Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung, Vol 15 No.1, April 2026

Submitted: 06-04-2026
Revised: 13-04-2026
Submitted: 20-04-2026
Revised: 25-04-2026
Accepted:28-02-2026
Published:30-04-2026

Implementasi Sistem Proteksi Kebakaran Terintegrasi untuk Meningkatkan Keselamatan Ruangan di Gedung Kampus Unpas Setiabudi

Toto Supriyono, Yudha Hany Pratama, Lutfi Khoirul Ihsan, Mochammad Rafly, Riza Fathoni Ishak

[1]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pasundan
[2]Program Studi Teknik Industri, Universitas Pasundan
Email: supriyono.toto@unpas.ac.id

Abstrak. Kebakaran pada bangunan bertingkat, khususnya gedung pendidikan, merupakan risiko kritis yang dapat menimbulkan kerugian material dan korban jiwa. Permasalahan utama dalam mitigasi kebakaran adalah kurangnya integrasi antar sistem proteksi, seperti deteksi, alarm, pemadam otomatis, dan jalur evakuasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi pada gedung kampus melalui pendekatan kuantitatif berbasis observasi lapangan dan simulasi. Parameter yang dianalisis meliputi waktu deteksi, respons sistem sprinkler, waktu evakuasi, dan laju penyebaran api. Hasil menunjukkan bahwa sistem terintegrasi mampu menurunkan waktu deteksi sebesar ±40%, mempercepat evakuasi hingga ±33%, serta mengurangi laju pelepasan panas hingga 50–60%. Selain itu, rasio keselamatan (ASET/RSET) meningkat dari kondisi tidak aman (<1) menjadi aman (>1). Penelitian ini memberikan kontribusi berupa model evaluasi sistem proteksi kebakaran yang komprehensif dan aplikatif untuk meningkatkan keselamatan bangunan pendidikan.

Kata kunci, proteksi kebakaran, sistem terintegrasi, evakuasi, sprinkler, keselamatan gedung.

1 Pendahuluan

Kebakaran pada bangunan gedung bertingkat merupakan salah satu ancaman keselamatan yang signifikan, terutama pada fasilitas pendidikan dengan tingkat hunian tinggi dan aktivitas yang dinamis. Lingkungan kampus memiliki karakteristik khusus, seperti kepadatan penghuni yang fluktuatif, penggunaan peralatan listrik secara intensif, serta keberadaan laboratorium yang berpotensi meningkatkan risiko kebakaran. Oleh karena itu, sistem proteksi kebakaran yang andal dan terintegrasi menjadi kebutuhan fundamental untuk menjamin keselamatan penghuni gedung.

Secara umum, sistem proteksi kebakaran terdiri dari proteksi aktif dan pasif. Sistem proteksi aktif mencakup detektor asap, sistem alarm, dan sprinkler otomatis, sedangkan sistem proteksi pasif meliputi desain bangunan tahan api dan jalur evakuasi. Efektivitas mitigasi kebakaran sangat bergantung pada sinergi antara kedua sistem tersebut. Namun, pada praktiknya, banyak bangunan masih menerapkan sistem proteksi secara parsial, sehingga respons terhadap kebakaran menjadi lambat dan kurang efektif.

Berbagai standar internasional, seperti NFPA 101 dan NFPA 13, telah memberikan pedoman dalam perancangan sistem keselamatan kebakaran, termasuk sistem evakuasi dan instalasi sprinkler. Di Indonesia, regulasi terkait juga telah diatur dalam SNI dan peraturan pemerintah. Meskipun demikian, implementasi di lapangan masih menghadapi berbagai kendala, khususnya dalam hal integrasi sistem dan pemeliharaan berkala.

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa keterlambatan deteksi dan ketidakefektifan sistem pemadam berkontribusi signifikan terhadap meningkatnya risiko kebakaran. Selain itu, desain jalur evakuasi yang tidak optimal dapat memperpanjang waktu evakuasi dan meningkatkan potensi korban jiwa. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu aspek sistem proteksi kebakaran secara terpisah, tanpa mempertimbangkan interaksi antar komponen secara menyeluruh.

Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat research gap berupa kurangnya studi yang mengkaji sistem proteksi kebakaran secara terintegrasi, khususnya pada bangunan pendidikan di Indonesia, dengan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem proteksi kebakaran terintegrasi dengan mengevaluasi parameter utama, yaitu waktu deteksi, respons pemadam, waktu evakuasi, dan laju penyebaran api.

Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan model evaluasi sistem proteksi kebakaran berbasis pendekatan integratif yang menggabungkan observasi lapangan dan simulasi kuantitatif. Selain itu, penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan studi sebelumnya dengan mempertimbangkan keterkaitan antar sistem secara simultan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam peningkatan keselamatan gedung kampus serta mendukung pengembangan desain keselamatan berbasis kinerja (performance-based design).

2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

A. Material (Alat dan Bahan Penelitian)

Penelitian ini menggunakan kombinasi data lapangan dan perangkat analisis untuk mengevaluasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi. Material yang digunakan meliputi:

1. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah ruangan laboratorium pada Gedung Kampus Unpas Setiabudi yang memiliki karakteristik bangunan bertingkat dengan aktivitas akademik intensif dan tingkat hunian tinggi.

2. Perangkat Sistem Proteksi Kebakaran

Sistem yang dianalisis terdiri dari:
Detektor asap (smoke detector)
Sistem alarm kebakaran
Sistem sprinkler otomatis
Jalur evakuasi dan rambu keselamatan

3. Data Penelitian

Data primer: hasil observasi langsung berupa tata letak ruangan, distribusi alat proteksi, serta jalur evakuasi
Data sekunder: gambar teknis bangunan, standar keselamatan (SNI, NFPA), serta literatur ilmiah terkait proteksi kebakaran
Perangkat Analisis dan Simulasi

4. Model matematis pertumbuhan api

Analisis waktu evakuasi
Pendekatan perbandingan kondisi eksisting dan sistem terintegrasi.

2.2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis observasi lapangan dan simulasi matematis untuk menganalisis efektivitas implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi pada laboratorium di Kampus Unpas Setiabudi dengan jumlah penghuni sebanyak 0 orang. Pendekatan ini dirancang untuk menjawab tujuan penelitian secara komprehensif dengan mengevaluasi parameter utama keselamatan kebakaran, yaitu waktu deteksi, respons sistem pemadam, waktu evakuasi penghuni, dan laju penyebaran api. Objek penelitian adalah ruangan laboratorium di Kampus Unpas Setiabudi yang memiliki karakteristik bangunan bertingkat dengan tingkat hunian tinggi dan aktivitas dinamis. Sistem proteksi kebakaran yang dianalisis meliputi detektor asap, sistem alarm kebakaran, sistem sprinkler otomatis, serta jalur evakuasi. Penelitian membandingkan dua kondisi, yaitu kondisi eksisting dan kondisi setelah implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi.

Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data primer melalui observasi langsung terhadap kondisi gedung, termasuk tata letak ruangan, distribusi alat proteksi kebakaran, serta jalur evakuasi. Data sekunder diperoleh dari dokumen teknis gedung, standar keselamatan kebakaran, dan literatur ilmiah. Selanjutnya dilakukan identifikasi potensi sumber kebakaran, seperti instalasi listrik dan peralatan elektronik.

Untuk mencapai tujuan pertama, yaitu mengevaluasi waktu deteksi kebakaran, dilakukan analisis respons sistem deteksi terhadap perubahan kondisi lingkungan. Waktu deteksi total dihitung menggunakan persamaan:

$$t_d = t_s + t_r \quad (1)$$

t_d adalah waktu deteksi total, t_s adalah waktu sensor mendeteksi perubahan, dan t_r adalah waktu respons sistem alarm. Perbandingan dilakukan antara sistem eksisting dan sistem terintegrasi untuk menilai peningkatan kinerja deteksi.
Dalam menganalisis respons sistem pemadam otomatis, digunakan model pertumbuhan api berbasis persamaan kuadratik:

$$Q = \alpha t^2 \quad (2)$$

Di mana Q adalah laju pelepasan panas, α adalah koefisien pertumbuhan api, dan t adalah waktu. Aktivasi sprinkler dianalisis berdasarkan waktu pencapaian temperatur kritis. Efektivitas sprinkler dalam mengendalikan kebakaran dihitung menggunakan:

$$\eta_{spr} = \frac{Q_{tanpa} - Q_{dengan}}{Q_{tanpa}} \times 100\% \quad (3)$$

Di mana η_{spr} adalah efisiensi sistem sprinkler. Untuk tujuan ketiga, yaitu mengevaluasi waktu evakuasi penghuni, digunakan pendekatan waktu tempuh berbasis kapasitas jalur evakuasi:

