

Analisis Risiko Kebakaran dengan Menggunakan Metode Layer of Protection Analysis dan Event Tree Analysis pada Gedung Perkantoran PT XYZ

Febi Mardianto

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: febi.mardianto@gmail.com

Keywords:

fire risk assessment; layer of protection analysis; event tree analysis; fire protection system; office building

Abstract

Fires in office buildings are a potential hazard that has a serious impact on human safety, operational disruption, and economic losses. PT XYZ's office building in South Sumatra has a high level of spatial complexity and an existing fire protection system that has not been evaluated quantitatively. This study aims to analyze the level of fire risk and evaluate the effectiveness of the Independent Protection Layer (IPL) in the existing protection system using a combination of Layer of Protection Analysis (LOPA) and Event Tree Analysis (ETA) methods. Each layer of protection is analyzed using LOPA with the Probability of Failure on Demand (PFD) approach, then advanced scenarios are developed using ETA to map the path of success and failure of the protection system. The results of the analysis showed that the demo room building and ICT building were in the high-risk category with a risk value of 20 and 15, respectively, and the probability of the final event was $2.92 \times 10^{-1}/\text{year}$ and $3.12 \times 10^{-3}/\text{year}$. The probability of fire developing reaches 42.40-45.28%, which indicates that the existing protection system is not optimal. Based on the risk evaluation, the fire protection system has not met the criteria of ALARP (As Low As Reasonably Practicable), so it is necessary to improve the protection system. The combination of LOPA and ETA is effective in identifying weaknesses in protection systems and providing a quantitative basis for risk mitigation decision-making. The proposed recommendations include the installation of an automatic sprinkler system, the integration of smoke detectors with fire alarms, the development of hydrant systems, and the strengthening of emergency response capacity. This research is expected to be a reference in the development of a more reliable and integrated fire protection system in office buildings.

Kata Kunci:

analisa risiko kebakaran; layer of protection analysis; event tree analysis; sistem proteksi kebakaran; gedung perkantoran; manajemen risiko; alarp

Abstrak

Kebakaran pada gedung perkantoran merupakan potensi bahaya yang berdampak serius terhadap keselamatan manusia, gangguan operasional, dan kerugian ekonomi. Gedung perkantoran PT XYZ di Sumatera Selatan memiliki tingkat kompleksitas ruang yang tinggi serta sistem proteksi kebakaran eksisting yang belum dievaluasi secara kuantitatif. Penelitian ini bertujuan menganalisis tingkat risiko kebakaran dan mengevaluasi efektivitas lapisan proteksi (*Independent Protection Layer/IPL*) pada sistem proteksi yang ada menggunakan kombinasi metode *Layer of Protection Analysis* (LOPA) dan *Event Tree Analysis* (ETA). Analisis dilakukan melalui identifikasi sumber bahaya utama (*initiating event*) seperti korsleting listrik, *overheating* peralatan, dan kelalaian manusia. Setiap lapisan proteksi dianalisis menggunakan LOPA dengan pendekatan *Probability of Failure on Demand* (PFD), kemudian dikembangkan skenario lanjutan menggunakan ETA untuk memetakan jalur keberhasilan dan kegagalan sistem proteksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung *demo room* dan gedung ICT berada pada kategori risiko tinggi dengan nilai risiko masing-masing

20 dan 15, serta probabilitas kejadian akhir sebesar $2,92 \times 10^{-1}$ /tahun dan $3,12 \times 10^{-3}$ /tahun. Probabilitas kebakaran berkembang mencapai 42,40–45,28%, yang mengindikasikan sistem proteksi eksisting belum optimal. Berdasarkan evaluasi risiko, sistem proteksi kebakaran belum memenuhi kriteria ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), sehingga diperlukan peningkatan sistem proteksi. Kombinasi LOPA dan ETA efektif dalam mengidentifikasi kelemahan sistem proteksi dan memberikan dasar kuantitatif dalam pengambilan keputusan mitigasi risiko. Rekomendasi yang diusulkan meliputi pemasangan sistem *sprinkler* otomatis, integrasi *smoke detector* dengan *fire alarm*, pengembangan sistem *hydrant*, serta penguatan kapasitas tanggap darurat. Penelitian ini diharapkan menjadi acuan dalam pengembangan sistem proteksi kebakaran yang lebih andal dan terintegrasi pada gedung perkantoran.

PENDAHULUAN

Kebakaran adalah kejadian yang tidak dikehendaki dan tidak diduga yang tidak hanya mengancam nyawa dan harta benda, tetapi juga mengganggu kelangsungan operasional, yang pada akhirnya berpotensi menimbulkan kerugian finansial yang signifikan bagi Perusahaan (Riza et al., 2025). Dalam hal mengelola kebakaran bukan sekedar menyediakan alat-alat pemadam, atau melakukan latihan pemadaman kebakaran secara berkala setahun sekali, namun memerlukan program terencana dalam suatu sarana yang disebut sistem proteksi kebakaran (Atmojo et al., 2023; Dianawati & Mokhtar, 2024; Sadewa, 2018).

