

PEMODELAN PERSEPSI KEAMANAN PEJALAN KAKI PADA KAWASAN TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD)

Manlian R. A. Simanjuntak¹, Denny M. Sundara^{1*}, Rachmad Irwanto¹,
Irnanda S. Soerjatmodjo², Andi Saidah³

¹Teknik Sipil, FTI, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta

²Teknik Sipil, FT, Universitas Muhammadiyah Jakarta

³Teknik Mesin, FTI, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta

*Email korespondensi: denni.magni@uta45jakarta.ac.id

Abstrak

Keberhasilan pengembangan kawasan berorientasi transit (TOD) sangat bergantung pada kualitas koneksi *first-mile*, khususnya keamanan yang dirasakan (*perceived safety*) oleh pejalan kaki menuju stasiun. Namun, pemodelan konvensional sering kali gagal menangkap sifat persepsi manusia yang subjektif, bertahap, dan ambigu. Penelitian ini mengusulkan kerangka kerja pemodelan berbasis logika fuzzy untuk mensimulasikan tingkat keamanan pejalan kaki dengan mengintegrasikan variabel lingkungan yang kompleks. Sistem Inferensi Fuzzy (FIS) tipe Mamdani dibangun dengan tiga variabel masukan: kualitas pencahayaan, aktivitas pejalan kaki, dan kecepatan lalu lintas. Model dievaluasi menggunakan simulasi grid terstruktur (1.331 vektor) dan simulasi stokastik Monte Carlo (1.000 sampel) untuk memetakan permukaan respons keamanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa keamanan pejalan kaki memiliki karakteristik non-linear dengan efek ambang batas (*threshold*) yang kuat. Kecepatan lalu lintas di atas 50 km/jam ditemukan sebagai faktor pembatal (*override*) negatif yang secara drastis menurunkan skor keamanan meskipun kondisi lain ideal. Sebaliknya, pencahayaan yang memadai dan aktivitas pejalan kaki yang tinggi berfungsi sebagai faktor penguat yang saling bergantung untuk mencapai skor keamanan tertinggi. Pendekatan fuzzy terbukti efektif dalam merepresentasikan kompleksitas persepsi keamanan dan dapat menjadi alat bantu pengambilan kebijakan dalam perencanaan infrastruktur pejalan kaki di kawasan transit.

Kata kunci: Logika Fuzzy, Keamanan Pejalan Kaki, Transit-Oriented Development (TOD), Simulasi Mamdani, First-Mile.

Abstract

The success of Transit-Oriented Development (TOD) depends heavily on the quality of first-mile connections, specifically the perceived safety of pedestrians accessing stations. Conventional modeling often struggles to capture the subjective, gradual, and ambiguous nature of human perception. This study proposes a fuzzy logic-based modeling framework to simulate pedestrian safety levels by integrating complex environmental variables. A Mamdani-type Fuzzy Inference System (FIS) was developed using three input variables: lighting quality, pedestrian activity, and traffic speed. The model was evaluated using structured grid simulations (1,331 vectors) and stochastic Monte Carlo simulations (1,000 samples) to map safety response surfaces. Simulations reveal that pedestrian safety exhibits non-linear characteristics with strong threshold effects. Traffic speeds exceeding 50 km/h act as a dominant negative override, drastically reducing safety scores regardless of other favorable conditions. Conversely, adequate lighting and high pedestrian activity serve as interdependent reinforcement factors necessary to achieve maximum safety levels. The fuzzy approach proves effective in representing the complexity of safety perceptions and serves as a valuable decision-support tool for pedestrian infrastructure planning in transit areas.

Keywords: Fuzzy Logic, Pedestrian Safety, Transit-Oriented Development (TOD), Mamdani Simulation, First-Mile.

1. Pendahuluan

Pengembangan berorientasi transit (*Transit-Oriented Development*/TOD) dan sistem transportasi publik semakin dipandang sebagai strategi penting dalam menciptakan kota yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Konsep ini menekankan integrasi antara sistem transportasi massal dengan tata guna lahan yang mendukung mobilitas pengguna jalan *non-motorized*

(seperti berjalan kaki dan bersepeda). Dalam praktiknya, keberhasilan sistem transportasi publik tidak hanya ditentukan oleh kualitas layanan transit itu sendiri, tetapi juga oleh kemudahan masyarakat dalam mengakses stasiun atau halte. Oleh karena itu, koneksi first-mile dan last-mile menjadi komponen yang sangat krusial dalam keseluruhan sistem mobilitas perkotaan.

First-mile dan *last-mile* yang menghubungkan lokasi asal atau tujuan dengan jaringan transportasi utama multi moda yang meskipun telah berkembang di banyak kota, pengguna tetap harus menempuh jarak tertentu untuk mencapai titik akses tersebut. Dalam banyak kasus, perjalanan ini dilakukan dengan berjalan kaki karena sifatnya yang fleksibel, murah, dan tidak memerlukan infrastruktur tambahan yang kompleks. Namun demikian, keputusan seseorang untuk berjalan kaki menuju stasiun transit tidak hanya dipengaruhi oleh jarak, tetapi juga oleh kualitas lingkungan pejalan kaki yang mereka rasakan sepanjang perjalanan tersebut.

Lingkungan untuk berjalan kaki yang nyaman dan aman dapat meningkatkan minat pengguna untuk memilih menggunakan transportasi publik, bahkan ketika jarak menuju stasiun relatif jauh. Berbagai penelitian dalam bidang perencanaan transportasi dan perancangan kota telah menunjukkan bahwa faktor-faktor lingkungan seperti pencahayaan jalan, tingkat aktivitas pejalan kaki, kecepatan lalu lintas kendaraan, serta visibilitas ruang publik memiliki pengaruh yang kuat terhadap persepsi keamanan seseorang saat berjalan kaki. Faktor-faktor ini tidak hanya berkaitan dengan keselamatan secara objektif, tetapi juga dengan *perceived safety* atau keamanan yang dirasakan oleh individu.

Perceived safety merupakan aspek psikologis yang penting dalam menentukan perilaku perjalanan. Keberadaan orang lain di ruang publik, pencahayaan yang memadai, serta lalu lintas kendaraan yang terkendali dapat meningkatkan rasa aman meskipun kondisi fisik lingkungan tidak sepenuhnya ideal. Dalam konteks aksesibilitas transit, persepsi keamanan ini dapat memengaruhi pilihan rute, waktu perjalanan, bahkan keputusan untuk menggunakan transportasi publik secara keseluruhan.

Meskipun penting, aspek keamanan yang dirasakan sering kali sulit dimodelkan secara kuantitatif. Pendekatan pemodelan konvensional dalam analisis transportasi umumnya menggunakan variabel yang bersifat deterministik dan hubungan yang diasumsikan linear. Dalam pendekatan tersebut, kondisi lingkungan sering direpresentasikan melalui ambang batas tertentu, misalnya tingkat pencahayaan minimum atau volume lalu lintas tertentu yang dianggap aman. Namun, pendekatan semacam ini tidak sepenuhnya mampu menangkap kompleksitas persepsi manusia yang bersifat bertahap, ambigu, dan sangat bergantung pada konteks. Dalam kenyataannya, suatu lingkungan tidak secara tiba-tiba berubah dari “tidak aman” menjadi “aman” hanya karena melewati satu nilai ambang tertentu. Sebaliknya, persepsi keamanan biasanya berkembang secara gradual seiring dengan perubahan kondisi lingkungan.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan yang mampu merepresentasikan ketidakpastian dan sifat gradual dari persepsi manusia menjadi sangat relevan. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah logika fuzzy (*fuzzy logic*). Berbeda dengan logika klasik yang bersifat biner, logika fuzzy memungkinkan suatu variabel memiliki derajat keanggotaan pada beberapa kategori sekaligus. Sebagai contoh, kondisi pencahayaan suatu jalan tidak harus diklasifikasikan secara tegas sebagai “rendah” atau “tinggi”, tetapi dapat memiliki tingkat keanggotaan tertentu pada kategori “rendah”, “sedang”, dan “tinggi” secara bersamaan. Pendekatan ini memungkinkan model untuk merepresentasikan realitas yang lebih mendekati cara manusia menilai kondisi lingkungan di sekitarnya.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini mengusulkan suatu kerangka kerja pemodelan berbasis logika fuzzy untuk mensimulasikan tingkat keamanan yang dirasakan pada lingkungan pejalan kaki dalam konteks *first-mile* menuju stasiun transit. Model yang dikembangkan mengintegrasikan beberapa faktor lingkungan utama, yaitu kondisi pencahayaan, aktivitas pejalan kaki, dan kecepatan lalu lintas kendaraan. Ketiga faktor ini dipilih karena sering diidentifikasi dalam literatur sebagai elemen penting yang memengaruhi persepsi keamanan di ruang publik perkotaan. Penelitian ini menekankan pendekatan simulasi untuk mengeksplorasi bagaimana kombinasi berbagai kondisi lingkungan dapat memengaruhi tingkat keamanan yang dirasakan. Melalui sistem inferensi fuzzy, berbagai skenario lingkungan dapat dianalisis untuk melihat pola interaksi antarvariabel serta dampaknya terhadap persepsi keamanan pejalan kaki. Dengan pendekatan ini, penelitian bertujuan untuk menunjukkan potensi penggunaan pemodelan fuzzy sebagai alat analisis

