



PEMETAAN PENELITIAN SISTEM KESELAMATAN KEBAKARAN BANGUNAN MELALUI TINJAUAN SISTEMATIS DAN ANALISIS BIBLIOMETRIK

FARID RYAN RIDWANSYAH^{1*}, DEWI YUSTIARINI², NAUFAL ARIQ PRATAMA³

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Jawa Barat

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Jawa Barat

³Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Jawa Barat

*Corresponding Author: faridryan09@gmail.com

Naskah diterima: 8 Maret 2026. Disetujui: 14 Juli 2026. Diterbitkan: 31 Juli 2026

ABSTRAK

Sistem proteksi kebakaran pada bangunan merupakan komponen krusial dalam menjamin keselamatan jiwa dan perlindungan aset. Kompleksitas desain bangunan modern, peningkatan kepadatan hunian, serta perkembangan teknologi menuntut pendekatan keselamatan kebakaran yang lebih komprehensif dan berbasis risiko. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren, pendekatan dominan, serta arah pengembangan sistem proteksi kebakaran pada bangunan melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR) yang diperkuat analisis bibliometrik. Proses seleksi literatur dilakukan menggunakan basis data *Scopus* dengan protokol PRISMA terhadap artikel yang diterbitkan pada periode 2016 hingga 2 Maret 2026 dan menghasilkan 24 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Analisis bibliometrik menggunakan *VOSviewer* mengidentifikasi tiga kluster utama yang merepresentasikan pendekatan berbasis risiko, evaluasi kinerja sistem proteksi, serta integrasi manajemen dan teknologi dalam keselamatan kebakaran. Hasil sintesis menunjukkan dominasi pendekatan *risk-based* dan probabilistik, peningkatan perhatian terhadap faktor manusia dan organisasi, serta berkembangnya integrasi sistem cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT). Selain itu, strategi proteksi pasif dan pendekatan berlapis seperti *defense-in-depth* semakin dipertimbangkan dalam kerangka manajemen risiko bangunan. Secara keseluruhan, sistem proteksi kebakaran berkembang menuju pendekatan integratif yang menggabungkan aspek teknis, spasial, dan manajerial dalam satu kerangka sistemik. Temuan ini memberikan gambaran komprehensif mengenai arah penelitian serta peluang pengembangan sistem proteksi kebakaran yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Kata kunci : Sistem Keselamatan Kebakaran, Tren, Bibliometrik, *VOSviewer*

1. PENDAHULUAN

Kebakaran pada bangunan masih menjadi salah satu risiko utama yang mengancam keselamatan jiwa dan menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan di berbagai negara. Laporan global menunjukkan bahwa insiden kebakaran bangunan menyumbang kerugian

miliaran dolar setiap tahunnya serta menimbulkan korban jiwa dalam jumlah besar (World Fire Statistics, 2022). Seiring dengan meningkatnya kompleksitas desain bangunan modern, penggunaan material baru, serta bertambahnya kepadatan penghuni, tantangan dalam pengelolaan keselamatan kebakaran menjadi semakin kompleks (Drysdale, 2011; SFPE, 2016).

Secara tradisional, sistem proteksi kebakaran dirancang berdasarkan pendekatan preskriptif yang mengacu pada standar dan kode bangunan. Namun, pendekatan ini dinilai kurang adaptif terhadap variasi karakteristik bangunan dan dinamika risiko yang berbeda-beda (Buchanan & Abu, 2017). Oleh karena itu, dalam beberapa dekade terakhir berkembang pendekatan berbasis performa dan *risk-based design* yang memungkinkan evaluasi keselamatan kebakaran secara kuantitatif dan kontekstual (NFPA, 2021). Pendekatan ini tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis seperti sistem deteksi, alarm, dan sprinkler, tetapi juga memperhitungkan probabilitas kejadian, konsekuensi risiko, serta respons penghuni (Buchanan & Abu, 2017).

Selain aspek teknis, penelitian mutakhir menunjukkan bahwa faktor manusia dan organisasi memiliki peran signifikan dalam efektivitas sistem proteksi kebakaran. Kesalahan operasional, kurangnya pemeliharaan, serta lemahnya budaya keselamatan dapat menurunkan keandalan sistem secara substansial (Reason, 2016; Hollnagel, 2018). Di sisi lain, perkembangan teknologi digital seperti *Internet of Things* (IoT), sensor cerdas, dan sistem pemantauan *real-time* membuka peluang integrasi sistem proteksi kebakaran yang lebih responsif dan berbasis data (Lee & Lee, 2015).

Beberapa penelitian berbasis *review* telah dilakukan untuk mengkaji berbagai aspek sistem proteksi dan keselamatan kebakaran. Misalnya, Dauda et al. (2025) mengulas praktik keselamatan kebakaran pada bangunan di Inggris, sedangkan Su et al. (2025) meninjau penerapan sistem keselamatan kebakaran pada fasilitas kesejahteraan lansia. Penelitian lain, seperti Dormohamadi et al. (2025), menitikberatkan pada dampak lingkungan dari strategi proteksi kebakaran aktif dan pasif. Meskipun memberikan kontribusi yang penting, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih memiliki ruang lingkup yang spesifik terhadap jenis bangunan, sistem proteksi tertentu, atau konteks wilayah tertentu, serta belum mengintegrasikan pemetaan bibliometrik dengan sintesis *Systematic Literature Review*. Akibatnya, masih sangat terbatas penelitian *review* yang menyajikan pemetaan perkembangan sistem proteksi kebakaran pada bangunan secara komprehensif dalam satu kerangka analisis.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat kebutuhan akan penelitian yang mengintegrasikan analisis bibliometrik dengan *Systematic Literature Review* untuk memperoleh sintesis literatur yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pola, tema dominan, karakteristik publikasi, serta arah perkembangan penelitian mengenai sistem proteksi kebakaran pada bangunan. Penelitian difokuskan pada literatur yang diterbitkan antara tahun 2016 hingga 2026 agar mampu merepresentasikan perkembangan penelitian dalam satu dekade terakhir.

Berbeda dengan penelitian *review* sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada topik atau konteks tertentu, penelitian ini mengintegrasikan analisis bibliometrik dan sintesis *Systematic Literature Review* untuk menghasilkan pemetaan karakteristik publikasi, struktur konseptual penelitian, serta sintesis temuan berdasarkan klaster tematik. Selain mengidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*), hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan penelitian selanjutnya serta mendukung perumusan strategi sistem proteksi kebakaran yang lebih efektif dan terintegrasi.

