



ANALISIS JALUR EVAKUASI MELALUI TANGGA UTAMA GEDUNG KAMPUS ITSB DENGAN PENDEKATAN SIMULASI

Rizky Febriansyah¹, Ilham^{*1}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Desain, Institut Teknologi dan Sains Bandung, Cikarang Pusat, Jalan Ganesha Boulevard No. 1

*Penulis korespondensi: ilham.chaniago@gmail.com

DISUBMIT 11 Agustus 2026

DIREVISI 12 Agustus 2026

DITERIMA 13 Agustus 2026

ABSTRAK Gedung utama kampus Institut Teknologi Sains Bandung (ITSB) merupakan bangunan pendidikan bertingkat empat yang pada kondisi eksisting hanya memiliki satu jalur evakuasi vertikal berupa tangga utama sebagai akses turun menuju lantai dasar. Tidak tersedianya tangga darurat atau jalur evakuasi vertikal alternatif menyebabkan seluruh penghuni bergantung pada satu jalur yang sama, sehingga berpotensi menimbulkan kepadatan dan kemacetan pada area tangga serta bordes saat terjadi kondisi darurat seperti gempa bumi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja jalur evakuasi melalui tangga utama gedung ITSB menggunakan simulasi *Thunderhead Pathfinder* v2023.2.0816, dengan fokus pada evaluasi waktu evakuasi total, tingkat kepadatan penghuni, serta identifikasi titik kemacetan (*bottleneck*) pada jalur evakuasi vertikal. Selain kondisi eksisting, penelitian ini juga menguji rekomendasi penyesuaian geometri pada area bordes/titik masuk tangga sebagai upaya mengurangi konflik arus pergerakan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting terjadi peningkatan kepadatan dan antrean pada area transisi menuju tangga serta peralihan antar lantai, terutama pada skenario dengan jumlah penghuni tinggi. Setelah dilakukan simulasi penyesuaian geometri pada area bordes pada perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder*, pola pergerakan agen menjadi lebih terdistribusi sehingga potensi *bottleneck* berkurang dan aliran evakuasi lebih stabil dibandingkan kondisi eksisting. Berdasarkan perbandingan terhadap acuan standar, skenario tertentu masih berada dalam rentang waktu evakuasi standar nasional (SNI 03-1746-2000), sedangkan pada kondisi terpadat kinerja evakuasi dipengaruhi oleh keterbatasan kapasitas jalur tangga tunggal.

KATA KUNCI Evakuasi; Gempa Bumi; Pathfinder; Tangga Utama

1 PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat kerentanan gempa bumi yang tinggi sehingga bangunan publik seperti gedung kampus harus memiliki sistem jalur evakuasi yang efektif. Gedung utama kampus ITSB merupakan bangunan bertingkat empat dengan luas total sekitar $\pm 4.000 \text{ m}^2$ dan difungsikan sejak tahun 2011. Berdasarkan kondisi eksisting, bangunan ini hanya memiliki satu jalur evakuasi vertikal berupa tangga utama tanpa adanya tangga darurat atau jalur alternatif. Kondisi tersebut menimbulkan potensi kemacetan yang signifikan apabila terjadi evakuasi darurat akibat gempa bumi, karena seluruh penghuni terpusat pada satu jalur keluar vertikal [1] [2] [3].