dan pendukung keputusan dalam mengevaluasi kualitas lingkungan pejalan kaki di sekitar kawasan pengembangan berorientasi transit. Diharapkan kerangka kerja yang diusulkan dapat memberikan wawasan awal dalam memahami hubungan antara kondisi lingkungan perkotaan dan pengalaman berjalan kaki menuju sistem transportasi publik.

2. Tinjauan Pustaka

Akar konseptual dan matematis penelitian ini berasal dari karya fundamental (Zadeh, 1965), yang pertama kali mengusulkan teori himpunan fuzzy sebagai alternatif terhadap logika biner klasik. Dalam penalaran *Boolean* konvensional, sebuah proposisi bernilai benar atau salah secara mutlak, dan setiap elemen sepenuhnya termasuk atau tidak termasuk dalam suatu himpunan. (Zadeh, 1965) berargumen bahwa dikotomi yang kaku ini secara mendasar tidak sesuai untuk merepresentasikan kekaburan yang melekat dalam sebagian besar fenomena alam dan sosial. Solusi yang diusulkannya adalah menetapkan nilai keanggotaan pada setiap elemen dalam skala kontinu antara nol dan satu, sehingga memungkinkan keanggotaan parsial dan transisi bertahap antar kategori. Inovasi matematis ini menyediakan bahasa formal untuk konsep-konsep yang sulit dibatasi secara tegas (termasuk keselamatan, kenyamanan, risiko, dan kualitas lingkungan) serta membuka jalur produktif untuk memodelkan sistem yang kompleks dan berbasis persepsi. Relevansi kerangka ini terhadap penelitian yang sedang dilakukan bersifat langsung: variabel masukan dan keluaran yang digunakan dalam simulasi ini (kualitas pencahayaan, aktivitas pejalan kaki, kecepatan kendaraan, dan keselamatan secara keseluruhan) semuanya bersifat kontinu secara inheren, dipersepsikan secara subjektif, dan diekspresikan secara linguistik, sehingga menjadikannya kandidat yang tepat untuk representasi fuzzy daripada penetapan kategori yang kaku.

(Zadeh, 1973) kemudian mengembangkan perangkat teoretis lebih lanjut dengan memperkenalkan konsep variabel linguistik, yaitu variabel yang nilainya diekspresikan sebagai kata atau frasa, bukan angka. Dalam formulasi ini, variabel seperti pencahayaan tidak diukur sebagai nilai lux yang presisi, melainkan dikarakterisasi melalui istilah-istilah seperti “Buruk”, “Sedang”, atau “Baik”, yang masing-masing berkorespondensi dengan himpunan fuzzy yang didefinisikan di atas domain numerik. Struktur aturan ‘IF-THEN’ yang menyertai variabel linguistik memungkinkan pengetahuan pakar dan intuisi domain dikodekan langsung ke dalam model komputasional tanpa memerlukan hubungan kuantitatif yang presisi seperti yang dituntut oleh metode regresi atau probabilistik. Hal ini sangat penting dalam penelitian keselamatan terapan, di mana pengetahuan para praktisi sebagian besar bersifat kualitatif dan sulit direduksi menjadi ekspresi parametrik yang tepat. Namun demikian, pendekatan ini juga membawa konsekuensi yang perlu disadari: karena batas-batas fungsi keanggotaan ditetapkan berdasarkan pertimbangan pakar dan bukan kalibrasi empiris, validitas model sangat bergantung pada kualitas dan konsistensi penilaian yang mendasarinya. Keterbatasan ini telah diakui secara luas dalam literatur, di mana titik batas fungsi keanggotaan seperti trapesium dan segitiga, termasuk yang digunakan dalam model ini, umumnya ditetapkan melalui justifikasi subjektif tanpa validasi dari data lapangan yang terukur (Bhattacharya, et al., 2025). Dengan memungkinkan model beroperasi berdasarkan istilah linguistik, kerangka Zadeh (1973) membuka jalan untuk menerjemahkan penilaian profesional ke dalam inferensi yang dapat dikomputasi. Prinsip yang sama yang menopang seluruh basis aturan model dalam penelitian ini.

Transisi dari teori himpunan fuzzy yang abstrak ke aplikasi rekayasa praktis diwujudkan oleh Mamdani dan Assilian (Mamdani & Assilian, 1975), yang mengimplementasikan pengontrol logika fuzzy pertama untuk mengendalikan mesin uap menggunakan seperangkat aturan linguistik yang dirumuskan manusia. Pendekatan mereka, yang kini dikenal secara universal sebagai metode inferensi Mamdani, beroperasi dengan cara memfuzzifikasi masukan *crisp* menjadi nilai keanggotaan fuzzy, mengevaluasi setiap aturan melalui operasi implikasi minimum, mengagregasikan himpunan fuzzy keluaran melalui agregasi maksimum, dan akhirnya menghasilkan nilai keluaran *crisp* tunggal melalui defuzzifikasi sentroid. Kontribusi terpenting dari karya Mamdani dan Assilian bukan sekadar bersifat teknis, melainkan konseptual: karya ini membuktikan bahwa sistem yang sepenuhnya dikendalikan oleh aturan ‘IF-THEN’ dalam bahasa alami mampu menghasilkan keluaran yang halus, stabil, dan bermakna secara fisik. Secara krusial untuk konteks akademik dan terapan, arsitektur Mamdani mempertahankan interpretabilitas setiap aturan secara individual, sehingga setiap keputusan yang dibuat oleh mesin inferensi dapat ditelusuri kembali ke kondisi linguistik yang spesifik. Transparansi inilah yang membedakan sistem Mamdani dari model

black-box seperti jaringan saraf tiruan (*neural network*), dan menjadikannya sangat tepat untuk aplikasi yang berorientasi kebijakan. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa sistem Mamdani tidak bersifat *truth-preserving* dalam arti logis yang kaku: sistem ini menghasilkan keluaran yang konsisten dengan aturan-aturannya, namun hal ini berbeda dari proses deduksi konsekuensi logis yang benar. Sebagai alternatif, metode Takagi–Sugeno–Kang (TSK) telah terbukti menghasilkan nilai kompensasi yang lebih akurat secara matematis dalam skenario berbasis data yang dinamis, meskipun dengan mengorbankan interpretabilitas yang menjadi keunggulan utama Mamdani. Penelitian ini memilih arsitektur Mamdani secara eksplisit demi keterbacaan dan kemampuan audit model oleh pemangku kepentingan non-teknis, dengan kesadaran penuh bahwa pilihan ini mendukung konsekuensi pada tingkat presisi matematis.

