p. 335, Oct. 1967, doi: 10.2307/2525541.
- [21] F. Ciardiello and A. Genovese, “A comparison between TOPSIS and SAW methods,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 325, no. 2, pp. 967–994, Jun. 2023, doi: 10.1007/S10479-023-05339-W/TABLES/3.
- [22] M. G. Augeri, S. Greco, and V. Nicolosi, “Planning urban pavement maintenance by a new interactive multiobjective optimization approach,” *European Transport Research Review 2019 11:1*, vol. 11, no. 1, pp. 17-, Mar. 2019, doi: 10.1186/S12544-019-0353-9.
- [23] S. Gunathilaka and N. Amarasingha, “Using social and economic factors for ranking pavement maintenance and rehabilitation projects,” *Asian Transport Studies*, vol. 6, p. 100026, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.EASTSJ.2020.100026.
- [24] Y. Liu, C. Yu, F. Guo, X. Zhao, J. Shan, T. Lu, H. Peng, and D. Yuan, “Multi-Criteria Decision-Making Framework (AHP-TOPSIS): Pavement Preventive Maintenance Case Study for Ordinary National Trunk Highways,” *Buildings*, vol. 14, no. 10, p. 3048, 2024, doi: 10.3390/buildings14103048.
- [25] L.-L. Huang, J.-D. Lin, W.-H. Huang, C.-H. Kuo, Y.-S. Chiou, and M.-Y. Huang, “Developing Pavement Maintenance Strategies and Implementing Management Systems,” *Infrastructures*, vol. 9, no. 7, p. 101, 2024, doi: 10.3390/infrastructures9070101.
- [26] M. S. Yamany, S. Khan, and K. Ksaibati, “Hybrid System for Prioritizing Pavement Maintenance and Rehabilitation of Wyoming County Roads,” *International Journal of Pavement Research and Technology 2025 19:8*, vol. 19, no. 8, pp. 2161–2176, Jun. 2025, doi: 10.1007/S42947-025-00566-9.