2 METODOLOGI

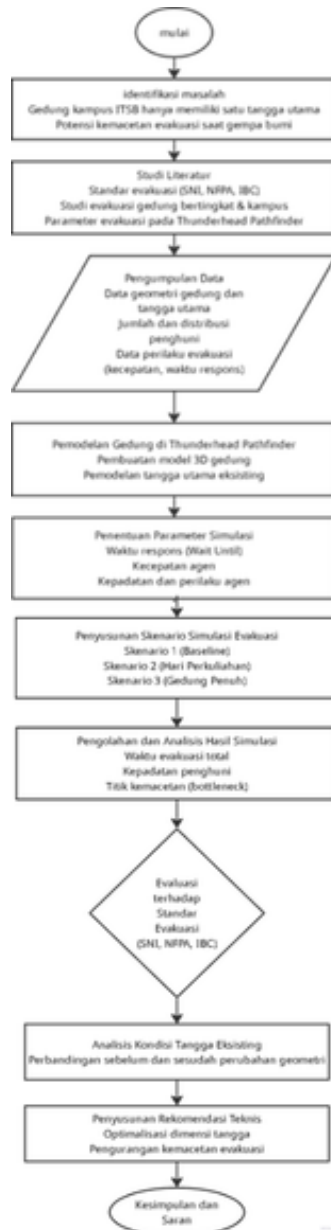
Evaluasi performa jalur evakuasi dapat dilakukan melalui pendekatan simulasi. *Thunderhead Pathfinder* merupakan perangkat lunak simulasi evakuasi berbasis

agen yang mampu memodelkan perilaku penghuni dan interaksi kepadatan secara dinamis. Skenario gempa bumi dipilih karena relevan terhadap bangunan bertingkat, di mana evakuasi vertikal menjadi krusial dan penggunaan lift tidak diperbolehkan [4] [5].

Penelitian ini berfokus pada analisis jalur evakuasi eksisting gedung ITSB melalui simulasi Pathfinder, dengan parameter utama berupa waktu evakuasi, kepadatan penghuni, dan identifikasi titik bottleneck pada tangga utama [6].

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi komputer dengan perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder* v2023.2.0816. Objek penelitian adalah jalur evakuasi eksisting Gedung Utama Kampus ITSB, dengan fokus pada tangga utama sebagai satu-satunya jalur evakuasi vertikal. Simulasi dilakukan untuk merepresentasikan proses evakuasi

penghuni pada kondisi gempa bumi dengan variasi skenario okupansi dan parameter perilaku agen.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Evaluasi kinerja evakuasi dilakukan menggunakan indikator waktu evakuasi total, kepadatan pada jalur evakuasi vertikal, serta kecepatan minimum pergerakan penghuni. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan acuan standar nasional dan internasional. Standar Nasional Indonesia (SNI 03-1746-2000) digunakan sebagai referensi waktu evakuasi bangunan menengah, sedangkan standar internasional seperti National Fire

Protection Association (NFPA 101) dan International Building Code (IBC) digunakan sebagai *benchmark* kinerja evakuasi manusia (*human evacuation performance*), khususnya terkait konsep *time-to-safety* dan kapasitas jalur evakuasi vertikal. Penggunaan NFPA dan IBC dalam penelitian ini tidak ditujukan sebagai standar proteksi kebakaran, melainkan sebagai referensi internasional untuk mengevaluasi performa pelepasan massa manusia pada bangunan bertingkat.

Data dan Parameter Simulasi. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer meliputi observasi kondisi jalur evakuasi, geometri tangga dan bordes, serta estimasi jumlah dan distribusi penghuni per lantai berdasarkan kondisi operasional Gedung Utama Kampus ITSb Tahun Akademik 2024/2025.



Gambar 2 Gedung ITSb Tampak Citra Satelit

Data penghuni mencakup akumulasi mahasiswa, dosen, dan staf, yang dimodelkan dalam beberapa skenario okupansi untuk merepresentasikan kondisi maksimum dan hari perkuliahan normal. Perbedaan karakteristik penghuni, seperti variasi usia dan kemampuan mobilitas, tidak dimodelkan secara kategorikal, tetapi direpresentasikan melalui variasi parameter perilaku agen. Data sekunder berupa standar evakuasi nasional dan internasional serta literatur terkait digunakan sebagai acuan evaluasi hasil simulasi. Simulasi evakuasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder* dengan memasukkan parameter perilaku agen pada menu *Edit Profiles*, yang meliputi waktu respons awal

1) (*Wait Until*), waktu percepatan dari kondisi diam ke kecepatan berjalan normal; 2) (*Acceleration Time* dengan distribusi uniform), durasi agen mempertahankan arah gerak sebelum mengalah saat interaksi; 3) (*Persist Time*), waktu reaksi agen terhadap potensi tabrakan; 4) (*Collision Response Time*), serta faktor perlambatan kecepatan akibat peningkatan kepadatan; 5) (*Slow Factor*). Output simulasi dianalisis untuk memperoleh waktu evakuasi total, kepadatan pada area tangga dan bordes, titik kemacetan dominan, serta perubahan kecepatan agen selama proses evakuasi [7].