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 36 tahun 2005 tentang Bangunan Gedung menegaskan bahwa setiap bangunan gedung, kecuali rumah tinggal tunggal dan rumah tinggal deret sederhana, harus dilengkapi dengan sistem proteksi kebakaran aktif. Sistem proteksi kebakaran melindungi bangunan gedung dari bahaya kebakaran yang didasarkan pada penyediaan peralatan yang dapat bekerja secara otomatis maupun manual, yang digunakan oleh penghuni maupun petugas pemadam kebakaran dalam melaksanakan operasi pemadaman.

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 26 Tahun 2008 tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi Kebakaran pada Bangunan Gedung dan Lingkungan, menegaskan bahwa bahaya kebakaran adalah bahaya yang diakibatkan adanya potensi ancaman dan tingkat paparan terhadap kebakaran mulai dari awal terjadinya kebakaran sampai dengan menjalarnya api yang menimbulkan asap dan gas.

Menurut laporan data dari *National Fire Protection America* (NFPA) selama tahun 2018-2022 untuk kejadian kebakaran dengan kategori hunian atau jenis properti, terdapat 1.371.308 kasus yang menyebabkan 3.690 kematian, 14.992 korban luka-luka dan kerugian properti sebesar \$ 18.251.092.401 (NFPA, 2024).

Pada Permen PU No. 26 Tahun 2008 menjelaskan bahwa persyaratan teknis sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan hidup mendefinisikan sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan hidup sebagai suatu sistem yang terdiri dari instalasi terpasang, peralatan, dan instalasi terpasang yang ditempatkan pada bangunan gedung dan digunakan untuk sistem proteksi aktif, sistem proteksi pasif, atau keperluan pengelolaan lainnya.

PT XYZ merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang Eksplorasi Produksi Minyak dan Gas Bumi. PT XYZ dalam kegiatan operasionalnya berada di wilayah Provinsi Sumatera Selatan dengan melalui 9 wilayah administrasi baik kota maupun kabupaten dapat dilihat pada Gambar 1.1. Kegiatan eksplorasi minyak dan gas bumi yang dimaksud tentunya merupakan keseluruhan proses kompleks yang melibatkan berbagai disiplin ilmu dalam

melakukan kegiatan operasionalnya. Selain kegiatan utamanya dalam melakukan eksplorasi minyak dan gas bumi, PT XYZ memiliki Gedung Perkantoran yang digunakan untuk mendukung kegiatan utama tersebut khususnya aset Perusahaan seperti sumber daya manusia, data *center*, dokumen penting Perusahaan dan aset Perusahaan pendukung lainnya.

Sebagaimana halnya fasilitas produksi, gedung perkantoran juga memiliki potensi terjadinya kebakaran (Ramadhanu et al., 2023). Banyak penyebab kebakaran yang terjadi diperkantoran yang memiliki banyak aktivitas manusia, peralatan listrik, kondisi dari partisi gedung, baik material maupun dari sebarannya. Gedung perkantoran juga merupakan aset yang harus dikelola dengan baik dari potensi kebakaran karena di gedung perkantoran dihuni oleh aset Perusahaan seperti sumber daya manusia data perusahaan, dokumen penting Perusahaan dan aset Perusahaan pendukung lainnya (Putra, 2010).

Komplek Perkantoran PT XYZ terdiri dari dari Gedung *Integrated Demo Room* dan Gedung ICT merupakan Gedung lama yang telah mengalami pengembangan untuk dijadikan sebagai Gedung yang salah satunya digunakan sebagai sarana pembelajaran penguatan pemahaman terhadap aspek HSSE yang terdiri dari ruang auditorium, ruang operator, ruang kelas, dan ruang peraga. Selain Gedung *Integrated Demo Room*, juga terdapat Gedung ICT yang berfungsi sebagai data *center* Perusahaan.

Berdasarkan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), data statistik kejadian kebarakan di Gedung perkantoran dan Gedung ICT dapat ditampilkan pada Tabel 1.1 terlihat bahwa angka kejadian kebakaran di Gedung Perkantoran dan Gedung ICT terus meningkat. Total kerugian akibat kebakaran yang terjadi di banyak negara maju di dunia berada pada rentang 0,8 sampai 2 dari GDP (*Gross Domestic Product*) pada masing-masing negara tersebut (Nurjaman et al., 2022)

Jam operasional Komplek Perkantoran PT XYZ berlangsung dari hari Senin sampai dengan hari Jumat mulai dari Pukul 07.00 Wib s.d 16.00 Wib. Sedangkan pada malam hari dan akhir pekan tidak ada petugas yang berada di dalam Gedung tersebut. Tingkat okupasi Gedung Demo Room adalah 28 orang/hari. Sedangkan Gedung ICT merupakan gedung data center dan jaringan yang dimiliki oleh perusahaan yang juga beroperasi secara harian (senin-jumat).