$$t_e = \frac{L}{v} + \frac{N}{C} \quad (4)$$

Di mana t_e adalah waktu evakuasi, L adalah jarak evakuasi, v adalah kecepatan pergerakan manusia, N adalah jumlah penghuni, dan C adalah kapasitas jalur evakuasi. Analisis ini dilakukan untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah implementasi sistem terintegrasi. Tingkat keselamatan evakuasi dievaluasi menggunakan rasio antara waktu aman evakuasi (ASET) dan waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi (RSET):

$$Safety\ Ratio = \frac{ASET}{RSET} \quad (5)$$

Nilai rasio lebih besar dari 1 menunjukkan kondisi evakuasi yang aman. Untuk mencapai tujuan keempat, yaitu mengembangkan model sistem proteksi kebakaran terintegrasi, penelitian ini menyusun kerangka sistem yang menghubungkan detektor, alarm, sprinkler, dan jalur evakuasi dalam satu sistem yang terkoordinasi. Model ini dikembangkan berdasarkan hasil analisis simulasi serta disesuaikan dengan kondisi aktual ruangan perkuliahan di Kampus Unpas Setiabudi.

3 Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian diperoleh dari analisis komparatif antara kondisi eksisting sistem proteksi kebakaran ruangan perkuliahan di Gedung Kampus Unpas Setiabudi dengan skenario sistem proteksi kebakaran terintegrasi yang diusulkan. Parameter utama yang dianalisis meliputi waktu deteksi kebakaran, waktu respons sistem pemadam (sprinkler), waktu evakuasi penghuni, serta laju pelepasan panas (api).

3.1. Waktu Deteksi Kebakaran

Berdasarkan hasil simulasi, waktu deteksi kebakaran, seperti disajikan pada Tabel 1 pada kondisi eksisting mencapai rata-rata 120 detik sejak awal kejadian kebakaran. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan jumlah dan distribusi detektor asap serta belum terintegrasinya sistem deteksi dengan sistem alarm secara optimal. Setelah implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi, waktu deteksi menurun menjadi sekitar 70 detik. Penurunan sebesar ±40% ini menunjukkan bahwa integrasi sistem deteksi dengan alarm dan monitoring pusat mampu meningkatkan kecepatan respons awal terhadap kebakaran. Hasil ini sejalan dengan penelitian Chen et al. (2021) yang menyatakan bahwa integrasi sensor dapat meningkatkan akurasi dan kecepatan deteksi kebakaran.

Tabel 1. Waktu deteksi kebakaran

Percobaan	Eksisting (s)	Terintegrasi (s)
1	118	72
2	122	68
3	120	70
4	125	69
5	119	71
Rata-rata	120.8	70

3.2. Respons Sistem Pemadam (Sprinkler)

Tabel 2 menampilkan aktivasi sprinkler. Analisis menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting, aktivasi sistem sprinkler mengalami keterlambatan akibat kurang optimalnya sistem kontrol dan distribusi panas yang tidak terdeteksi secara merata. Pada sistem terintegrasi, sprinkler mampu aktif lebih cepat setelah ambang batas temperatur tercapai. Hal ini berdampak langsung pada penurunan laju pertumbuhan api. Berdasarkan model simulasi, laju pelepasan panas dapat ditekan hingga sekitar 50% dibandingkan dengan kondisi tanpa sistem terintegrasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem sprinkler yang terhubung dengan sistem deteksi dan alarm mampu bekerja lebih efektif dalam mengendalikan kebakaran pada tahap awal.

Tabel 2. Waktu aktivasi sprinkler

Percobaan	Eksisting (s)	Terintegrasi (s)
1	210	150
2	220	145
3	215	148
4	225	152
5	218	149
Rata-rata	217.6	148.8

3.3. Waktu Evakuasi Penghuni

Waktu evakuasi merupakan parameter kritis dalam keselamatan gedung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa waktu evakuasi pada kondisi eksisting mencapai rata-rata 45 menit, terutama disebabkan oleh kurangnya informasi yang jelas bagi penghuni serta potensi kemacetan pada jalur evakuasi. Setelah implementasi sistem terintegrasi, waktu evakuasi menurun menjadi sekitar 3,8 menit. Peningkatan ini dipengaruhi oleh sistem alarm yang lebih responsif serta pengelolaan jalur evakuasi yang lebih terarah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Wang et al. (2020) yang menunjukkan bahwa desain dan manajemen jalur evakuasi berpengaruh signifikan terhadap waktu evakuasi.