2. METODE PENELITIAN

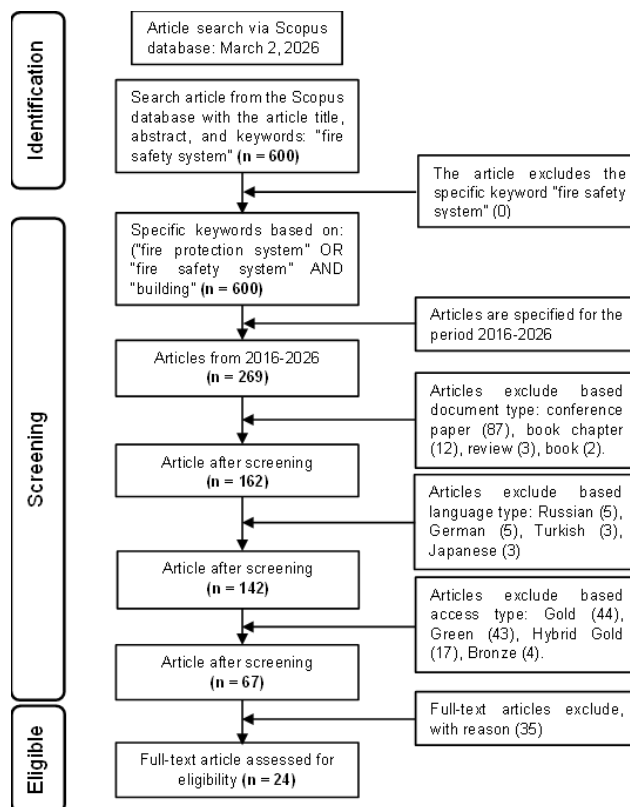
2.1. Strategi Pencarian Literatur dan Seleksi Artikel

Untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang perkembangan dan tren penelitian mengenai sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan, penelitian ini melakukan tinjauan literatur secara sistematis dengan menggunakan basis data *Scopus* sebagai sumber utama. Penelusuran difokuskan pada publikasi ilmiah dari tahun 2016 hingga 2026 untuk menangkap dinamika perkembangan penelitian selama dekade terakhir. *Scopus* dipilih berdasarkan cakupannya yang luas terhadap jurnal internasional yang bereputasi dan proses kurasi ilmiahnya yang ketat.

Strategi pencarian dirancang menggunakan kombinasi operator *Boolean* dengan *string* pencarian: ("fire protection system" OR "fire safety system") AND "building". *Search string* disusun berdasarkan tiga konsep utama penelitian, yaitu *fire protection system*, *fire safety system*, dan *building*. Istilah *building* ditambahkan karena penelitian ini berfokus pada sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan gedung, sedangkan operator *Boolean* OR digunakan untuk mengakomodasi variasi terminologi yang umum digunakan dalam literatur mengenai sistem proteksi dan keselamatan kebakaran. Untuk meningkatkan ketelitian hasil pencarian, frasa utama diapit tanda kutip ("...") sebagaimana direkomendasikan oleh Setyaningsih et al. (2018), sehingga setiap frasa diperlakukan sebagai satu kesatuan istilah dalam proses pencarian. Pencarian kemudian diterapkan pada *field* Article Title, Abstract, and Keywords (TITLE-ABS-KEY) karena mampu meningkatkan sensitivitas pencarian dibandingkan hanya menggunakan judul, namun tetap lebih spesifik dibandingkan pencarian pada seluruh *field* *Scopus*.

Uji sensitivitas dilakukan dengan membandingkan beberapa variasi *search string* pada *field* TITLE-ABS-KEY. Kombinasi "fire protection system" AND "building" menghasilkan 215 dokumen, sedangkan "fire safety system" AND "building" menghasilkan 54 dokumen pada rentang publikasi 2016-2026. Oleh karena itu, kombinasi ("fire protection system" OR "fire safety system") AND "building" dipilih sebagai strategi pencarian utama karena menghasilkan cakupan literatur yang lebih komprehensif. Pencarian awal menggunakan *search string* tersebut menghasilkan 600 dokumen sebelum dilakukan penyaringan. Selanjutnya diterapkan filter tahun publikasi (2016-2026), menyisakan 269 dokumen; membatasi jenis dokumen menjadi artikel, menyisakan 162 dokumen; membatasi bahasa menjadi bahasa Inggris, menyisakan 142 dokumen; dan membatasi kategori menjadi semua akses terbuka, menghasilkan 67 dokumen yang siap untuk tahap seleksi selanjutnya.

Sebagai landasan metodologis, penelitian ini mengikuti pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) sebagaimana dijelaskan oleh Jesson et al. (2011). Proses ini terdiri atas empat tahapan utama, yaitu *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *included*. Pada tahap *identification*, seluruh 67 artikel yang telah memenuhi kriteria awal dikompilasi sesuai protokol pencarian. Tahap *screening* dilakukan dengan membaca judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian topik dengan fokus penelitian, yaitu sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan. Dari tahap ini diperoleh 32 artikel yang dinilai relevan untuk ditinjau lebih lanjut.



Gambar 1. Diagram Alur Prisma

Tahap berikutnya adalah *eligibility*, yaitu penilaian kelayakan melalui pembacaan teks lengkap (*full-text screening*). Pada tahap ini, artikel dievaluasi secara mendalam berdasarkan kriteria inklusi, antara lain: membahas sistem proteksi atau keselamatan kebakaran pada bangunan, memiliki kontribusi analitis atau teknis, serta tidak berfokus pada kebakaran hutan, industri khusus, kendaraan, atau konteks non-bangunan lainnya. Setelah proses seleksi berjenjang tersebut, diperoleh 24 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan diikutsertakan pada tahap ekstraksi data (*included*).

2.2. Ekstraksi Data, Analisis Bibliometrik, dan Keterbatasan Penelitian

Artikel-artikel yang terpilih kemudian diekstraksi berdasarkan informasi penting seperti fokus kajian, pendekatan metodologis, jenis bangunan yang dianalisis, serta kontribusi temuan terhadap pengembangan sistem proteksi kebakaran bangunan. Analisis dilakukan melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) sebagai metode utama untuk mensintesis temuan dan mengidentifikasi pola konseptual penelitian.

Sebagai pelengkap analisis kualitatif, metadata dari 24 artikel yang telah lolos seleksi diekspor dalam format RIS (*Research Information Systems*) pada tanggal 2 Maret 2026. Pencarian *Scopus*, ekspor data, dan pembaruan pencarian terakhir dilakukan pada tanggal yang sama sehingga data yang dianalisis merepresentasikan seluruh artikel yang memenuhi kriteria hingga tanggal tersebut. Selanjutnya, data dimodelkan menggunakan perangkat lunak *VOSviewer*. Analisis difokuskan pada pemetaan *co-occurrence* kata kunci dengan ambang minimum kemunculan dua kali untuk mengidentifikasi kluster tematik serta hubungan antar topik penelitian. Dengan demikian, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan SLR yang dominan dengan analisis bibliometrik sebagai pendukung visualisasi dan pemetaan tren penelitian.