Penerapan logika fuzzy dalam sistem lalu lintas dan transportasi telah berkembang pesat sejak tahun 1990-an, menghasilkan kumpulan karya yang substansial dan memvalidasi metodologi ini untuk domain yang tengah dikaji. (Koukol, et al., 2015) menyajikan tinjauan komprehensif tentang aplikasi logika fuzzy dalam pengendalian sinyal lalu lintas, mendokumentasikan bahwa pengontrol fuzzy secara konsisten mengungguli rencana sinyal waktu tetap dalam kondisi lalu lintas yang bervariasi dan tidak pasti. Tinjauan ini mengidentifikasi pola struktural yang berulang di seluruh implementasi yang berhasil: sistem fuzzy multi-masukan yang menerima beberapa indikator lingkungan secara bersamaan cenderung menghasilkan keluaran yang lebih terkalibrasi dibandingkan model masukan tunggal, karena sistem tersebut menangkap efek interaksi antar variabel yang hilang ketika setiap faktor dinilai secara terisolasi. Temuan ini memiliki implikasi langsung terhadap penelitian yang sedang dilakukan, yang secara sengaja menggabungkan tiga masukan yang saling berinteraksi, yakni pencahayaan, aktivitas pejalan kaki, dan kecepatan lalu lintas, bukannya memodelkan setiap penentu keselamatan secara independen. Namun demikian, (Koukol, et al., 2015) juga mengakui bahwa meskipun efek interaksi ini dapat ditangkap secara komputasional, mekanisme teoretis yang menjelaskan bagaimana variabel-variabel tersebut berinteraksi secara kausal satu sama lain belum diformulasikan secara memadai dalam literatur. Kesenjangan ini juga berlaku pada model yang diajukan dalam penelitian ini: permukaan respons yang dihasilkan oleh ‘*gensurf*’ mendeskripsikan interaksi secara visual, namun penjelasan mekanistik yang mendasarinya tetap menjadi pertanyaan terbuka.

Penelitian yang lebih baru telah memperluas inferensi fuzzy secara eksplisit ke penilaian keselamatan jalan, menghasilkan metode-metode yang memiliki kesamaan struktural yang signifikan dengan model yang diajukan. (Bhattacharya, et al., 2025)) menerapkan kerangka pengambilan keputusan multi-kriteria berbasis fuzzy untuk mengevaluasi kondisi keselamatan jalan di kota-kota yang mengalami urbanisasi pesat, menunjukkan bahwa pendekatan fuzzy menangkap efek interaksi antar variabel infrastruktur perkotaan jauh lebih sensitif dibandingkan model penilaian aditif. Studi terpisah mengembangkan model evaluasi ‘Dua Lapis Mamdani’ untuk penilaian risiko berkendara di jalan bebas hambatan yang menggabungkan beban kerja pengemudi dan indikator lingkungan jalan sebagai masukan bersamaan (Xie, et al., 2023). Sebuah studi lanjutan yang menerapkan logika fuzzy pada klasifikasi risiko segmen jalan mengonfirmasi kesesuaian fungsi keanggotaan asimetris untuk menangkap cara non-linear degradasi keselamatan yang terjadi di dekat nilai masukan ekstrem (Mogyorósi, et al., 2024). Meski demikian, satu keterbatasan metodologis yang konsisten dan mencolok lintas seluruh studi ini perlu dikemukakan: keluaran model dievaluasi berdasarkan konsistensi internal dan plausibilitas visual permukaan respons, bukan divalidasi terhadap data insiden yang tercatat secara empiris (seperti statistik kecelakaan, angka kejahatan, atau catatan cedera pejalan kaki). Kesenjangan validasi ini merupakan kondisi umum dalam literatur keselamatan berbasis fuzzy, dan model yang diajukan dalam penelitian ini berbagi keterbatasan yang sama. Simulasi Monte Carlo dan analisis *grid* yang dilakukan dalam penelitian ini menggambarkan perilaku model secara internal, namun tidak mengkalibrasinya terhadap hasil nyata di lapangan.

Pemilihan kualitas pencahayaan sebagai variabel masukan utama bertumpu pada literatur empiris yang telah mapan selama lebih dari tiga dekade. (Painter, 1996) melakukan salah satu investigasi lapangan paling berpengaruh awal mengenai hubungan antara pencahayaan jalan dan perilaku pejalan kaki, membandingkan pola aktivitas dan kejahatan yang dilaporkan sebelum dan sesudah peningkatan pencahayaan di beberapa lingkungan perkotaan. Studi ini menemukan bahwa peningkatan pencahayaan setelah gelap menghasilkan penurunan rasa takut terhadap kejahatan yang terukur, peningkatan jumlah pejalan kaki, dan penurunan signifikan dalam kejahatan yang tercatat.

Temuan fundamental ini telah disempurnakan secara substansial. (Fotios, et al., 2015) meninjau bukti eksperimental dan lapangan yang menghubungkan tingkat luminansi dengan rasa aman pejalan kaki, menyimpulkan bahwa hubungan antara kualitas pencahayaan dan keselamatan yang dirasakan bersifat non-linear: peningkatan di ujung bawah skala pencahayaan menghasilkan peningkatan rasa aman yang jauh lebih besar, sementara peningkatan inkremental pada tingkat luminansi yang sudah memadai memberikan manfaat yang semakin berkurang. (Trop, et al., 2023) memperluas lini kajian ini melalui tinjauan literatur sistematis, menemukan bahwa karakteristik pencahayaan, termasuk intensitas, keseragaman, dan kualitas spektral, secara konsisten menempati urutan teratas sebagai prediktor lingkungan terkuat terhadap kenyamanan pejalan kaki di ruang publik setelah gelap. (Welsh & Farrington, 2022) lebih lanjut mengkonsolidasikan basis bukti ini melalui meta-analisis setengah abad penelitian pencahayaan jalan dan pencegahan kejahatan. Meski demikian, penting untuk dicatat bahwa sebagian besar penelitian empiris yang mendasari variabel pencahayaan ini berasal dari negara-negara berpenghasilan tinggi dengan infrastruktur yang mapan, penegakan regulasi yang konsisten, dan koordinasi kelembagaan yang kuat. Negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah, yang justru mengalami angka kematian pejalan kaki yang tidak proporsional tinggi, masih sangat kurang terwakili dalam evaluasi empiris yang ada. Hal ini menimbulkan pertanyaan tentang sejauh mana temuan seperti (Painter, 1996) dan (Fotios, et al., 2015) dapat ditransfer ke konteks perkotaan yang berkembang pesat. Hal ini adalah sebuah keterbatasan yang relevan bagi model yang diajukan dalam penelitian ini.

Dua variabel masukan yang tersisa, yaitu aktivitas pejalan kaki dan kecepatan kendaraan, berakar pada aliran penelitian empiris yang saling melengkapi. Sehubungan dengan kepadatan pejalan kaki, (Welsh & Farrington, 2022) mencatat bahwa arus pejalan kaki berfungsi sebagai variabel mediasi dalam hubungan antara lingkungan fisik dan keselamatan: kehadiran orang lain di ruang publik meningkatkan pengawasan alami, menaikkan risiko deteksi yang dipersepsikan oleh pelaku potensial, dan menciptakan norma sosial yang mencegah perilaku antisosial. Namun, efek protektif dari kehadiran pejalan kaki bersifat bergantung konteks dan tidak berlaku secara seragam di semua lingkungan atau periode waktu. Selain itu, sebagian besar model pemodelan pejalan kaki yang ada gagal menangkap sifat dinamis dari interaksi pejalan kaki-kendaraan, khususnya dalam kondisi variasi simultan beberapa faktor lingkungan. Hal ini adalah sebuah keterbatasan yang dengan tepat dikemukakan oleh (Koukol, et al., 2015) dan yang secara langsung memotivasi desain multi-masukan dari model yang diajukan. Sehubungan dengan kecepatan kendaraan, tinjauan sistematis dan meta-analisis oleh (Hussain, et al., 2019) menetapkan hubungan dosis-respons yang tepat antara kecepatan benturan dan probabilitas kematian pejalan kaki: risiko meningkat tajam di atas 40 km/jam dan mendekati kematian yang hampir pasti pada kecepatan di atas 60 km/jam. Gradien empiris ini secara langsung menginformasikan basis aturan model, di mana kondisi lalu lintas "*Cepat*" diperlakukan sebagai faktor pereduksi keselamatan yang dominan. Secara kolektif, literatur yang ada mendukung arsitektur Mamdani tiga masukan sebagai pilihan yang berdasar secara teoretis dan terkalibrasi secara empiris dan sekaligus mengidentifikasi beberapa arah pengembangan yang signifikan, yaitu validasi empiris terhadap data insiden nyata, kalibrasi berbasis lapangan untuk parameter fungsi keanggotaan, perluasan ke konteks perkotaan, dan formalisasi teoritis dari mekanisme interaksi antar variabel.