Komplek Perkantoran sudah dilengkapi dengan sistem proteksi kebakaran aktif yang terdiri Alat Pemadam Api Ringan (APAR), Mobil Pemadam Kebakaran, Pompa Pemadam Kebakaran yang berada di area Perkantoran Field Limau dan Fasilitas Pusat Pengumpul Produksi Field Prabumulih (Fahmi et al., 2026; Hapsari, 2025; Manurung & Sutanto, 2024). Alat deteksi seperti *smoke detector* dan alat pemadaman seperti *water sprinkle*, jalur hidran khusus di area Gedung Perkantoran tersebut belum tersedia (Azizah et al., 2023).

Sistem proteksi kebakaran aktif yang tersedia di gedung perkantoran PT XYZ perlu dilakukan evaluasi terhadap pemenuhan minimal sistem proteksi yang mengacu pada PermenPU No. 26 tahun 2008 dan analisis terhadap kemungkinan kejadian lanjutan kebakaran dari setiap proteksi yang dimiliki. Pendekatan *Layer of Protection Analysis* (LOPA) menjadi salah satu metode yang relevan untuk menganalisis lapisan proteksi yang dimiliki. Sedangkan pendekatan *Event Tree Analysis* (ETA) merupakan metode yang dapat digunakan untuk menentukan dampak kejadian dan probabilitas lanjutan dari lapisan proteksi yang dimiliki di area gedung perkantoran PT XYZ.

Penelitian ini diharapkan memberikan gambaran terhadap lapisan proteksi yang dimiliki dengan penggunaan metode LOPA. Analisis lanjutan dilakukan terhadap kemungkinan kejadian dari setiap kegagalan lapisan proteksi yang telah dimiliki menggunakan *event tree* sehingga akan dihasilkan matriks risiko dari sistem proteksi yang dimiliki dan mendapatkan

rekomendasi sistem proteksi kebakaran yang perlu diperbaiki untuk peningkatan keselamatan gedung perkantoran khususnya di PT XYZ (Santoso & Trijetti, 2020; Zulfikri et al., 2025). Secara akademis, penelitian ini dapat memperkaya literatur tentang analisis kebakaran gedung perkantoran dengan pendekatan kombinasi LOPA dan ETA yang belum banyak diterapkan secara luas khususnya di gedung perkantoran. Pendekatan LOPA sering digunakan untuk menganalisis lapisan proteksi pada fasilitas proses.

Keberhasilan dalam mengatasi kegagalan lapisan proteksi kebakaran akan memberikan dampak positif bagi Perusahaan. Perusahaan dapat melakukan mitigasi dan merencanakan untuk melengkapi lapisan proteksi yang relevan dalam pemenuhan sistem proteksi kebakaran yang ada di gedung perkantoran PT XYZ. Penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi kondisi eksisting sistem proteksi kebakaran di area Perkantoran PT XYZ dengan mengacu pada pemenuhan minimal sistem proteksi kebakaran bangunan, menganalisis dampak yang terjadi jika sistem proteksi kebakaran tidak terpenuhi, serta menganalisis pengurangan dampak dari beberapa kontrol eksisting yang dimiliki melalui metode Layer of Protection Analysis (LOPA) dan probabilitas kejadian lebih lanjut menggunakan Event Tree Analysis (ETA) dari setiap jalur kejadian dan lapisan proteksi yang dimiliki, sehingga dapat memberikan rekomendasi skenario yang dapat digunakan untuk mengurangi dampak dari kegagalan sistem pengendalian kebakaran. Secara teoritis, penelitian ini memperkaya literatur tentang analisis risiko kebakaran gedung perkantoran dengan pendekatan kombinasi LOPA dan ETA yang belum banyak diterapkan secara luas, khususnya di gedung perkantoran yang sebelumnya lebih sering digunakan pada fasilitas proses industri. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan memberikan gambaran terhadap lapisan proteksi yang dimiliki, menganalisis kemungkinan kejadian dari setiap kegagalan lapisan proteksi, menghasilkan matriks risiko sistem proteksi, serta memberikan rekomendasi perbaikan sistem proteksi kebakaran untuk peningkatan keselamatan gedung perkantoran PT XYZ dan dapat menjadi acuan bagi perusahaan sejenis dalam pengembangan sistem proteksi kebakaran yang lebih andal dan terintegrasi.