Tabel 3. Evaluasi keselamatan

Percobaan	Jumlah Penghuni (orang)	Jarak Evakuasi (m)	Waktu Evakuasi Eksisting (menit)	Waktu Evakuasi Terintegrasi (menit)
1	10	45	5.8	3.9
2	9	45	5.5	3.6
3	10	45	5.7	3.8
4	11	45	6	4
5	10	45	5.6	3.7
Rata-rata	10	45	5.72	3.8

3.4. Penyebaran Api

Simulasi pertumbuhan api menunjukkan bahwa tanpa sistem proteksi terintegrasi, kebakaran berkembang secara cepat mengikuti pola pertumbuhan kuadratik. Hal ini meningkatkan risiko terjadinya flashover dalam waktu singkat. Sebaliknya, pada sistem terintegrasi, aktivasi sprinkler yang lebih cepat mampu menghambat pertumbuhan api sehingga memperlambat penyebaran panas dan asap. Dengan demikian, risiko kerusakan struktural dan korban jiwa dapat diminimalkan.

Tabel 4. Laju penyebaran api (panas) (kW)

Waktu (s)	Tanpa Sistem	Dengan Sistem
30	45	40
60	180	130
90	405	250
120	720	360
150	1125	520

Tabel 5. Evaluasi keselamatan

Kondisi	ASET (menit)	RSET (menit)	Safety Ratio	
Eksisting	12	15	0.80	✗
Terintegrasi	14	10	1.40	☑

Simulasi pertumbuhan api menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan antara kedua kondisi. Pada kondisi eksisting, pertumbuhan api mengikuti pola **kuadratik cepat (fast fire growth)**, yang berpotensi menyebabkan *flashover* dalam waktu singkat. Sebaliknya, pada sistem terintegrasi, pertumbuhan api dapat dikendalikan sehingga berubah menjadi **medium fire growth**. Hal ini disebabkan oleh:

- Aktivasi sprinkler yang lebih cepat
- Penurunan temperatur ruang akibat pendinginan dini
- Pengendalian suplai oksigen secara tidak langsung

Dengan demikian, sistem terintegrasi tidak hanya menunda perkembangan api, tetapi juga memperpanjang waktu aman bagi penghuni untuk melakukan evakuasi.

3.4. Analisis Risiko

Analisis risiko telah dilakukan untuk mengevaluasi tingkat bahaya kebakaran pada ruangan di Gedung Kampus Unpas Setiabudi berdasarkan hasil pengolahan data yang telah diperoleh. Pendekatan yang digunakan mengacu pada konsep risiko sebagai fungsi dari probabilitas kejadian dan dampak yang ditimbulkan. Parameter utama yang dianalisis meliputi waktu deteksi kebakaran, kecepatan respons sistem pemadam, laju penyebaran api, serta waktu evakuasi penghuni.

3.5. Risiko pada Kondisi Eksisting

Berdasarkan data hasil pengukuran, kondisi eksisting menunjukkan tingkat risiko yang relatif tinggi. Waktu deteksi kebakaran rata-rata sebesar 120,8 detik mengindikasikan keterlambatan dalam identifikasi awal kejadian kebakaran. Keterlambatan ini berdampak langsung pada peningkatan laju penyebaran api, yang ditunjukkan oleh nilai laju pelepasan panas yang mencapai 1125 kW dalam waktu 150 detik. Hal ini menunjukkan karakteristik kebakaran dengan kategori fast fire growth, yang berpotensi menyebabkan kondisi flashover dalam waktu singkat.

Selain itu, waktu aktivasi sprinkler yang relatif lambat (rata-rata 217,6 detik) menyebabkan sistem pemadam tidak mampu mengendalikan kebakaran pada fase awal. Dampaknya, api berkembang secara tidak terkendali sehingga meningkatkan risiko kerusakan struktural dan korban jiwa. Dari sisi evakuasi, waktu evakuasi rata-rata sebesar 15,08 menit lebih besar dibandingkan dengan waktu aman evakuasi (ASET = 12 menit), sehingga menghasilkan nilai rasio keselamatan kurang dari 1. Kondisi ini menunjukkan bahwa penghuni tidak memiliki waktu yang cukup untuk menyelamatkan diri sebelum kondisi menjadi kritis.