Skenario Simulasi. Simulasi dilakukan dalam tiga skenario utama: 1) Skenario 1 (*Baseline*): okupansi maksimum (± 755 agen) dengan parameter *default*. 2) Skenario 2 (Hari perkuliahan): okupansi harian kampus dengan variasi waktu respons dan kecepatan agen. 3) Skenario 3 (*Worst-case*): okupansi maksimum dengan variasi perilaku agen realistis (kecepatan dan waktu respons) [8].

Konversi Data Kuesioner ke Parameter Simulasi Evakuasi. Data kuesioner yang diperoleh dalam penelitian ini merepresentasikan persepsi dan kecenderungan perilaku penghuni saat menghadapi kondisi gempa bumi dan evakuasi. Meskipun bersifat persepsional, data tersebut dikonversi ke dalam bentuk numerik agar dapat digunakan sebagai dasar penentuan parameter perilaku agen pada simulasi evakuasi menggunakan perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder* [9].

Setiap butir pertanyaan kuesioner menggunakan skala Likert 1–5, yang kemudian diolah secara statistik untuk memperoleh nilai rerata (*mean*) dan distribusi respons. Nilai numerik ini tidak digunakan secara langsung sebagai input tunggal, melainkan sebagai acuan logis dan empiris dalam pemilihan rentang parameter perilaku agen, seperti waktu respons awal, kecenderungan mengikuti arus mayoritas, serta kepatuhan terhadap jalur evakuasi [10].

Tabel 1 Skenario Simulasi

Skenario	Parameter yang Diubah	Tujuan
Skenario 1	Jumlah penghuni maksimum (755 agen), tanpa waktu respons, kecepatan default	Sebagai kondisi baseline untuk melihat performa jalur evakuasi pada kapasitas maksimum bangunan tanpa faktor perilaku manusia.
	Jumlah penghuni pada hari aktif perkuliahan (Senin–Jumat), kecepatan gerak dimodelkan berdasarkan perbedaan fisiologis antar kelompok, yang mencerminkan rentang usia waktu respons 2–12 detik	Mengukur dampak perilaku penghuni nyata (kecepatan & response delay) terhadap waktu evakuasi dan pembentukan titik hambatan evakuasi saat kondisi harian kampus.
Skenario 2	Jumlah penghuni 755 (seperti Skenario 1), namun menggunakan kecepatan gerak dan waktu respons realistis (seperti Skenario 2)	Menguji kondisi terburuk (<i>worst-case</i>) ketika populasi penuh dikombinasikan dengan perilaku manusia dan variasi kapasitas mobilitas antar kelompok usia.
	dimodelkan berdasarkan perbedaan fisiologis antar kelompok, yang mencerminkan rentang usia.	

Proses konversi dilakukan dengan memetakan hasil kuesioner ke dalam parameter yang tersedia pada menu *Edit Profiles* di *Thunderhead Pathfinder*, baik parameter *default* maupun *advanced behavior*. Sebagai contoh, kecenderungan mengikuti arus mayoritas yang memiliki nilai rerata tinggi diterjemahkan ke dalam pengaturan preferensi rute dan interaksi antar agen, sementara hasil kuesioner terkait waktu respons digunakan untuk menentukan rentang waktu respons acak (*wait until*) yang diterapkan pada agen simulasi. Pendekatan ini memungkinkan perilaku agen dalam simulasi merepresentasikan kondisi penghuni secara lebih realistis tanpa mengabaikan batasan dan struktur parameter yang disediakan oleh perangkat lunak.