3. Metodologi

3.1 FIS *Architecture* dan Desain Rasional

Penelitian ini membangun sistem inferensi fuzzy (FIS) tipe Mamdani untuk memodelkan hubungan antara tiga kondisi lingkungan yang dapat diamati dengan skor keselamatan transit perkotaan yang bersifat komposit. Arsitektur Mamdani dipilih dibandingkan metode inferensi alternatif (termasuk pendekatan Takagi-Sugeno-Kang atau TSK) dengan pertimbangan utama interpretabilitas. Sistem TSK menghasilkan keluaran berupa fungsi matematis dari masukan, sehingga setiap aturan menjadi sulit dikomunikasikan kepada pemangku kepentingan non-teknis. Sebaliknya, sistem Mamdani mengekspresikan anteseden maupun konsekuen dalam bentuk istilah linguistik, sehingga setiap aturan berkorespondensi secara langsung dengan pernyataan kondisional yang mudah dipahami. Sifat ini sangat penting dalam studi yang berorientasi kebijakan, di mana temuan harus dapat diaudit dan dikomunikasikan kepada perencana kota serta otoritas transportasi. FIS diimplementasikan dalam MATLAB menggunakan kelas objek *mamfis*, dengan parameter

inferensi tetap sebagai berikut: operasi ‘AND’ menggunakan minimum (*min*), operasi ‘OR’ menggunakan maksimum (*max*), implikasi menggunakan minimum (*min*), agregasi menggunakan maksimum (*max*), dan defuzzifikasi menggunakan sentroid. Parameter-parameter ini merupakan konfigurasi standar Mamdani dan konsisten dengan implementasi yang ditinjau dalam (Mamdani & Assilian, 1975) serta (Koukol, et al., 2015). Secara keseluruhan, alur inferensi berlangsung dalam empat tahap: fuzzifikasi masukan *crisp*, evaluasi aturan, agregasi keluaran, dan defuzzifikasi yang masing-masing dijelaskan pada subbagian berikut.

3.2 Definisi Variabel Masukan dan Keluaran

Model menerima tiga variabel masukan *crisp*, masing-masing merepresentasikan kondisi lingkungan yang terukur pada suatu lokasi transit. Variabel masukan pertama, ‘Pencahayaannya’ (*Lighting*), didefinisikan pada domain $[0, 10]$, di mana 0 merepresentasikan kegelapan total dan 10 merepresentasikan pencahayaan penuh dan merata. Skala ternormalisasi ini mengabstraksikan pengukuran lux yang spesifik ke dalam indeks kualitas tak berdimensi, konsisten dengan kerangka berbasis persepsi dari (Fotios, et al., 2015), yang menunjukkan bahwa rasa aman pejalan kaki merespons kecukupan pencahayaan yang dirasakan, bukan ambang luminansi absolut. Variabel masukan kedua, ‘Aktivitas Pejalan Kaki’ (*Pedestrian Activity*), juga didefinisikan pada domain $[0, 10]$, di mana 0 menunjukkan lingkungan yang sepenuhnya kosong dan 10 menunjukkan ruang pejalan kaki yang sangat padat. Variabel ini menangkap dimensi pengawasan alami (*natural surveillance*) dari keselamatan yang diidentifikasi oleh (Welsh & Farrington, 2022), di mana kehadiran orang lain berfungsi sebagai pencegah perilaku antisosial sekaligus sumber rasa aman sosial. Variabel masukan ketiga, ‘Kecepatan Lalu Lintas’ (*Traffic Speed*), didefinisikan pada domain $[0, 80]$ km/jam, mencakup rentang dari lalu lintas yang berhenti hingga arus arteri yang cepat. Batas atas 80 km/jam dipilih untuk mencerminkan rentang batas kecepatan tipikal jalan perkotaan dan pinggiran kota, konsisten dengan data kecepatan tabrakan yang dianalisis oleh (Hussain, et al., 2019). Variabel keluaran tunggal, ‘Keselamatan’ (*Safety*), didefinisikan pada domain $[0, 100]$ dan merepresentasikan skor keselamatan komposit di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan lingkungan transit yang lebih aman. Rentang keluaran yang kontinu ini memungkinkan model untuk mengekspresikan kondisi keselamatan yang bersifat gradual, bukan kategori risiko yang diskrit, yang sesuai dengan sifat fungsi keanggotaan fuzzy yang halus dan saling tumpang tindih.

3.3 Spesifikasi Fungsi Keanggotaan

Setiap variabel dipartisi menjadi tiga kategori linguistik menggunakan kombinasi fungsi keanggotaan trapesium dan segitiga. Fungsi trapesium diterapkan pada kategori batas setiap variabel, sedangkan fungsi segitiga digunakan untuk kategori perantara. Desain campuran ini mencerminkan sifat asimetris dari ambang batas yang relevan terhadap keselamatan: kondisi pada nilai ekstrem (pencahayaan sangat buruk, kecepatan lalu lintas sangat tinggi) bukan merupakan nilai titik tunggal melainkan rentang di mana derajat keanggotaan tetap pada maksimumnya sebelum menurun, sementara kondisi moderat lebih terlokalisasi secara presisi dan lebih tepat direpresentasikan oleh bentuk segitiga yang memuncak.

Fungsi keanggotaan trapesium didefinisikan sebagai:

$$\mu_{trap}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (1)$$

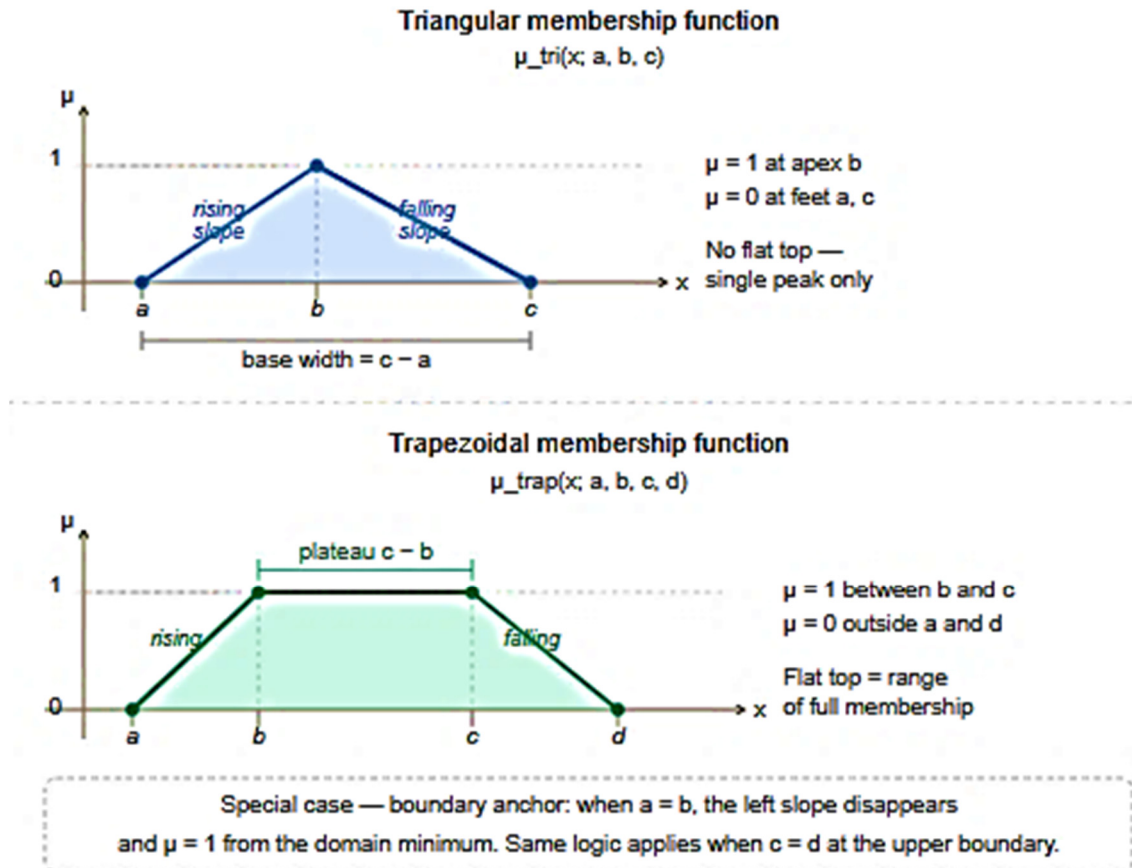
di mana a dan d adalah kaki luar trapesium (di mana keanggotaan mencapai nol) dan b serta c adalah bahu dalam (di mana keanggotaan mencapai dan mempertahankan maksimumnya sebesar satu). Ketika $a = b$, bahu kiri berlabuh pada batas domain, menghasilkan dataran datar dari nilai minimum. Ketika $c = d$, hal yang sama berlaku pada batas atas.