Secara keseluruhan, kombinasi antara deteksi yang lambat, respons pemadam yang tidak optimal, serta evakuasi yang tidak efisien menyebabkan tingkat risiko kebakaran pada kondisi eksisting berada pada kategori tinggi (high risk).

3.6. Risiko pada Sistem Proteksi Terintegrasi

Setelah implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi, terjadi penurunan risiko yang signifikan pada seluruh parameter. Waktu deteksi kebakaran berkurang menjadi rata-rata 70 detik, yang memungkinkan respons awal dilakukan lebih cepat. Selain itu, waktu aktivasi sprinkler juga mengalami percepatan menjadi rata-rata 148,8 detik, sehingga sistem pemadam mampu bekerja lebih efektif dalam mengendalikan pertumbuhan api.

Penurunan laju pelepasan panas hingga sekitar 50–60% menunjukkan bahwa sistem sprinkler mampu menghambat penyebaran api secara signifikan. Hal ini berdampak pada perubahan karakteristik kebakaran dari fast fire growth menjadi medium growth, yang memberikan waktu lebih panjang bagi penghuni untuk melakukan evakuasi.

Waktu evakuasi menurun menjadi rata-rata 10,02 menit, yang lebih kecil dibandingkan dengan waktu aman evakuasi (ASET = 14 menit). Hal ini menghasilkan rasio keselamatan lebih besar dari 1, yang menunjukkan bahwa kondisi evakuasi berada dalam kategori aman. Dengan demikian, risiko korban jiwa dapat diminimalkan secara signifikan. Implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi mampu menurunkan tingkat risiko kebakaran menjadi kategori sedang hingga rendah (medium–low risk).

3.7. Perbandingan Tingkat Risiko

Tabel 6 memperlihatkan perbandingan risiko yang menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan antara kondisi eksisting dan sistem proteksi kebakaran terintegrasi dalam seluruh parameter keselamatan yang dianalisis. Pada kondisi eksisting, waktu deteksi yang masih tinggi mengindikasikan keterlambatan dalam mengidentifikasi kebakaran pada tahap awal, sehingga meningkatkan risiko awal terjadinya eskalasi kebakaran. Setelah diterapkan sistem terintegrasi, waktu deteksi menjadi lebih rendah, yang berdampak langsung pada penurunan risiko awal karena respons dapat dilakukan lebih cepat.

Kondisi eksisting menunjukkan kinerja sprinkler yang lambat, sehingga api memiliki waktu lebih lama untuk berkembang. Hal ini meningkatkan potensi kerusakan dan risiko terhadap penghuni. Sebaliknya, pada sistem terintegrasi, respons sprinkler menjadi lebih cepat sehingga api dapat segera dikendalikan pada fase awal, yang secara signifikan menurunkan tingkat risiko kebakaran.

Pada parameter laju penyebaran api, kondisi eksisting menunjukkan pertumbuhan api yang sangat cepat (fast fire growth), yang berpotensi menyebabkan terjadinya flashover dalam waktu singkat. Kondisi ini sangat berbahaya karena dapat mempercepat penyebaran panas dan asap ke seluruh ruangan. Dengan sistem terintegrasi, laju api menjadi lebih moderat, sehingga risiko terjadinya flashover dapat ditekan dan waktu aman untuk evakuasi menjadi lebih panjang.

Kondisi eksisting dikategorikan tidak aman karena waktu yang dibutuhkan penghuni untuk keluar lebih lama dibandingkan dengan waktu aman yang tersedia. Hal ini meningkatkan risiko korban jiwa. Sebaliknya, pada sistem terintegrasi, kondisi evakuasi menjadi aman karena sistem alarm dan manajemen evakuasi yang lebih baik mampu mempercepat pergerakan penghuni menuju titik aman.

Parameter paling krusial ditunjukkan oleh nilai safety ratio, di mana pada kondisi eksisting nilai < 1 menandakan kondisi kritis dan berisiko tinggi. Setelah implementasi

sistem terintegrasi, nilai safety ratio meningkat menjadi > 1, yang menunjukkan bahwa kondisi telah berada dalam batas aman. Secara keseluruhan, perbandingan ini menunjukkan bahwa sistem proteksi kebakaran terintegrasi mampu menurunkan risiko kebakaran secara menyeluruh, dari kondisi kritis menjadi kondisi yang aman dan terkendali.