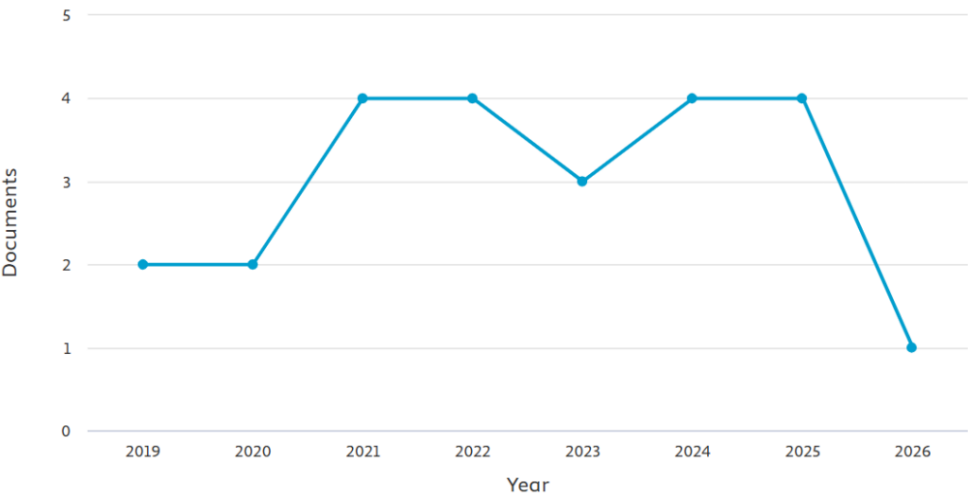
Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil. Pertama, pencarian literatur hanya menggunakan database Scopus sehingga publikasi yang terindeks pada basis data lain tidak tercakup dalam analisis. Kedua, artikel yang dianalisis dibatasi pada publikasi berbahasa Inggris dan berstatus Open Access. Ketiga, strategi pencarian dibatasi pada search string ("fire protection system" OR "fire safety system") AND "building" yang diterapkan pada field TITLE-ABS-KEY, sehingga artikel yang menggunakan terminologi berbeda berpotensi tidak teridentifikasi. Keempat, penelitian hanya mencakup publikasi pada rentang tahun 2016 hingga 2 Maret 2026 dan menghasilkan 24 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Terakhir, analisis bibliometrik dilakukan berdasarkan metadata artikel yang diekspor dari Scopus menggunakan VOSviewer, sehingga hasil pemetaan merepresentasikan hubungan berdasarkan metadata, bukan keseluruhan isi artikel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

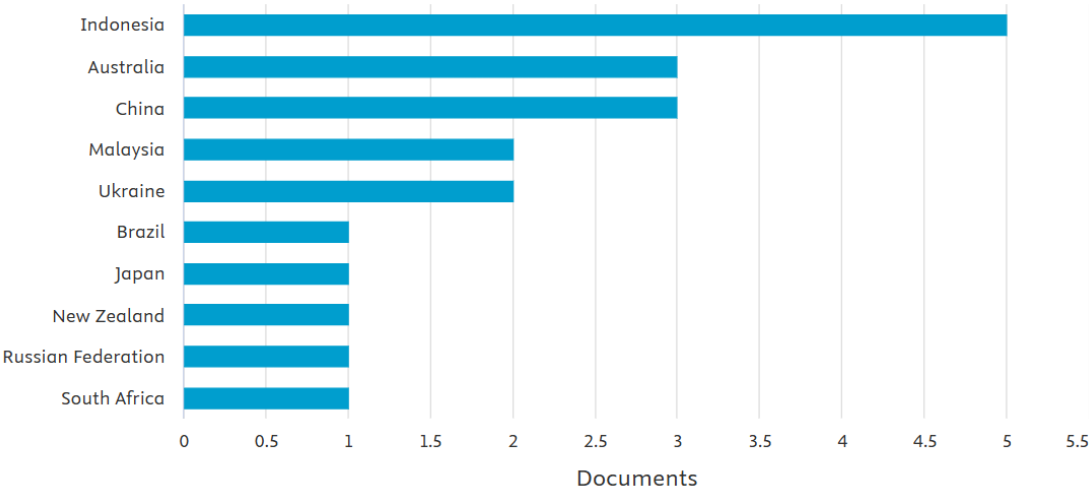
Bagian ini menyajikan hasil sintesis literatur berdasarkan 24 artikel terpilih yang dianalisis melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dan pemetaan bibliometrik. Pembahasan diawali dengan analisis bibliometrik yang mengidentifikasi karakteristik publikasi dari 24 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Karakteristik tersebut meliputi perkembangan jumlah publikasi per tahun, distribusi negara asal publikasi, afiliasi publikasi, serta pemetaan hubungan antarkata kunci menggunakan VOSviewer. Selanjutnya, hasil dianalisis secara tematik meliputi dominasi pendekatan risk-based dan probabilistik, evaluasi kinerja serta keandalan sistem proteksi kebakaran, peran faktor manusia dan organisasi, sistem evakuasi dan keselamatan jiwa, hingga strategi proteksi pasif dan pendekatan integratif dalam manajemen kebakaran bangunan. Uraian difokuskan pada temuan utama, hubungan antar konsep, serta implikasi teknis dan manajerial tanpa mengulang isi tabel atau gambar, sehingga menghasilkan interpretasi kritis terhadap perkembangan dan arah penelitian sistem proteksi kebakaran pada bangunan.