Dengan demikian, penggunaan data kuesioner dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan model perilaku bawaan *Pathfinder*, melainkan untuk mengkalibrasi dan memvalidasi parameter simulasi agar selaras dengan

karakteristik penghuni Gedung Utama Kampus ITSB. Pendekatan ini memastikan bahwa hasil simulasi tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga memiliki dasar empiris yang berasal dari persepsi dan kecenderungan perilaku pengguna gedung yang menjadi objek penelitian.

Tabel 2 Pemetaan P4–P8 terhadap Parameter Profil Agen Thunderhead Pathfinder v2023.2.0816

Kode	Indikator Perilaku	Parameter Pathfinder (v2024)	Nilai yang Digunakan	Fungsi dalam Simulasi
P4	Reaksi awal terhadap gempa	<i>Wait Until</i>	2 – 12 s	Pendekatan teknis untuk merepresentasikan variasi waktu mulai evakuasi akibat keterbatasan parameter pra-gerak di Pathfinder
P5	Keterlambatan mulai evakuasi	<i>Acceleration Time (uniform)</i>	1.5 – 3,0 s	Mewakili fase fisik awal agen dalam mencapai kecepatan berjalan normal
P6	Kesiapan menuju tangga utama	<i>Persist Time</i>	0,8 – 2,5 s	Agen tidak mudah berhenti atau ragu
P7	Mengikuti arah evakuasi	<i>Collision Response Time</i>	0,5 – 2,0 s	Agen menyesuaikan arah tanpa konflik
P8	Kepatuhan terhadap jalur evakuasi	<i>Slow Factor</i>	0,2 – 0,6	Agen melambat saat padat, tidak memaksa

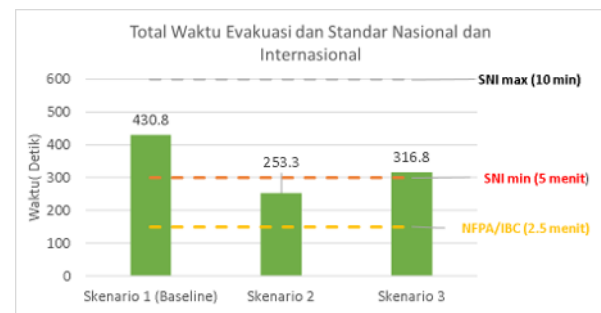
Prosedur Simulasi. Prosedur simulasi diawali dengan pemodelan tiga dimensi (3D) gedung utama kampus ITSB berdasarkan kondisi geometri eksisting, meliputi tata letak lantai, koridor, tangga utama, dan area keluar. Model 3D ini disusun sedemikian rupa agar merepresentasikan kondisi aktual bangunan yang menjadi objek penelitian. Selanjutnya, simulasi evakuasi dijalankan menggunakan *Steering Mode* pada perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder*, yang memungkinkan agen bergerak secara adaptif dengan mempertimbangkan interaksi antar individu, kepadatan lokal, serta hambatan geometrik pada jalur evakuasi.

Setiap agen diberikan parameter perilaku yang telah ditetapkan sebelumnya, seperti kecepatan berjalan, waktu respons awal,

dan karakteristik interaksi, sesuai dengan skenario simulasi yang diuji. Simulasi dilakukan untuk beberapa skenario dengan variasi jumlah penghuni dan pola respons, sementara parameter geometrik bangunan dipertahankan tetap untuk menjaga keterbandingan hasil.

Output simulasi dianalisis secara kuantitatif untuk memperoleh waktu evakuasi total, distribusi waktu evakuasi per lantai, pola kepadatan selama proses evakuasi, serta identifikasi lokasi bottleneck dominan pada jalur evakuasi, khususnya di area tangga utama. Hasil analisis ini kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja jalur evakuasi eksisting dan untuk menilai efektivitas rekomendasi perbaikan yang diusulkan.