Fungsi keanggotaan segitiga merupakan kasus khusus yang didefinisikan sebagai:

$$\mu_{trap}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (2)$$

dimana b adalah titik puncak dengan keanggotaan bernilai satu, dan a serta c adalah kaki kiri dan kanan dengan keanggotaan bernilai nol.

Nilai parameter spesifik untuk setiap variabel adalah sebagai berikut. Untuk *Pencahayaannya*: *Buruk* = $\text{trapmf}[0, 0, 2, 4]$, *Sedang* = $\text{trimf}[3, 5, 7]$, *Baik* = $\text{trapmf}[6, 8, 10, 10]$. Untuk *Aktivitas Pejalan Kaki*: *Sepi* = $\text{trapmf}[0, 0, 2, 3]$, *Sedang* = $\text{trimf}[2, 5, 7]$, *Ramai* = $\text{trapmf}[6, 8, 10, 10]$. Untuk *Kecepatan Lalu Lintas*: *Lambat* = $\text{trapmf}[0, 0, 15, 30]$, *Sedang* = $\text{trimf}[25, 40, 55]$, *Cepat* = $\text{trapmf}[50, 65, 80, 80]$. Untuk keluaran *Keselamatan*: *Rendah* = $\text{trapmf}[0, 0, 20, 35]$, *Sedang* = $\text{trimf}[30, 50, 70]$, *Tinggi* = $\text{trapmf}[65, 80, 100, 100]$. Fungsi keanggotaan yang berdekatan dirancang dengan tumpang tindih yang disengaja untuk memastikan transisi yang mulus antar kategori linguistik dan mencegah lompatan diskontinu pada permukaan keluaran.



Gambar 1. Penjelasan fungsi keanggotaan triangular dan trapezoidal yang digunakan dalam simulasi

3.4 Konstruksi Basis Aturan

Basis aturan terdiri dari 27 aturan, yang memberikan cakupan lengkap atas semua kemungkinan kombinasi tiga kategori linguistik masukan (3 masukan $\times$ 3 fungsi keanggotaan masing-masing = $3^3 = 27$ kombinasi). Cakupan lengkap merupakan persyaratan desain yang disengaja, sebab basis aturan yang tidak lengkap dapat menghasilkan keluaran default yang tidak terdeteksi untuk kombinasi masukan yang tidak tercakup, sehingga memperkenalkan bias sistematis ke dalam hasil inferensi tanpa indikasi yang terlihat.

Setiap aturan menggunakan bentuk standar 'IF-THEN' Mamdani:

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_i \text{ AND } x_2 \text{ is } B_j \text{ AND } x_3 \text{ is } C_k \text{ THEN } x_4 \text{ is } D_l \quad (3)$$

di mana x_1, x_2, x_3 adalah variabel masukan (Pencahayaannya, Pejalan Kaki, Lalu Lintas), A_i, B_j, C_k adalah himpunan fuzzy anteseden, μ adalah keluaran Keselamatan, dan D_l adalah himpunan fuzzy

konsekuen. Penghubung ‘AND’ dievaluasi menggunakan operator minimum, sehingga kekuatan aktivasi ω setiap aturan adalah:

$$\omega = \min(\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_j}(x_2), \mu_{C_k}(x_3)) \quad (4)$$

Fuzzy rule base — all 27 rules

Each cell = one rule · Rows = Pedestrian activity · Columns = Traffic speed · Panels = Lighting level

Lighting: Poor				Lighting: Moderate				Lighting: Good			
	Slow	Medium	Fast		Slow	Medium	Fast		Slow	Medium	Fast
Busy	Medium	Low	Low	Busy	High	Medium	Low	Busy	High	High	Medium
Moderate	Low	Low	Low	Moderate	Medium	Medium	Low	Moderate	High	High	Medium
Empty	Low	Low	Low	Empty	Low	Low	Low	Empty	Medium	Low	Low

↑ Traffic speed → (columns) ↑ Traffic speed → (columns) ↑ Traffic speed → (columns)

Low safety
 Medium safety
 High safety

Gambar 2. Ketentuan dasar Fuzzy yang digunakan dalam simulasi

Konsekuensi aturan ditetapkan berdasarkan tiga prinsip utama. Pertama, ‘Pencahayaannya’ diperlakukan sebagai masukan dominan: setiap kombinasi yang melibatkan pencahayaannya ‘Buruk’ diberi keluaran keselamatan ‘Rendah’ dalam hampir semua kasus, terlepas dari kondisi pejalan kaki atau lalu lintas, konsisten dengan bukti empiris yang kuat mengenai pencahayaannya sebagai penentu keselamatan utama (Painter, 1996); (Welsh & Farrington, 2022). Kedua, ‘Kecepatan Lalu Lintas’ diperlakukan sebagai pengganti negatif yang keras (*hard negative override*): kondisi lalu lintas ‘Cepat’ menghasilkan keselamatan ‘Rendah’ pada setiap aturan yang memuatnya, mencerminkan gradien probabilitas kematian yang tajam yang didokumentasikan oleh (Hussain, et al., 2019). Ketiga, dalam ruang kondisi moderat atau baik, ‘Aktivitas Pejalan Kaki’ berfungsi sebagai faktor perbaikan: lingkungan pejalan kaki yang ‘Ramai’ di bawah pencahayaannya Baik meningkatkan keselamatan menjadi ‘Tinggi’ bahkan pada kecepatan lalu lintas ‘Sedang’, menangkap efek pengawasan alami yang diidentifikasi dalam literatur keselamatan pejalan kaki. Satu asimetri penting tetap dipertahankan dalam basis aturan: kombinasi pencahayaannya Buruk dengan aktivitas pejalan kaki ‘Ramai’ dan lalu lintas ‘Lambat’ diberi nilai ‘Sedang’ bukannya ‘Rendah’, atas dasar bahwa kepadatan pejalan kaki yang tinggi memberikan rasa aman kompensasi parsial meskipun pencahayaannya tidak memadai. Hal ini adalah sebuah pertimbangan yang konsisten dengan mekanisme pencegahan sosial yang dijelaskan oleh (Welsh & Farrington, 2022).

3.5 Desain Simulasi

Dua pendekatan simulasi komplementer digunakan untuk mengevaluasi perilaku FIS di seluruh domain masukannya: simulasi grid terstruktur dan simulasi stokastik *Monte Carlo*.

Simulasi Grid tiga dimensi yang seragam dibangun di seluruh domain masukan menggunakan 11 titik yang berjarak merata per dimensi, dihasilkan melalui linspace, menghasilkan titik-titik pada [0, 1, 2, ..., 10] untuk *Pencahayaannya* dan *Aktivitas Pejalan Kaki*, serta [0, 8, 16, ..., 80] untuk *Kecepatan Lalu Lintas*. Kombinasi faktorial penuh dari titik-titik grid ini menghasilkan $11^3 = 1.331$ vektor masukan, yang dirakit sebagai matriks berukuran 1.331×3 dan diteruskan secara simultan ke fungsi evalfis. Pendekatan ini memastikan cakupan ruang masukan yang sistematis dan seragam, memungkinkan pembuatan permukaan respons dan proyeksi marginal yang mengungkap perilaku global FIS di seluruh kombinasi masukan. Dataset yang dihasilkan disimpan sebagai tabel terstruktur dengan kolom untuk setiap variabel masukan dan skor keselamatan yang bersesuaian, memberikan catatan yang lengkap dan dapat direproduksi dari perilaku deterministik model.