3.1. Analisis Bibliometrik dan Pemetaan Tren Penelitian

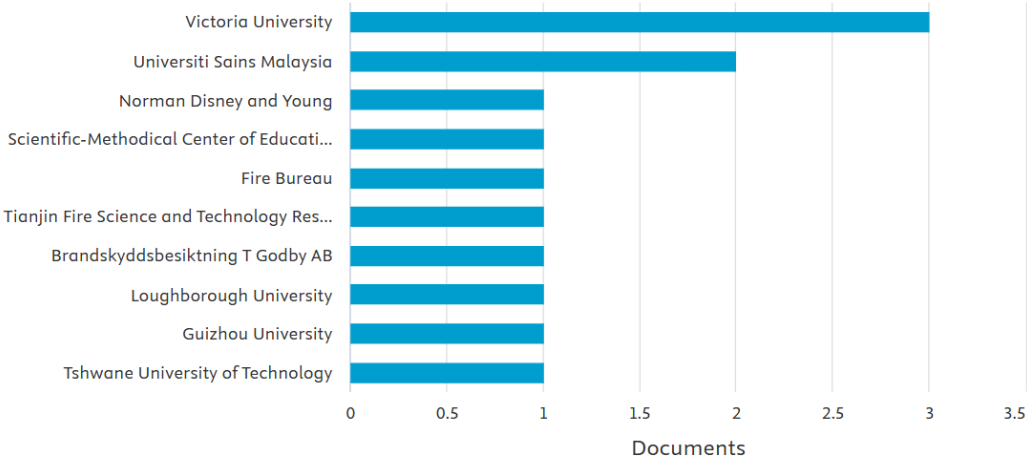
Berdasarkan 24 artikel yang terpilih, jumlah publikasi mengenai sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan menunjukkan tren yang cenderung meningkat selama periode 2019-2025 (**Gambar 2**). Meskipun pencarian literatur dilakukan pada rentang tahun 2016-2026, artikel yang diterbitkan pada periode 2016-2018 tidak memenuhi kriteria inklusi sehingga tidak termasuk dalam analisis. Publikasi terbanyak ditemukan pada tahun 2021, 2022, 2024, dan 2025 dengan masing-masing empat artikel, sedangkan pada tahun 2026 hanya diperoleh satu artikel karena proses pengindeksan publikasi pada tahun tersebut masih berlangsung pada saat data dikumpulkan. Berdasarkan distribusi negara asal publikasi, Indonesia menjadi kontributor terbanyak dengan lima artikel (**Gambar 3**). Sejalan dengan itu, analisis afiliasi menunjukkan bahwa *Victoria University* merupakan institusi dengan jumlah publikasi terbanyak sebanyak tiga artikel, diikuti *Universiti Sains Malaysia* dengan dua artikel, sedangkan afiliasi lainnya masing-masing berkontribusi satu artikel (**Gambar 4**). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan terus berkembang dalam beberapa tahun terakhir dengan kontribusi publikasi yang berasal dari berbagai negara.



Gambar 2. Perkembangan Jumlah Publikasi per Tahun

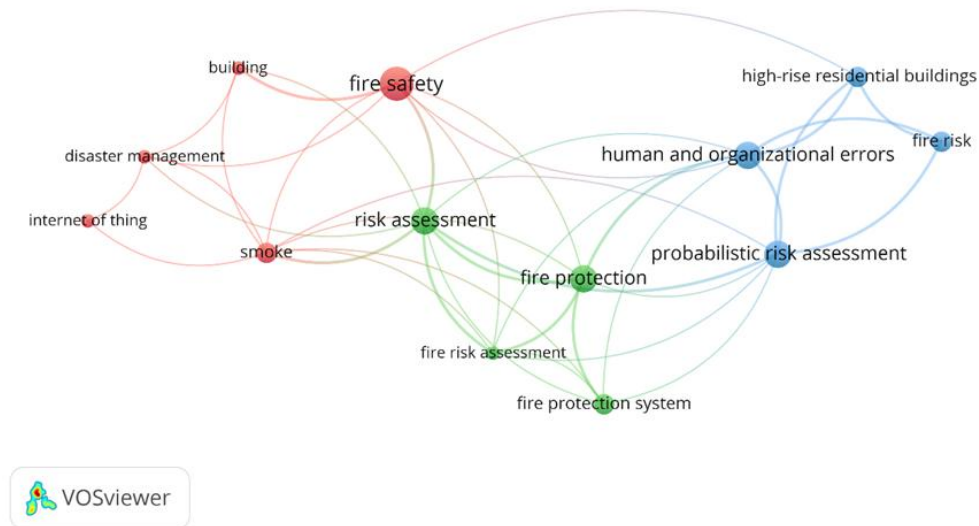


Gambar 3. Negara dengan Jumlah Publikasi Terbanyak



Gambar 4. Afiliasi dengan Jumlah Publikasi Terbanyak

Selain memberikan gambaran mengenai karakteristik publikasi, analisis bibliometrik juga digunakan untuk mengidentifikasi hubungan konseptual antar topik penelitian. Oleh karena itu, dilakukan pemetaan *co-occurrence* kata kunci menggunakan perangkat lunak VOSviewer untuk memvisualisasikan keterkaitan antarkata kunci serta mengidentifikasi klaster penelitian yang berkembang dalam bidang sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan. Hasil visualisasi jaringan ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Network Visualization penelitian Sistem Keselamatan Kebakaran pada Bangunan

Hasil visualisasi *network co-occurrence* kata kunci menggunakan VOSviewer terhadap 24 artikel terpilih menunjukkan bahwa penelitian mengenai sistem proteksi dan keselamatan kebakaran pada bangunan membentuk tiga klaster utama berdasarkan hubungan kemunculan kata kunci (**Gambar 5**). Berdasarkan ambang batas kemunculan kata kunci yang ditetapkan, terbentuk tiga klaster utama yang merepresentasikan struktur konseptual literatur periode 2016 hingga 2 Maret 2026. Ketiga klaster tersebut menunjukkan adanya dominasi pendekatan berbasis risiko, dengan variasi fokus pada manajemen bencana, sistem proteksi, dan model probabilistik pada bangunan bertingkat tinggi.

Cluster 1: Manajemen Bencana dan Integrasi Teknologi pada Bangunan

Klaster pertama terdiri atas kata kunci *building*, *disaster management*, *fire safety*, *internet of thing*, dan *smoke*. Kombinasi ini menunjukkan bahwa literatur dalam klaster ini menempatkan sistem proteksi kebakaran sebagai bagian dari kerangka manajemen bencana pada bangunan secara menyeluruh. Kehadiran kata *building* dan *disaster management* mengindikasikan pendekatan makro yang melihat kebakaran sebagai bagian dari risiko bangunan dalam konteks manajemen darurat.

Kemunculan *internet of thing* mencerminkan pergeseran menuju integrasi teknologi cerdas dalam sistem keselamatan kebakaran, terutama dalam pemantauan kondisi bangunan secara *real-time* dan respon otomatis terhadap potensi bahaya. Sementara itu, kata *smoke* menegaskan bahwa pengendalian asap tetap menjadi komponen teknis penting dalam desain keselamatan kebakaran. Secara konseptual, klaster ini merepresentasikan pendekatan sistemik yang menggabungkan manajemen risiko, teknologi digital, dan aspek teknis keselamatan kebakaran pada bangunan.

Cluster 2: Sistem Proteksi Kebakaran dan Evaluasi Risiko

Klaster kedua mencakup kata kunci *fire protection*, *fire protection system*, *fire risk assessment*, dan *risk assessment*. Struktur ini menunjukkan fokus literatur pada evaluasi kinerja sistem proteksi kebakaran melalui pendekatan berbasis risiko. Hubungan yang kuat antara *fire protection system* dan *risk assessment* menandakan bahwa sistem proteksi tidak lagi dinilai hanya berdasarkan spesifikasi teknis, tetapi melalui kuantifikasi risiko yang terukur.