3 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN



Gambar 3 Grafik Total Waktu Hasil Simulasi Evakuasi Dengan Standar Nasional Indonesia Dan Standar Internasional

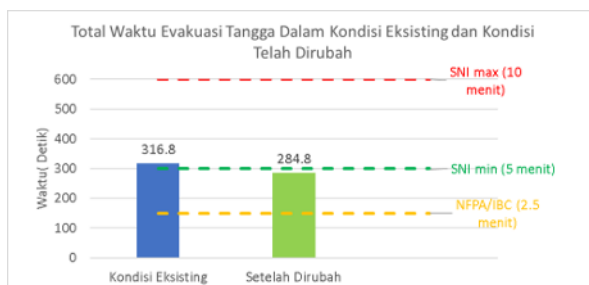
Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting, seluruh penghuni bergantung pada satu jalur tangga utama sebagai satu-satunya jalur evakuasi vertikal. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi arus yang tinggi pada area tangga dan bordes, sehingga terbentuk titik hambatan evakuasi (*bottleneck*) pada zona transisi antar lantai.

Pada skenario okupansi maksimum (Skenario 1: 755 agen), kepadatan meningkat hingga berada pada tingkat padat-sangat padat, yang berdampak langsung pada penurunan kecepatan pergerakan agen serta munculnya pola pergerakan berhenti-jalan (*stop-and-go*). Total waktu evakuasi pada skenario ini mencapai 430,8 detik (± 7 menit 10 detik). Pada skenario hari perkuliahan (Skenario 2:

360 agen), variasi waktu respons menghasilkan arus evakuasi yang tidak seragam, sehingga penumpukan tetap terjadi pada fase tertentu ketika gelombang evakuasi dari beberapa lantai bertemu di area tangga, meskipun total waktu evakuasi lebih singkat, yaitu 253,3 detik (± 4 menit 13 detik).

Skenario terburuk (Skenario 3: 755 agen dengan parameter perilaku realistis) menunjukkan bahwa keterbatasan jalur tunggal menjadi faktor dominan yang menurunkan kinerja evakuasi. Meskipun waktu evakuasi total pada kondisi eksisting tercatat sebesar 316,8 detik (± 5 menit 16 detik), nilai ini berada pada batas bawah rentang waktu evakuasi menurut SNI 03-1746-2000. Namun, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa proses evakuasi berlangsung dalam kondisi kepadatan tinggi dan *bottleneck* yang signifikan, yang tidak sejalan dengan prinsip jalur evakuasi yang aman, lancar, dan bebas hambatan sebagaimana ditekankan dalam regulasi nasional.

Dengan demikian, meskipun secara numerik waktu evakuasi masih berada dalam rentang waktu yang direkomendasikan oleh SNI, kinerja evakuasi gedung utama ITSB belum dapat dinyatakan memenuhi standar keselamatan evakuasi secara memadai, karena hanya mengandalkan satu jalur evakuasi vertikal tanpa redundansi. Kondisi ini menyebabkan tingginya ketergantungan terhadap satu elemen kritis dan meningkatkan risiko kegagalan evakuasi apabila terjadi gangguan pada jalur tersebut saat gempa bumi.



Gambar 4 Total Evakuasi Tangga Dalam Kondisi Eksisting dan Kondisi Telah Dirubah

Simulasi penyesuaian geometri tangga menunjukkan adanya peningkatan kinerja, ditandai dengan penurunan waktu evakuasi dari 316,8 detik menjadi 284,8 detik (± 4 menit 47 detik) serta aliran pergerakan yang lebih stabil. Namun demikian, hasil ini belum menghilangkan titik hambatan evakuasi pada kondisi okupansi penuh, karena seluruh arus evakuasi tetap terfokus pada satu jalur vertikal. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan geometri tangga bersifat parsial dan tidak dapat menggantikan kebutuhan akan jalur evakuasi alternatif berupa tangga darurat tambahan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa gedung utama kampus ITSB masih memerlukan penambahan jalur evakuasi vertikal untuk memenuhi prinsip keselamatan evakuasi sebagaimana diatur dalam standar nasional, serta untuk mengurangi risiko kemacetan dan kegagalan evakuasi pada kondisi gempa bumi dengan okupansi tinggi.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pada tiga skenario evakuasi, diperoleh waktu evakuasi total sebesar 430,8 detik (± 7 menit 10 detik) pada Skenario 1, 253,3 detik (± 4 menit 13 detik) pada Skenario 2, dan 316,8 detik (± 5 menit 16 detik) pada Skenario 3 pada kondisi eksisting. Rata-rata waktu evakuasi dari seluruh skenario adalah 333,6 detik (± 5 menit 34 detik). Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan satu jalur evakuasi vertikal berupa tangga utama menyebabkan konsentrasi arus yang tinggi dan memicu terbentuknya *bottleneck* pada area bordes dan tangga, terutama pada kondisi okupansi tinggi.