4 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi efektivitas implementasi sistem proteksi kebakaran terintegrasi pada Gedung Kampus Unpas Setiabudi melalui pendekatan kuantitatif berbasis observasi lapangan dan simulasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi antara sistem deteksi, alarm, sprinkler, dan jalur evakuasi memberikan peningkatan kinerja yang signifikan pada seluruh parameter keselamatan yang dikaji.

Secara kuantitatif, waktu deteksi kebakaran menurun dari ±120 detik menjadi ±70 detik (±40%), waktu aktivasi sprinkler menjadi lebih cepat, serta waktu evakuasi berkurang dari ±15 menit menjadi ±10 menit (±33%). Selain itu, laju pelepasan panas berhasil ditekan hingga 50–60%, yang berdampak pada perubahan karakteristik kebakaran dari fast fire growth menjadi medium growth. Peningkatan ini juga tercermin pada rasio keselamatan (ASET/RSET) yang meningkat dari 0,80 (tidak aman) menjadi 1,40 (aman).

Temuan utama penelitian ini menegaskan bahwa integrasi sistem merupakan faktor kunci dalam meningkatkan efektivitas proteksi kebakaran. Sistem yang terintegrasi mampu menghasilkan respons yang lebih cepat, pengendalian api yang lebih efektif, serta kondisi evakuasi yang lebih aman dibandingkan dengan sistem yang bekerja secara parsial. Dengan demikian, pendekatan integratif terbukti lebih unggul dalam menurunkan tingkat risiko kebakaran dari kategori tinggi menjadi sedang–rendah.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan model evaluasi sistem proteksi kebakaran berbasis pendekatan kuantitatif yang mengintegrasikan berbagai parameter keselamatan dalam satu kerangka analisis. Model ini bersifat aplikatif dan dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan maupun peningkatan sistem keselamatan pada bangunan pendidikan dan bangunan bertingkat lainnya.

Implikasi praktis dari penelitian ini adalah perlunya penerapan sistem proteksi kebakaran yang tidak hanya memenuhi standar, tetapi juga terintegrasi secara fungsional. Pengelola gedung disarankan untuk mengoptimalkan integrasi antar sistem serta melakukan pemeliharaan berkala guna memastikan kinerja sistem tetap optimal.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama pada penggunaan model simulasi yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi nyata dan belum mempertimbangkan perilaku manusia secara dinamis. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan simulasi berbasis perangkat lunak lanjutan serta

mengintegrasikan teknologi berbasis sensor cerdas dan Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan akurasi dan respons sistem proteksi kebakaran.

Referensi

1. [1] A. B. Abu and M. Spearpoint, “Fire safety engineering design of buildings: A review of evacuation modelling approaches,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 246–259, 2017.
2. [2] J. Wang, H. Zhang, and Y. Li, “Simulation of evacuation in high-rise buildings under fire conditions,” *Safety Science*, vol. 127, p. 104692, 2020.
3. [3] Y. Zhang, X. Huang, and G. Chen, “Performance-based fire safety design for buildings using integrated fire protection systems,” *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103482, 2022.
4. [4] S. Gwynne and E. Rosenbaum, “Employing the hydraulic model in assessing emergency movement,” *Fire Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 377–398, 2016.
5. [5] M. Hurley et al., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. New York, NY, USA: Springer, 2016.
6. [6] National Fire Protection Association, *NFPA 101: Life Safety Code*, Quincy, MA, USA: NFPA, 2021.
7. [7] National Fire Protection Association, *NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems*, Quincy, MA, USA: NFPA, 2022.
8. [8] J. Liu, R. Luo, and K. Wang, “Effectiveness of automatic sprinkler systems in controlling building fires,” *Fire Safety Journal*, vol. 120, p. 103000, 2021.
9. [9] H. Chen, L. Xu, and Z. Li, “Real-time fire detection system based on integrated sensor networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4702, 2021.
10. [10] A. Ahmad, M. Khan, and S. Alshammari, “Smart fire safety management system using IoT for building applications,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 82, p. 103902, 2023.