Dominasi istilah *risk assessment* dalam klaster ini menunjukkan bahwa analisis risiko menjadi alat utama dalam mengevaluasi efektivitas sistem aktif seperti detektor, sprinkler, maupun sistem pengendalian asap. Klaster ini merepresentasikan pendekatan teknis-kuantitatif yang menekankan pada reliabilitas dan performa sistem proteksi kebakaran dalam berbagai tipe bangunan.

Cluster 3: Model Probabilistik dan Risiko pada Bangunan Bertingkat Tinggi

Klaster ketiga terdiri atas kata kunci *fire risk*, *high-rise residential building*, *human and organizational*, dan *probabilistic risk assessment*. Klaster ini menunjukkan bahwa penelitian risiko kebakaran pada bangunan bertingkat tinggi semakin mengarah pada penggunaan pendekatan probabilistik. Kehadiran *probabilistic risk assessment* menandakan pergeseran dari metode deterministik menuju model kuantitatif berbasis probabilitas dalam menghitung kemungkinan kejadian dan konsekuensi kebakaran.

Konteks *high-rise residential building* menegaskan bahwa bangunan bertingkat tinggi menjadi fokus dominan dalam literatur, mengingat kompleksitas evakuasi, kepadatan penghuni, serta tantangan operasional dalam pemadaman. Sementara itu, kemunculan istilah *human and organizational* menunjukkan bahwa risiko kebakaran juga dipengaruhi oleh faktor manusia dan manajemen organisasi, sehingga model probabilistik semakin mempertimbangkan variabel sosio-teknis dalam analisisnya.

Untuk memahami lebih mendalam karakteristik penelitian dalam masing-masing klaster, dilakukan analisis tematik terhadap 24 artikel terpilih (Tabel 1) melalui pendekatan *systematic literature review*.

Tabel 1. Ringkasan Sintesis Analitis Artikel Terpilih

Penulis (Tahun)	Fokus Penelitian	Jenis Bangunan	Metode	Kontribusi Utama
Balboa et al. (2020)	Intelligent evacuation guiding system	Complex building	Eksperimen & simulasi real-time	Smart egress system meningkatkan waktu evakuasi
Sabapathy et al. (2019)	Probabilistic Risk Assessment (QPRA)	Commercial building	CFD + Evacuation model + Event tree	Perhitungan Expected Risk to Life (ERL)
Tan et al. (2021)	Human & Organizational Risk (T-H-O-Risk)	High-rise residential	PRA + Sensitivity analysis	HOE meningkatkan risiko hingga 80%
Tan et al. (2020)	Technical, Human, Organizational Risk	High-rise residential	Bayesian Network + SD	HOE memengaruhi reliabilitas sistem aktif

Wang et al. (2021)	Fire Risk Assessment (FAHP)	High-rise & commercial	Fuzzy AHP	Sistem evaluasi berbasis indikator
Gerges et al. (2021)	Customized evacuation instruction	High-rise residential	Agent-based simulation	Instruksi personal mempercepat evakuasi 50%
Rosanti et al. (2021)	Active fire protection mapping	Dormitory	Observasi semi-kuantitatif	Kepatuhan <60% (kategori buruk)
Sadkovyi et al. (2022)	Reliability of fire detection	Indoor premises	Metode statistik	Model reliabilitas deteksi kebakaran
Maharani et al. (2022)	Life-saving & fire facilities	Police station	Evaluasi kualitatif	Banyak elemen belum sesuai regulasi
Suliman & Zulkarnain (2022)	Means of Escape (MoE)	Student housing	Observasi & regulasi review	MoE penting untuk keselamatan
Nishino et al. (2023)	Post-earthquake fire risk	Hospital	Zero-inflated Poisson regression	Model kerusakan sistem proteksi
Dzahabiyah et al. (2022)	Fire protection evaluation	Hospital	Observasi wawancara &	Sistem aktif & pasif belum sesuai standar
Park et al. (2023)	Smart Fire Safety Management	Smart building	IoT + AI + Platform	Integrasi energi & fire safety
Zhao et al. (2023)	IoT-based pre-response system	High-rise building	IoT + real-time control	Sistem pre-response dinamis
Zhang et al. (2024)	Regional HRB fire risk	High-rise building	Spatial Markov + indikator	Evaluasi risiko berbasis wilayah
Franco & Gaydeczka (2024)	Fire system management	University buildings	Survey nasional	Banyak institusi tanpa management plan
Salleh & Mohd Zaini (2024)	Active fire system appraisal	Low-cost high-rise	Audit & observasi	75% sistem tidak berfungsi baik
Rahman et al. (2024)	Passive fire protection (site design)	Traditional settlement	AHP	Building distance paling berpengaruh
Busakhin (2025)	Smoke pressurization modeling	High-rise building	Computational analysis	Optimasi sistem smoke control
Su et al. (2025)	Defense-in-depth fire safety strategy	Elderly welfare institution	Inspeksi sensus (64 institusi), checklist terstruktur, analisis statistik	Model 3-layer (prevention–detection–containment)

Makuse et al. (2025)	Fire protection system assessment & safety culture	Hospital	Mixed methods (kuesioner, observasi, wawancara)	Pemeliharaan sistem rendah menurunkan reliabilitas proteksi
Arvidson et al. (2025)	Sprinkler & water mist system performance	Heritage church building	Studi kasus multi-situs, inspeksi teknis, wawancara	Risiko aktivasi tidak disengaja & kegagalan akibat pembekuan
Pau et al. (2019)	Performance-based fire engineering design	Heritage buildin	C/VM2, smoke modelling, egress analysis	Upgrade keselamatan tanpa merusak nilai heritage
Vovk et al. (2025)	Fire alarm system performance under wind scenarios	High-rise building	Simulasi numerik FDS (Fire Dynamics Simulator)	Deteksi hanya optimal dekat sumber api saat kecepatan angin 7 m/s

3.2 Dominasi Pendekatan Risk-Based dan Probabilistik dalam Sistem Proteksi Kebakaran

Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan berbasis risiko (risk-based approach) menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem proteksi kebakaran pada bangunan. Dominasi kata kunci risk assessment dan probabilistic risk assessment pada analisis bibliometrik memperkuat temuan bahwa literatur dalam satu dekade terakhir semakin mengarah pada kuantifikasi risiko secara matematis dan statistik.