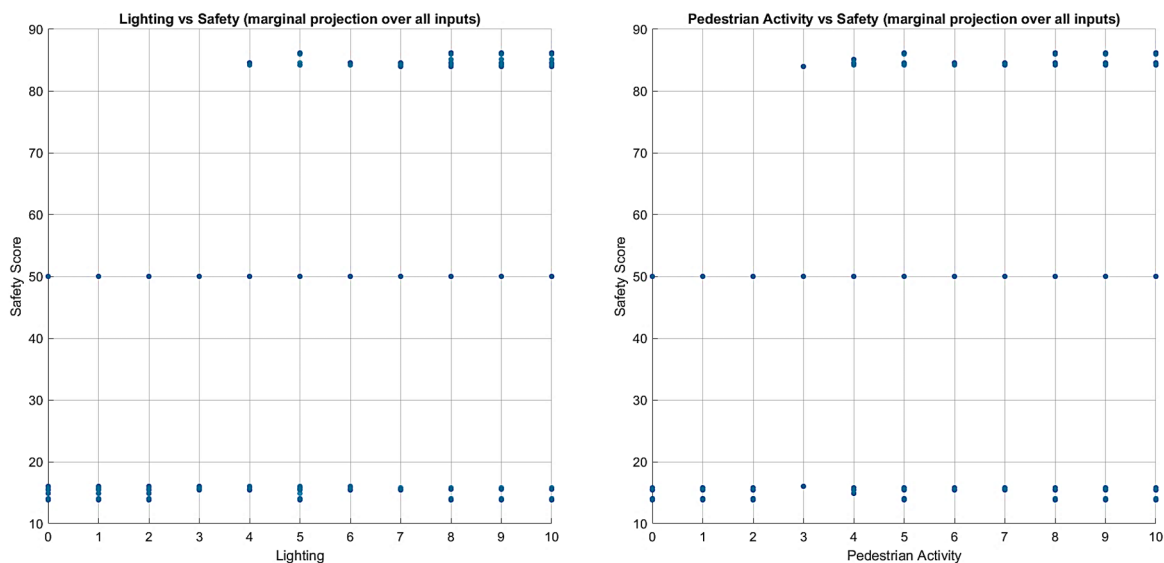
Untuk mengkarakterisasi sifat distribusional keluaran model di bawah kondisi variasi masukan acak yang realistis, simulasi *Monte Carlo* dilakukan menggunakan $N = 1.000$ sampel. Setiap sampel terdiri dari tiga nilai acak yang diambil secara independen: *Pencahayaannya* $\sim U(0, 10)$, *Pejalan Kaki* $\sim$

$U(0, 10)$, dan $Lalu Lintas \sim U(0, 80)$, di mana $U(\cdot)$ menunjukkan distribusi seragam kontinu atas rentang yang ditentukan. Seed acak tetap bernilai 42 ditetapkan sebelum pengambilan sampel menggunakan $\text{rng}(42)$, memastikan reproduktibilitas penuh simulasi di seluruh jalannya yang independen. Sebanyak 1.000 vektor masukan dievaluasi melalui FIS menggunakan evalfis , dan skor keselamatan yang dihasilkan dirangkum melalui rata-rata, median, simpangan baku, minimum, dan maksimumnya. Bentuk distribusional keluaran divisualisasikan melalui histogram frekuensi dengan 20 kelas, memberikan representasi yang jelas tentang bagaimana skor keselamatan terdistribusi ketika masukan diambil secara seragam acak dari domain masing-masing. Perlu dicatat bahwa asumsi pengambilan sampel seragam memperlakukan semua nilai masukan sebagai sama-sama probable, yang merupakan suatu penyederhanaan; simulasi yang lebih realistis akan memberikan bobot pada distribusi masukan sesuai data frekuensi empiris dari konteks studi.

4. Pembahasan

4.1 Perilaku Model Secara Keseluruhan

Hasil simulasi grid dan *Monte Carlo* secara bersama-sama mengungkap perilaku inferensi yang konsisten dan secara kualitatif masuk akal dari model FIS yang diajukan. Skor keselamatan yang dihasilkan tidak tersebar secara kontinu di seluruh domain keluaran $[0, 100]$, melainkan terkonsentrasi dalam tiga klaster yang berbeda di sekitar nilai ~ 15 , ~ 50 , dan ~ 85 yang berkorespondensi langsung dengan centroid defuzzifikasi dari fungsi keanggotaan keluaran Rendah, Sedang, dan Tinggi. Pola pengelompokan ini merupakan konsekuensi yang dapat diprediksi dari arsitektur Mamdani: ketika satu aturan mendominasi aktivasi (seperti yang terjadi ketika masukan jatuh dengan kuat ke dalam satu kombinasi linguistik) keluaran tertarik ke arah centroid konsekuen aturan tersebut. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa model beroperasi sebagaimana dirancang dan bahwa basis aturan menghasilkan respons yang terdefinisi dengan baik dan stabil di seluruh domain masukan.

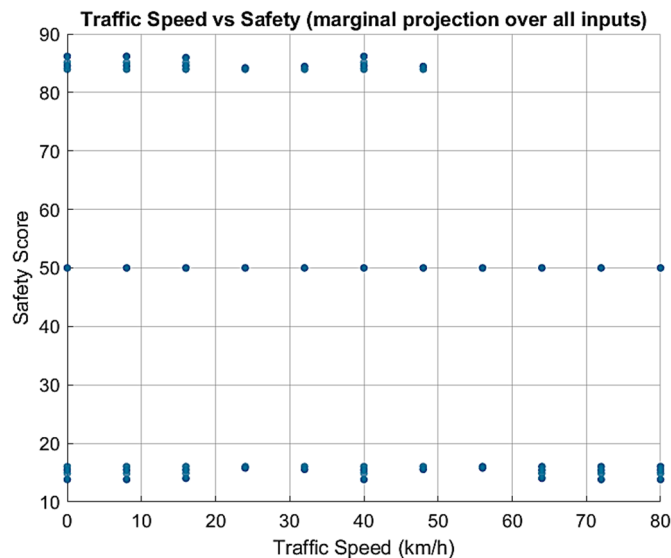


Gambar 3 (kiri). ‘Lighting’ vs. ‘Safety’. **Gambar 4** (kanan). ‘Pedestrian’ vs. ‘Safety’

4.2 Dominasi Pencahayaan dan Efek Batas Bawah

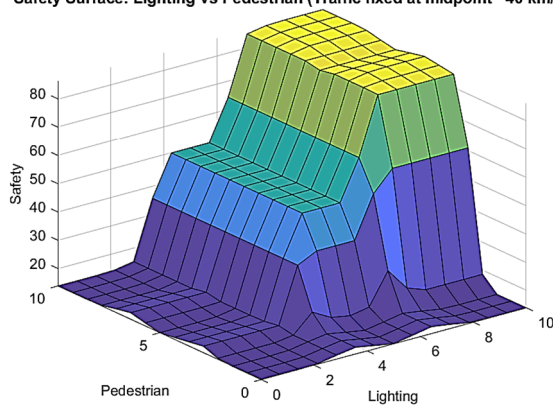
Gambar 3 menunjukkan bahwa ‘Pencahayaan’, meskipun merupakan masukan pertama dan secara konseptual paling dominan dalam basis aturan, tidak menghasilkan hubungan monoton yang bersih antara nilai masukan dan skor keselamatan. Tiga band horizontal pada ~ 15 , ~ 50 , dan ~ 85 muncul di seluruh rentang pencahayaan, termasuk di ‘Lighting = 0’. Hal ini terjadi karena proyeksi marjinal menggabungkan efek dari semua kombinasi pejalan kaki dan kecepatan lalu lintas: bahkan pada pencahayaan yang sangat buruk, beberapa kombinasi aturan (*i.e.* pejalan kaki padat dengan lalu lintas lambat) menghasilkan keluaran ‘Sedang’. Meskipun demikian, proporsi titik di band atas (~ 85) meningkat secara konsisten ketika ‘Lighting ≥ 4 ’, mengkonfirmasi bahwa pencahayaan yang lebih

baik secara statistik membuka akses ke hasil keselamatan yang lebih tinggi. Kecilnya proporsi titik ‘Tinggi’ pada nilai pencahayaan rendah mencerminkan desain asimetris yang disengaja dari basis aturan, di mana kondisi pencahayaan ‘Buruk’ ditetapkan sebagai sinyal negatif dominan yang hanya dapat dikompensasi secara parsial oleh kondisi pejalan kaki yang sangat menguntungkan.