Meskipun secara numerik sebagian hasil simulasi masih berada dalam rentang waktu evakuasi yang direkomendasikan oleh SNI 03-1746-2000 (5–10 menit) untuk bangunan menengah, proses evakuasi berlangsung dalam kondisi kepadatan tinggi dan aliran yang tidak stabil akibat ketergantungan pada jalur tunggal. Oleh karena itu, jalur evakuasi vertikal eksisting belum dapat dinyatakan

memenuhi ketentuan keselamatan evakuasi secara memadai menurut SNI, karena tidak menyediakan redundansi jalur evakuasi dan masih berpotensi menimbulkan kemacetan signifikan pada kondisi darurat gempa bumi.

Perbandingan dengan pendekatan kinerja standar internasional seperti NFPA 101 dan International *Building Code* (IBC) menunjukkan bahwa seluruh skenario simulasi belum memenuhi *benchmark time-to-safety* sekitar $\pm 2,5$ menit. Hal ini menegaskan bahwa keterbatasan utama sistem evakuasi bukan terletak pada perilaku penghuni semata, melainkan pada kapasitas dan konfigurasi jalur evakuasi vertikal.

Simulasi penyesuaian geometri tangga dan bordes dilakukan sebagai eksperimen analitis untuk mengevaluasi sensitivitas kinerja evakuasi terhadap perubahan dimensi jalur. Hasil simulasi menunjukkan penurunan waktu evakuasi dari 316,8 detik (± 5 menit 16 detik) menjadi 284,8 detik (± 4 menit 47 detik) serta aliran pergerakan yang lebih stabil. Namun demikian, perubahan geometri tersebut tidak bersifat realistis untuk diterapkan pada bangunan eksisting karena keterbatasan struktural, tata ruang, dan fungsi bangunan. Dengan demikian, hasil simulasi ini tidak dimaksudkan sebagai rekomendasi implementatif, melainkan sebagai pembanding untuk menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas jalur secara fisik dapat memperbaiki kinerja evakuasi, tetapi tetap tidak menghilangkan *bottleneck* selama hanya tersedia satu jalur evakuasi vertikal.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa peningkatan keselamatan evakuasi gedung utama kampus ITSB tidak dapat dicapai hanya melalui optimasi geometri tangga, melainkan memerlukan penambahan jalur evakuasi vertikal alternatif berupa tangga darurat sebagai solusi struktural jangka panjang, serta strategi manajerial dan non-struktural sebagai mitigasi jangka pendek.

5 REKOMENDASI

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis kinerja evakuasi, penambahan jalur evakuasi vertikal berupa tangga darurat baru direkomendasikan sebagai solusi jangka panjang yang paling efektif untuk meningkatkan redundansi jalur keluar dan mendekati pemenuhan standar keselamatan evakuasi, khususnya jika mengacu pada pendekatan kinerja standar internasional. Keberadaan lebih dari satu jalur evakuasi vertikal diperlukan untuk mendistribusikan arus penghuni dan mengurangi ketergantungan pada satu tangga utama yang terbukti menjadi sumber utama *bottleneck* pada kondisi okupansi tinggi.