Pendekatan Quantitative Probabilistic Risk Assessment (QPRA) digunakan untuk menghitung Expected Risk to Life (ERL) dan mengevaluasi skenario kebakaran berbasis model CFD dan event tree analysis (Sabapathy et al., 2019). Selain itu, pendekatan Fuzzy AHP dalam evaluasi risiko kebakaran pada bangunan komersial dan bertingkat tinggi menunjukkan upaya sistematis dalam pembobotan indikator risiko (Wang et al., 2021). Model Spatial Markov juga digunakan untuk menganalisis risiko kebakaran berbasis wilayah pada bangunan bertingkat tinggi (Zhang et al., 2024).

Pada konteks pascagempa, model regresi zero-inflated Poisson digunakan untuk mengestimasi probabilitas kerusakan sistem proteksi kebakaran (Nishino et al., 2023). Pendekatan Technical–Human–Organizational Risk (T-H-O Risk) bahkan menunjukkan bahwa kesalahan manusia dan organisasi dapat meningkatkan tingkat risiko hingga 80% (Tan et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa model probabilistik tidak lagi hanya mempertimbangkan variabel teknis, tetapi juga memasukkan faktor non-teknis dalam perhitungan risiko. Secara umum, literatur menunjukkan pergeseran dari pendekatan deterministik menuju model probabilistik berbasis risiko, khususnya pada bangunan

3.3 Evaluasi Kinerja dan Keandalan Sistem Proteksi Kebakaran

Selain pendekatan berbasis risiko, sejumlah penelitian berfokus pada evaluasi langsung terhadap kinerja dan keandalan sistem proteksi kebakaran, baik sistem aktif maupun pasif. Evaluasi ini mencakup audit kepatuhan terhadap standar, analisis performa sistem, serta studi keandalan komponen proteksi kebakaran.

Audit sistem aktif pada bangunan hunian bertingkat rendah menunjukkan bahwa sekitar 75% sistem tidak berfungsi optimal akibat kurangnya pemeliharaan (Salleh & Moh Zaini, 2024). Temuan serupa juga ditemukan pada bangunan rumah sakit, di mana sistem proteksi aktif dan pasif belum sepenuhnya memenuhi standar keselamatan (Dzahabiyah et al., 2022; Makuse et al., 2025). Evaluasi fasilitas keselamatan jiwa pada bangunan publik juga menunjukkan banyak elemen yang belum sesuai regulasi (Maharani et al., 2022).

Dari sisi performa teknis, analisis sistem sprinkler dan water mist pada bangunan heritage menunjukkan potensi kegagalan akibat pembekuan dan aktivasi tidak disengaja (Arvidson et al., 2025). Studi simulasi numerik menggunakan Fire Dynamics Simulator (FDS) menunjukkan bahwa kecepatan angin dan posisi bukaan memengaruhi waktu aktivasi detektor pada bangunan bertingkat tinggi (Vovk et al., 2025). Analisis komputasional terhadap sistem smoke pressurization juga menunjukkan pentingnya optimasi sistem kontrol asap dalam menjaga kondisi evakuasi yang aman (Busakhin, 2025).

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa tantangan utama dalam sistem proteksi kebakaran bukan semata pada desain teknologi, tetapi pada implementasi, pemeliharaan, dan pengawasan operasional.

3.4 Faktor Manusia dan Organisasi dalam Keselamatan Kebakaran

Hasil sintesis menunjukkan bahwa faktor manusia dan organisasi memainkan peran krusial dalam efektivitas sistem proteksi kebakaran. Model T-H-O Risk menunjukkan bahwa human and organizational errors (HOE) secara signifikan memengaruhi reliabilitas sistem aktif (Tan et al., 2020; Tan et al., 2021). Kesalahan operasional, kurangnya pelatihan, serta lemahnya budaya keselamatan dapat meningkatkan tingkat risiko secara signifikan.

Pada bangunan institusional, rendahnya manajemen pemeliharaan sistem proteksi berkontribusi pada penurunan reliabilitas proteksi kebakaran (Makuse et al., 2025). Studi pada bangunan universitas menunjukkan bahwa banyak institusi tidak memiliki rencana manajemen sistem proteksi kebakaran yang terstruktur (Franco & Gaydeczka, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa aspek organisasi sering kali menjadi titik lemah dalam sistem keselamatan kebakaran.

Dengan demikian, literatur mengindikasikan bahwa sistem proteksi kebakaran merupakan sistem sosio-teknis yang memerlukan integrasi antara teknologi, prosedur, dan perilaku manusia. Tanpa dukungan manajemen dan budaya keselamatan yang memadai, keandalan sistem teknis menjadi tidak optimal.

3.5 Sistem Evakuasi dan Keselamatan Jiwa

Keselamatan jiwa merupakan indikator utama keberhasilan sistem proteksi kebakaran. Sejumlah penelitian mengembangkan model evakuasi berbasis simulasi untuk mengoptimalkan proses penyelamatan penghuni bangunan.

Sistem intelligent evacuation guiding berbasis real-time terbukti mampu meningkatkan efisiensi evakuasi pada bangunan kompleks (Balboa et al., 2020). Pendekatan agent-based simulation juga menunjukkan bahwa instruksi evakuasi yang dipersonalisasi dapat mempercepat waktu evakuasi hingga 50% pada bangunan bertingkat tinggi (Gerges et al., 2021). Evaluasi Means of Escape (MoE) pada hunian mahasiswa menegaskan pentingnya desain jalur evakuasi yang sesuai standar (Sulieman & Zulkarnaen, 2022).

Dalam pendekatan berbasis performa, desain rekayasa kebakaran memungkinkan peningkatan keselamatan tanpa mengorbankan nilai arsitektural bangunan heritage (Pau et

al., 2019). Secara umum, literatur menunjukkan bahwa sistem evakuasi yang efektif tidak hanya bergantung pada sistem alarm dan deteksi, tetapi juga pada desain jalur evakuasi dan respons perilaku penghuni

3.6 Strategi Proteksi Pasif dan Pendekatan Integratif dalam Manajemen Kebakaran Bangunan

Selain pendekatan berbasis risiko dan evaluasi performa sistem aktif, literatur juga menunjukkan pentingnya strategi proteksi pasif dan pendekatan integratif dalam manajemen keselamatan kebakaran bangunan. Hasil pemetaan bibliometrik pada Cluster 1 yang menampilkan kata kunci building, disaster management, dan smoke mengindikasikan bahwa sistem proteksi kebakaran semakin dipahami dalam kerangka manajemen bencana yang komprehensif, tidak terbatas pada perangkat teknis semata.