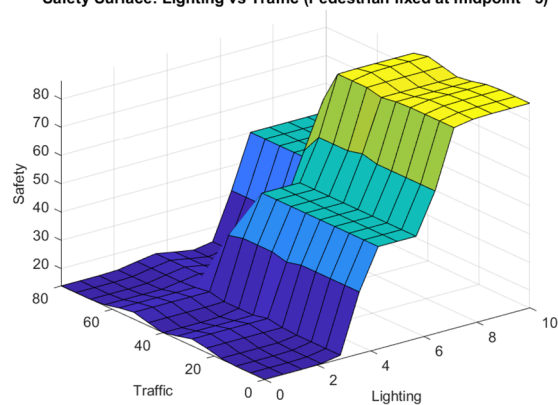


Gambar 5. ‘Traffic Speed’ vs. ‘Safety’

Safety Surface: Lighting vs Pedestrian (Traffic fixed at midpoint ~40 km/h)



Safety Surface: Lighting vs Traffic (Pedestrian fixed at midpoint ~5)



Gambar 6 (kiri). ‘Safety’ vs. ‘Lighting’ vs. ‘Pedestrian’ @kecepatan tetap = 40km/jam

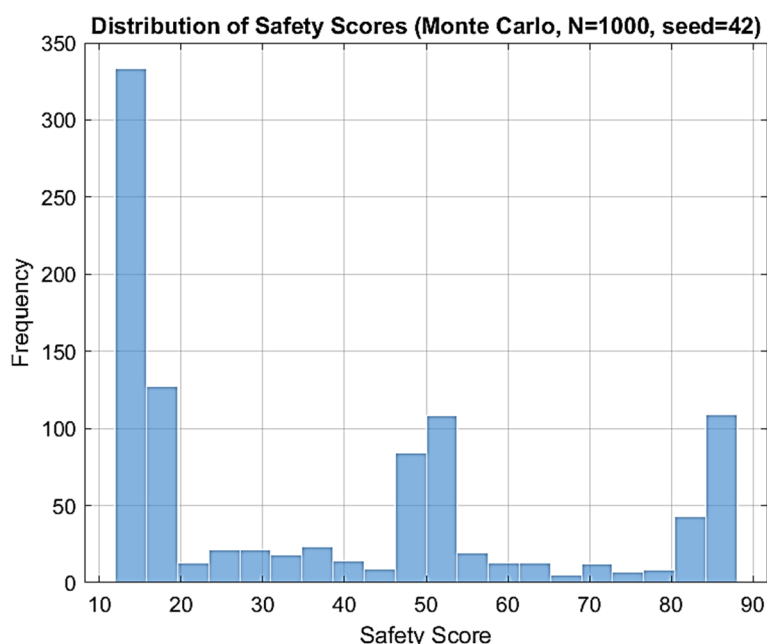
Gambar 7 (kanan). ‘Safety’ vs. ‘Lighting’ vs. ‘Traffic’ @ ‘Pedestrian’ tetap di ~5

4.3 Aktivitas Pejalan Kaki sebagai Variabel Penguat

Gambar 4 menampilkan pola band yang hampir identik dengan Gambar 3, yang pada pandangan pertama mungkin tidak terlalu tampak seperti intuisi kita (bahwa seolah-olah pejalan kaki tidak memberikan kontribusi independen yang bermakna terhadap keselamatan). Namun interpretasi ini dapat dijelaskan. Kesamaan pola antara Gambar 3 dan Gambar 4 justru mencerminkan peran pejalan kaki sebagai variabel penguat daripada penentu utama dalam model ini: pengaruhnya bersifat kondisional dan hanya menghasilkan perubahan keluaran yang signifikan ketika dikombinasikan dengan kondisi pencahayaan yang cukup. Hal ini dikonfirmasi oleh Gambar 6, yang menunjukkan bahwa skor keselamatan tinggi (~85) hanya dapat dicapai ketika pencahayaan dan kepadatan pejalan kaki secara bersamaan berada di atas ambang batas tertentu. Dengan kata lain, pejalan kaki yang ramai tanpa pencahayaan yang memadai tidak cukup untuk meningkatkan keselamatan ke level ‘Tinggi’. Hasil ini konsisten dengan literatur pengawasan alami, di mana efek pencegahan kehadiran orang banyak terbukti bergantung pada kemampuan mereka untuk saling melihat dan dikenali (Welsh & Farrington, 2022).

4.4 Kecepatan Lalu Lintas sebagai Faktor Override Negatif

Gambar 5 mengungkap sinyal direksional paling jelas dari ketiga proyeksi marjinal. Berbeda dengan Gambar 3 dan 4, distribusi titik dalam Gambar 5 menunjukkan perubahan struktural yang nyata seiring peningkatan kecepatan: titik-titik di band atas (~ 85) menghilang sepenuhnya ketika $\text{Traffic} \geq 50 \text{ km/h}$, dan band bawah (~ 15) melebar secara proporsional. Tidak ada satu pun kombinasi masukan yang menghasilkan skor ‘Tinggi’ di bawah kondisi lalu lintas ‘Cepat’. Perilaku ini merupakan konsekuensi langsung dari aturan *override* yang diterapkan secara eksplisit dalam basis aturan, di mana ‘*Traffic = Fast*’ selalu menghasilkan ‘*Safety = Low*’ atau paling tinggi ‘*Safety = Medium*’, tidak pernah ‘*Safety = High*’. Temuan ini bersesuaian kuat dengan bukti empiris (Hussain, et al., 2019), yang mendokumentasikan peningkatan tajam probabilitas kematian pejalan kaki di atas 50 km/h . Secara praktis, temuan ini mengimplikasikan bahwa intervensi pengurangan kecepatan (seperti zona 30 km/h , pita penggaduh, atau penyempitan jalur) berpotensi menghasilkan dampak keselamatan yang lebih besar per unit intervensi dibandingkan peningkatan pencahayaan atau pengelolaan kepadatan pejalan kaki secara terpisah.



Gambar 8. Monte Carlo histogram (N=1000, seed = 42). Distribusi ‘Trimodal’ dengan puncak di ~ 15 (‘Low’, ~ 460 sample), ~ 50 (‘Medium’, ~ 190 sample), dan ~ 85 (‘High’, ~ 155 sample).

4.5 Efek Interaksi: Permukaan Respons

Gambar 6 dan 7 menyajikan informasi yang tidak dapat diekstrak dari proyeksi marjinal manapun secara individual, yaitu efek interaksi simultan antara dua variabel masukan terhadap keluaran keselamatan. Gambar 6 menampilkan bentuk mesa yang asimetris: dataran tinggi keselamatan (~ 80 – 87) hanya terbentuk di sudut kanan-atas (Lighting tinggi, Pedestrian tinggi), sementara sudut kiri-depan (Lighting rendah, Pedestrian rendah) runtuh ke nilai ~ 10 – 15 . Yang menarik adalah kemiringan transisi dari rendah ke tinggi lebih curam di sepanjang sumbu ‘Pencahayaan’ dibandingkan sumbu ‘Pejalan Kaki’, mengkonfirmasi bahwa pencahayaan memiliki efek marjinal yang lebih kuat terhadap keselamatan pada kondisi lalu lintas menengah. Gambar 7 menampilkan profil yang berbeda secara kualitatif: permukaan menurun secara lebih dramatis di sepanjang sumbu kecepatan lalu lintas, dengan transisi dari ‘Tinggi’ ke ‘Rendah’ terjadi dalam rentang yang relatif sempit (antara ~ 30 dan $\sim 60 \text{ km/h}$). Ini mengkonfirmasi bahwa kecepatan lalu lintas bukan hanya berkontribusi terhadap penurunan keselamatan secara bertahap, melainkan memiliki efek ambang batas. Inilah karakteristik yang tidak dapat ditangkap oleh model linier atau aditif sederhana dan yang menjadi salah satu kekuatan utama representasi fuzzy dalam penelitian ini.

4.6 Distribusi Monte Carlo dan Implikasi Kebijakan

Histogram pada Gambar 8 menampilkan distribusi trimodal yang secara jelas mencerminkan struktur basis aturan: puncak utama di sekitar skor 10–20 (frekuensi ~460 sampel), puncak sekunder di sekitar 45–55 (~190 sampel), dan puncak tersier di sekitar 80–87 (~155 sampel). Dominasi puncak kiri yang merepresentasikan kondisi keselamatan ‘Rendah’, tidak mengindikasikan bahwa model bersifat pesimistis secara tidak wajar. Sebaliknya, hal ini mencerminkan distribusi probabilistik yang realistis: ketika ketiga masukan diambil secara seragam acak dari domain penuh masing-masing, kemungkinan mendapatkan kombinasi yang secara bersamaan memenuhi syarat pencahayaan baik, pejalan kaki padat, dan lalu lintas lambat, yaitu satu-satunya jalur menuju skor ‘Tinggi’, secara inheren lebih kecil dibandingkan kombinasi yang memicu aturan ‘Rendah’. Ini konsisten dengan realitas empiris perkotaan: kondisi lingkungan yang secara bersamaan optimal di semua dimensi keselamatan adalah pengecualian, bukan norma. Dari perspektif kebijakan, distribusi ini menyiratkan bahwa intervensi yang ditargetkan, khususnya yang secara bersamaan menangani pencahayaan dan kecepatan lalu lintas, akan menghasilkan pergeseran distribusional yang lebih besar dari puncak kiri ke puncak kanan dibandingkan intervensi variabel tunggal manapun. Hal ini mendukung pendekatan keselamatan transit yang terintegrasi dan multi-dimensi sebagaimana diadvokasi dalam literatur desain perkotaan kontemporer.