Namun demikian, pada bangunan eksisting, perubahan fisik berskala besar seperti pembongkaran atau pelebaran tangga utama tidak selalu memungkinkan untuk diterapkan karena keterbatasan teknis, tata ruang, dan biaya. Oleh karena itu, strategi peningkatan keselamatan jangka pendek diarahkan pada pendekatan manajerial dan non-struktural, dengan mempertimbangkan bahwa respons penghuni pada kondisi gempa bumi bersifat spontan dan sulit dikendalikan secara penuh.

Strategi jangka pendek tersebut meliputi peningkatan kejelasan rambu dan denah evakuasi, pengaturan prosedur evakuasi bertahap untuk menghindari pelepasan arus secara simultan dari seluruh lantai, serta pengarahan arus pada titik-titik transisi menuju tangga utama. Selain itu, diperlukan perhatian khusus bagi penghuni dengan keterbatasan mobilitas atau kondisi kesehatan tertentu melalui mekanisme pendampingan, serta pengosongan area transisi sebelum tangga dari elemen-elemen yang dapat mempersempit lebar jalur efektif. Sosialisasi dan pelaksanaan simulasi evakuasi secara berkala juga direkomendasikan untuk meningkatkan kesiapsiagaan dan membentuk pola pergerakan yang lebih tertib saat terjadi gempa bumi.

Hasil simulasi penyesuaian geometri pada area tangga dan bordes menunjukkan adanya peningkatan kinerja evakuasi berupa aliran pergerakan yang lebih stabil dan penurunan waktu evakuasi dibandingkan kondisi eksisting. Namun, penyesuaian tersebut diposisikan sebagai kajian analitis untuk memahami sensitivitas kinerja evakuasi terhadap kapasitas jalur, bukan sebagai rekomendasi implementatif pada bangunan eksisting. Dengan demikian, keterbatasan kapasitas jalur evakuasi vertikal tunggal tetap menjadi faktor pembatas utama, sehingga penambahan jalur evakuasi alternatif berupa tangga darurat tetap dipandang sebagai prioritas utama dalam upaya peningkatan keselamatan penghuni, khususnya pada kondisi okupansi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Chen, X. Liu dan H. Zhou, "Agent-based simulation of evacuation in university buildings," *Journal of Building Performance*, vol. 8, no. 1, pp. 12-20, 2020.
- [2] K. Fridolf, E. Ronchi dan D. Nilsson, "Modeling movement speed reduction in smoke," *Fire Safety Journal*, vol. 112, 2020.
- [3] R. Gupta dan A. Sharma, "Simulation-based analysis of emergency evacuation from educational buildings using agent-based modeling," *Safety Science*, 2021.
- [4] A. Ismail dan M. Kurniawan, "Evaluasi jalur evakuasi vertikal gedung pendidikan menggunakan pemodelan simulasi," *Jurnal Teknologi Bangunan*, vol. 9, no. 1, pp. 37-45, 2023.
- [5] A. P. Kusuma dan S. Hadi, "Evaluasi performa tangga darurat pada gedung bertingkat dengan simulasi Pathfinder," *Jurnal Riset Teknik Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 22-30, 2023.
- [6] D. Nugroho dan A. Setyawan, "Simulasi jalur evakuasi kampus menggunakan Thunderhead Pathfinder," *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, vol. 10, no. 2, pp. 55-63, 2022.
- [7] H. R. Permana dan D. Wirawan, "Kajian evakuasi saat gempa pada gedung bertingkat menggunakan simulasi agen," *Jurnal Keteknik Sipil*, vol. 7, no. 3, pp. 64-70, 2021.
- [8] R. D. Putra dan F. R. Nasution, "Simulasi evakuasi menggunakan software pathfinder pada gedung bertingkat sekolah," *Jurnal Konstruksi*, vol. 10, no. 1, pp. 18-25, 2022.
- [9] T. Rahman dan W. Sutopo, "Simulasi evakuasi gedung kampus menggunakan Thunderhead Pathfinder: Studi kasus pada gedung F," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, vol. 7, no. 2, pp. 84-91, 2021.
- [10] J. Zhang, Q. Cheng dan Y. Luo, "Study on evacuation time in high-density buildings using Pathfinder," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020.