Pendekatan proteksi pasif berbasis desain tata ruang menjadi salah satu strategi yang relevan, khususnya pada konteks permukiman tradisional. Rahman et al. (2024) menunjukkan bahwa jarak antar bangunan merupakan faktor paling berpengaruh dalam mengurangi potensi penyebaran api, berdasarkan analisis Analytical Hierarchy Process (AHP). Temuan ini menegaskan bahwa konfigurasi spasial dan perencanaan site memiliki peran krusial dalam mitigasi risiko kebakaran, terutama pada kawasan dengan kepadatan bangunan tinggi dan material mudah terbakar. Dengan demikian, proteksi kebakaran tidak hanya bergantung pada sistem aktif seperti detektor atau sprinkler, tetapi juga pada strategi desain yang bersifat preventif.

Pendekatan integratif juga terlihat dalam konsep defense-in-depth yang menekankan perlindungan berlapis. Su et al. (2025) merumuskan model tiga lapis yang terdiri dari pencegahan (prevention), deteksi dini (detection), dan pembatasan penyebaran (containment) berdasarkan inspeksi terhadap 64 institusi kesejahteraan lansia. Model ini menunjukkan bahwa efektivitas sistem proteksi kebakaran sangat bergantung pada sinergi antara strategi preventif, sistem deteksi yang andal, serta mekanisme pengendalian penyebaran api. Pendekatan berlapis ini menjadi sangat penting pada bangunan dengan penghuni rentan, di mana kecepatan respons dan pembatasan penyebaran api menentukan tingkat keselamatan.

Di sisi lain, integrasi teknologi digital dalam manajemen kebakaran turut memperkuat pendekatan sistemik. Sistem Smart Fire Safety Management yang terintegrasi dengan manajemen energi memungkinkan pemantauan dan pengambilan keputusan berbasis data secara real-time (Park et al., 2023). Sementara itu, sistem IoT-based pre-response memungkinkan respons dini sebelum api berkembang lebih lanjut (Zhao et al., 2023). Integrasi ini menunjukkan pergeseran paradigma dari sistem proteksi yang bersifat reaktif menuju sistem manajemen risiko yang proaktif dan terintegrasi.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa strategi keselamatan kebakaran yang efektif tidak hanya mengandalkan satu pendekatan, melainkan memerlukan kombinasi antara proteksi pasif berbasis desain, sistem aktif yang andal, manajemen organisasi yang baik, serta integrasi teknologi cerdas. Pendekatan integratif ini menegaskan bahwa keselamatan kebakaran merupakan sistem multi-layer yang mencakup aspek teknis, spasial, dan manajerial dalam satu kerangka manajemen risiko bangunan.

3.7 Kesenjangan Penelitian dan Agenda Riset Mendatang

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penelitian sistem proteksi kebakaran pada bangunan didominasi oleh pendekatan berbasis risiko dan pemodelan probabilistik (Sabapathy et al.,

2019; Wang et al., 2021; Tan et al., 2021). Namun, sebagian besar studi masih berfokus pada pengembangan model matematis tanpa integrasi langsung ke dalam implementasi desain dan manajemen bangunan. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara pengembangan model risiko dan penerapan praktis di lapangan.

Selain itu, meskipun faktor manusia dan organisasi terbukti berpengaruh signifikan terhadap reliabilitas sistem (Tan et al., 2020; Tan et al., 2021), integrasinya dalam sistem berbasis IoT dan smart fire safety masih terbatas (Park et al., 2023; Zhao et al., 2023). Konsep pendekatan berlapis seperti defense-in-depth (Su et al., 2025) serta strategi proteksi pasif berbasis desain (Rahman et al., 2024) menunjukkan arah integratif, tetapi pengujian empiris terhadap kombinasi proteksi pasif, sistem aktif, dan manajemen organisasi secara simultan masih jarang dilakukan.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada pengembangan kerangka integratif yang menggabungkan analisis risiko probabilistik, faktor manusia, strategi proteksi pasif, serta sistem cerdas dalam satu model evaluasi yang komprehensif. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan sistem proteksi kebakaran yang tidak hanya optimal secara teknis, tetapi juga adaptif terhadap konteks bangunan dan dinamika operasionalnya.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis tren dan perkembangan sistem proteksi kebakaran pada bangunan melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang diperkuat analisis bibliometrik terhadap 24 artikel terpilih. Hasil pemetaan menunjukkan tiga kluster utama yang merepresentasikan pendekatan berbasis risiko, evaluasi kinerja sistem proteksi, serta integrasi manajemen dan teknologi dalam keselamatan kebakaran. Sintesis tematik mengindikasikan bahwa penelitian didominasi oleh pendekatan risk-based dan probabilistik, khususnya dalam evaluasi tingkat risiko dan keandalan sistem proteksi kebakaran. Selain aspek teknis, faktor manusia dan organisasi terbukti berpengaruh signifikan terhadap efektivitas sistem keselamatan. Perkembangan terbaru juga menunjukkan integrasi sistem cerdas berbasis IoT serta penerapan strategi berlapis seperti defense-in-depth dan proteksi pasif berbasis desain tata ruang. Secara keseluruhan, sistem proteksi kebakaran pada bangunan berkembang menuju pendekatan yang lebih integratif, menggabungkan analisis risiko, teknologi cerdas, strategi desain, serta manajemen organisasi dalam satu kerangka sistemik. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan holistik untuk meningkatkan keselamatan kebakaran yang adaptif dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arvidson, M., Egeltoft, E., & Godby, T. (2025). Operating Experiences from Fire Sprinkler and Water Mist Installations in Swedish Churches. *Fire Technology*, 61(5), 3719-3741. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01752-8>
- Balboa, A., González-Villa, J., Cuesta, A., Abreu, O., & Alvear, D. (2020). Testing a real-time intelligent evacuation guiding system for complex buildings. *Safety Science*, 132, 104970. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104970>
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2017). *Structural design for fire safety* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118700402>
- Busakhin, A. (2025). IMPLICATIONS FOR SUSTAINABLE BUILDING DESIGN: A COMPUTATIONAL ANALYSIS OF AIRFLOW INTERACTIONS IN FIRE SAFETY SYSTEMS. *International Journal of Ecosystems & Ecology Sciences*, 15(5). <https://doi.org/10.31407/ijees15.529>