4.7 Keterbatasan dan Arah Penelitian Lanjutan

Meskipun hasil simulasi konsisten secara internal dan masuk akal secara kualitatif, beberapa keterbatasan penting perlu diakui secara eksplisit. Pertama, seluruh parameter fungsi keanggotaan, termasuk titik-titik batas trapesium dan segitiga untuk setiap variabel, ditetapkan berdasarkan pertimbangan penulis dan bukan kalibrasi berbasis data lapangan yang terukur. Validitas kuantitatif model karenanya bergantung pada kualitas asumsi-asumsi ini, yang belum diverifikasi secara empiris. Kedua, basis aturan mencerminkan asumsi kontekstual yang spesifik, terutama bahwa kondisi jalan kosong (Empty) berkorelasi dengan risiko yang lebih tinggi, yang mungkin tidak berlaku secara universal di berbagai konteks perkotaan, khususnya di lingkungan dengan karakteristik keselamatan yang berbeda dari konteks malam hari perkotaan yang diasumsikan. Ketiga, simulasi Monte Carlo menggunakan distribusi seragam atas semua masukan, yang memberikan bobot yang sama pada semua nilai input. Ini adalah sebuah penyederhanaan yang tidak mencerminkan distribusi kondisi nyata di lingkungan transit perkotaan. Pembobotan yang lebih realistis memerlukan data lapangan dari konteks studi spesifik. Keempat dan yang paling signifikan, model belum divalidasi terhadap data insiden yang tercatat secara empiris: tidak ada perbandingan antara skor keselamatan yang diprediksi dengan angka kecelakaan, catatan kejahatan, atau persepsi keselamatan yang dilaporkan oleh pengguna. Validasi semacam itu merupakan prasyarat bagi penerapan model ini sebagai alat pendukung keputusan kebijakan. Arah penelitian lanjutan yang diidentifikasi meliputi: kalibrasi fungsi keanggotaan berbasis survei persepsi pengguna atau data insiden historis, pengembangan bobot aturan yang berbeda-beda berdasarkan signifikansi empiris relatif setiap faktor, perluasan model ke konteks non-perkotaan atau siang hari dengan penyesuaian basis aturan yang sesuai, serta validasi lintas-konteks untuk menguji transferabilitas model ke kota-kota dengan karakteristik infrastruktur yang berbeda.

5. Kesimpulan

Dari perspektif kontribusi metodologis, penelitian ini menawarkan tiga hal yang membedakannya dari studi keselamatan fuzzy yang ada. Pertama, model mengintegrasikan aktivitas pejalan kaki sebagai variabel masukan utama (bukannya sebagai faktor sekunder atau diabaikan sama sekali) merespons kesenjangan yang diidentifikasi dalam literatur bahwa sebagian besar model fuzzy lalu lintas berfokus pada kendaraan tanpa pertimbangan yang memadai terhadap pengguna jalan non-motoris. Kedua, basis aturan dirancang dengan cakupan penuh 27 aturan, menghindari kelemahan umum basis aturan parsial yang dapat menghasilkan keluaran default tersembunyi untuk kombinasi masukan yang tidak tercakup. Ketiga, desain fungsi keanggotaan asimetris yang mencerminkan non-linearitas yang terdokumentasi secara empiris dalam respons keselamatan terhadap kondisi pencahayaan dan kecepatan, khususnya efek ambang batas yang tidak dapat direpresentasikan secara memadai oleh fungsi simetris.

Penelitian ini juga mengakui beberapa keterbatasan yang membatasi klaim validitas model pada tahap ini. Parameter fungsi keanggotaan ditetapkan secara apriori oleh peneliti berdasarkan

pertimbangan konseptual dan belum dikalibrasi terhadap data lapangan yang terukur. Model belum divalidasi terhadap data insiden empiris seperti catatan kecelakaan, angka kejahatan, atau survei persepsi keselamatan pengguna. Distribusi seragam yang digunakan dalam simulasi *Monte Carlo* menyederhanakan realitas distribusi kondisi lingkungan yang sesungguhnya. Dan sebagaimana diakui dalam tinjauan pustaka, basis empiris yang mendasari pemilihan variabel berasal sebagian besar dari konteks negara-negara berpenghasilan tinggi, yang mungkin memerlukan penyesuaian untuk penerapan di lingkungan perkotaan negara berkembang.

Terlepas dari keterbatasan-keterbatasan tersebut, model yang diajukan menyediakan kerangka yang transparan, dapat diaudit, dan dapat diperluas untuk penilaian keselamatan lingkungan transit perkotaan. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengejar empat arah utama: kalibrasi empiris parameter fungsi keanggotaan melalui survei persepsi pengguna atau analisis data historis insiden; validasi model terhadap skor keselamatan yang diamati di lokasi transit nyata; perluasan arsitektur model untuk mengakomodasi variabel tambahan seperti kondisi permukaan jalan, kepadatan titik penyeberangan, atau ketersediaan fasilitas pejalan kaki; serta pengujian transferabilitas model lintas konteks perkotaan yang berbeda, termasuk kota-kota dengan karakteristik infrastruktur, pola penggunaan, dan profil risiko yang berbeda dari asumsi konteks penelitian ini. Dengan perkembangan-perkembangan tersebut, pendekatan berbasis logika fuzzy yang didemonstrasikan dalam penelitian ini berpotensi berkembang dari sebuah alat simulasi eksploratif menjadi sistem pendukung keputusan yang dapat dioperasionalkan dalam perencanaan keselamatan transit perkotaan.

Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan berterimakasih kepada tim editor dan reviewer Jurnal Kajian Teknik Sipil (JKTS) dari Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta yang telah memfasilitasi penerbitan tulisan ini. Penulis juga menyatakan bahwa penulisan tulisan ini dilakukan secara independen. Penulis tidak menerima dukungan eksternal dari institusi, organisasi, atau mitra industri selain dari pihak JKTS. Selain itu, penulis juga menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan (*conflict of interest*) yang terkait dengan penulisan dan publikasi tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharya, K., Sarkar, D. & Tripathi, K. K., 2025. Assessing road safety challenges in rapidly urbanizing cities: A fuzzy logic and factor comparison method approach. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 18(1).
- Fotios, S., Unwin, J. & Farrall, S., 2015. Road lighting and pedestrian reassurance after dark: A review. *Lighting Research & Technology*, 47(4), pp. 449-469.
- Hussain, Q. et al., 2019. The relationship between impact speed and the probability of pedestrian fatality during a vehicle-pedestrian crash: A systematic review and meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, Volume 129, pp. 241-249.
- Koukol, M., Zajíčková, L., Marek, L. & Tuček, P., 2015. Fuzzy Logic in Traffic Engineering: A Review on Signal Control. 2015(1), p. 979160.
- Mamdani, E. H. & Assilian, S., 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), pp. 1-13.
- Mogyorósi, P., Szénási, S. & Laufer, E., 2024. Fuzzy-Based Road Accident Risk Assessment. *Mathematics*, 12(8), p. 1144.
- Painter, K., 1996. The influence of street lighting improvements on crime, fear and pedestrian street use, after dark. *Landscape and Urban Planning*, 35(2-3), pp. 193-201.

Trop, T., Shoshany Tavory, S. & Portnov, B. A., 2023. Factors affecting pedestrians' perceptions of safety, comfort, and pleasantness induced by public space lighting: A systematic literature review. *Environment and Behavior*, 55(3), pp. 163-211.

Welsh, B. C. & Farrington, D. P., 2022. The impact and policy relevance of street lighting for crime prevention: A systematic review based on a half-century of evaluation research. *Criminology & Public Policy*, 21(1), pp. 29-60.

Xie, L., Zhang, J. & Cheng, R., 2023. Comprehensive Evaluation of Freeway Driving Risks Based on Fuzzy Logic. *Sustainability*, 15(1), p. 810.

Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), pp. 338-353.

Zadeh, L. A., 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3(1), pp. 28-44.