- Dauda, J. A., Yamusa, M. A., Oyegoke, A. S., Ajayi, S. O., & Saka, A. B. (2025). A Systematic Review of Building Fire Safety Practices in the UK: Approaches, Challenges and Recommendations. *Fire Technology*, 61(7), 5589-5612. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01801-2>
- Drysdale, D. (2011). An introduction to fire dynamics (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119975465>
- Dormohamadi, M., Kanafani, K., Birgisdottir, H., Dragsted, A., & Hoxha, E. (2025). Assessing the Environmental Impacts of Passive and Active Fire Protection Strategies. *Results in Engineering*, 108530. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108530>
- Dzahabiyah, D., & Haqi, D. N. (2022). Fire Protection System Evaluation in the Oncology Center Building of Hospital in Surabaya. *Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 11(3), 412-422. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v11i3.2022.412-422>
- Franco, B. L., & Gaydeczka, B. (2024). Challenges and perspectives in the implementation of the Fire Protection System in Federal institutions of higher education in Brazil. *REM-International Engineering Journal*, 77(2), e230110. <https://doi.org/10.1590/0370-44672023770110>
- Gerges, M., Demian, P., & Adamu, Z. (2021). Customising evacuation instructions for high-rise residential occupants to expedite fire egress: Results from agent-based simulation. *Fire*, 4(2), 21. <https://doi.org/10.3390/fire4020021>
- Hollnagel, E. (2018). Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management. Ashgate Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781315607511>
- Jesson, J., Matheson, L., & M Lacey, F. (2011). Doing Your Literature Review: Traditional and Systematic Techniques. SAGE, 103-127. <https://doi.org/10.7748/nr.19.4.45.s7>
- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- Maharani, V. N., Novrikasari, D. A., Camelia, A., & Fujianti, P. (2022). Analysis of Life-Saving Facilities System and Fire Management Facilities at Ogan Ilir Police Station in 2020. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 11(3), 463-472. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v11i3.2022.463-472>
- Makuse, M. M. D., Mokaleng, B. B., & Monnye, M. N. F. (2025). Investigating the state of fire protection systems at Chris Hani Baragwanath Academic Hospital (2022-2023). *Architecture, Structures and Construction*, 5(1), 35. <https://doi.org/10.1007/s44150-025-00153-3>
- National Fire Protection Association (NFPA). (2021). NFPA 101: Life Safety Code. NFPA.
- Nishino, T., Suzuki, J. I., Nagao, N., & Notake, H. (2023). Investigation of damage to fire protection systems in buildings due to the 2016 Kumamoto earthquake: derivation of damage models for post-earthquake fire risk assessments. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(4), 2123-2142. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2099401>
- Park, S., Lee, S., Jang, H., Yoon, G., Choi, M. I., Kang, B., ... & Park, S. (2023). Smart fire safety management system (SFSMS) connected with energy management for sustainable service in smart building infrastructures. *Buildings*, 13(12), 3018. <https://doi.org/10.3390/buildings13123018>
- Pau, D., Duncan, C., & Fleischmann, C. (2019). Performance-based fire engineering design of a heritage building: McDougall house case study. *Safety*, 5(3), 45. <https://doi.org/10.3390/safety5030045>
- Rahman, N. V., Ginting, N., Marisa, A. & Tarigan, J. (2024). The Assessment of Site Design as a Passive Fire Protection System in Traditional Batak Toba Settlements, Kampung Ulos Hutaraja-Pardamean. *Civil Engineering and Architecture*, 12(2), 1235-1259. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120240>
- Reason, J. (2016). Managing the risks of organizational accidents. Ashgate Publishing. <https://doi.org/10.4324/9781315543543>
- Rosanti, E., Irawan, S. U., Diannita, R., & Taufik, M. R. (2021). Mapping Analysis of Active Fire Protection System on Dormitory Building in X University Analisis Model Pemetaan Sistem Proteksi Kebakaran Aktif Di Gedung Asrama Universitas X. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v10i2.2021.240-246>
- Sabapathy, P., Depetro, A., & Moinuddin, K. (2019). Probabilistic risk assessment of life safety for a six-storey commercial building with an open stair interconnecting four storeys: A case study. *Fire technology*, 55(4), 1405-1445. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00859-z>

- Sadkovyi, V., Pospelov, B., Rybka, E., Kreminskyi, B., Yashchenko, O., Bezuhla, Y., ... & Kozynska, I. (2022). Development of a method for assessing the reliability of fire detection in premises. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259493>
- Salleh, N. M., & Zaini, N. B. N. M. (2024). The Appraisal of Fire Active System for Low-Cost High Rise Residential Building in Penang, Malaysia. *Journal of Advanced Research Design*, 117(1), 44-56. <https://doi.org/10.37934/ard.117.1.4456>
- Setyaningsih, I., Indarti, N., & Jie, F. (2018). Bibliometric analysis of the term 'green manufacturing'. *International Journal of Management Concepts and Philosophy*, 11(3), 315-339. <https://doi.org/10.1504/ijmcp.2018.093500>
- Society of Fire Protection Engineers (SFPE). (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed.). Springer.
- Su, C. H., Hung, S. M., & Wang, S. C. (2025). Enhancing Fire Safety in Taiwan's Elderly Welfare Institutions: An Analysis Based on Disaster Management Theory. *Sustainability*, 18(1), 347. <https://doi.org/10.3390/su18010347>
- Suliman, M., & Zulkarnain, F. (2022). Functionality of Building Design Related to Means of Escape (MoE) in Student Housing at Public Universities, as Required By-Law and Other Fire Codes. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. <https://doi.org/10.37934/araset.28.105122>
- Tan, S., Weinert, D., Joseph, P., & Moinuddin, K. (2020). Impact of technical, human, and organizational risks on reliability of fire safety systems in high-rise residential buildings—Applications of an integrated probabilistic risk assessment model. *Applied Sciences*, 10(24), 8918. <https://doi.org/10.3390/app10248918>
- Tan, S., Weinert, D., Joseph, P., & Moinuddin, K. (2021). Sensitivity and uncertainty analyses of human and organizational risks in fire safety systems for high-rise residential buildings with probabilistic THO-risk methodology. *Applied Sciences*, 11(6), 2590. <https://doi.org/10.3390/app11062590>
- Vovk, O. & Kopchak, R. (2025). Research into the dynamics of fire development and the efficiency of the fire alarm system in a high-rise building. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.2478/prolas-2025-0024>
- Wang, Y., Hou, L., Li, M., & Zheng, R. (2021). A novel fire risk assessment approach for large-scale commercial and high-rise buildings based on fuzzy analytic hierarchy process (Fahp) and coupling revision. *International journal of environmental research and public health*, 18(13), 7187. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137187>
- World Fire Statistics Centre. (2022). *World fire statistics bulletin*. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF).
- Zhang, Y., Wang, G., Wang, X., Kong, X., Jia, H., & Zhao, J. (2024). Regional high-rise building fire risk assessment based on the spatial markov chain model and an indicator system. *Fire*, 7(1), 16. <https://doi.org/10.3390/fire7010016>
- Zhao, H., Yu, Z., & Zhu, J. (2023). A real-time pre-response experiment system for high-rise building fires based on the internet of things. *Fire*, 6(7), 271. <https://doi.org/10.3390/fire6070271>