METODE PENELITIAN

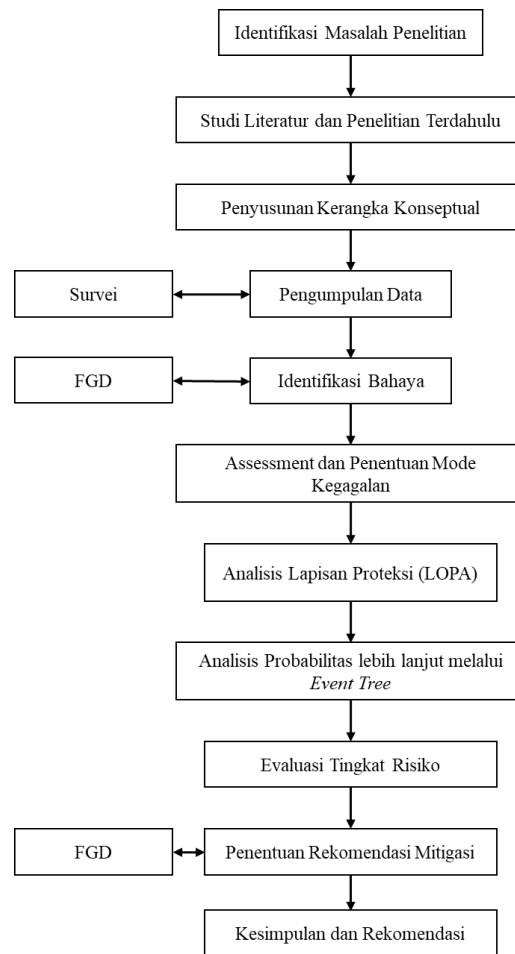
Konsep Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksploratif dengan menggunakan data kuantitatif dan kualitatif dalam melakukan analisis untuk mendapatkan solusi atau rekomendasi. Pendekatan ini digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual sistem proteksi kebakaran dan potensi bahaya kebakaran pada gedung perkantoran menggunakan metode kombinasi *Layer of Protection Analysis* (LOPA) dan *Event Tree Analysis* (ETA). LOPA digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi terhadap lapisan proteksi yang dimiliki melalui wawancara dan diskusi tim Tanggap Darurat dan Teknisi Gedung yang merupakan bagian dari pendekatan kualitatif. Sedangkan ETA digunakan untuk memetakan jalur kejadian dari peristiwa awal hingga konsekuensi akhir. Kemungkinan kejadian dari analisis LOPA menjadi frekuensi kejadian awal pada analisis ETA. Selanjutnya dari probabilitas yang telah dikombinasikan menggunakan analisis ETA, dilakukan evaluasi risiko dan penentuan rekomendasi mitigasi risiko yang dapat dilakukan.

Alur Metode Penelitian

Pada bab ini akan diuraikan metodologi penelitian yang digunakan dan urutan pelaksanaan penelitian mulai dari identifikasi permasalahan, tujuan penelitian, studi literatur, perancangan penelitian, studi pendahuluan, pengumpulan data, identifikasi bahaya, penentuan

mode kegagalan, analisis LOPA dan ETA, evaluasi risiko dan rekomendasi mitigasi serta membuat rekomendasi dan kesimpulan seperti yang dijelaskan pada Gambar 3.1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian
Sumber: Dokumentasi penulis (2024)

Pengumpulan Data

Pada tahapan ini, peneliti mengumpulkan data dari laporan-laporan operasional di area penelitian sebagai latar belakang masalah, kemudian menelaah dan mempelajari mengenai permasalahan yang terjadi pada objek penelitian.

Secara umum, pengumpulan diperoleh melalui sebagai berikut :

Observasi langsung untuk memperoleh informasi yang relevan terhadap Gedung perkantoran seperti ukuran dan Lokasi Gedung perkantoran, konstruksi yang dimiliki, proses yang dilakukan di dalam Gedung perkantoran, sistem proteksi kebakaran aktif maupun pasif, sifat dan kondisi penghuni yang kemungkinan ada, serta informasi tentang bagian Pemadam Kebakaran seperti jarak ke Gedung perkantoran;

Focus Group Discussion (FGD) dengan teknisi fasilitas Gedung, petugas HSSE, dan tim tanggap darurat Perusahaan;

Diskusi dilakukan kepada penghuni Gedung selama periode bulan November-Desember 2025, ketua tim tanggap darurat Gedung, kepala engineering Gedung dan perwakilan manajemen gedung.

Adapun diskusi dilakukan untuk mendapat identifikasi bahaya dari Gedung. Yang akan ditanyakan saat FGD terkait dengan :

1. **Faktor Manusia** : Usia, Jenis kelamin, Tingkat Pendidikan, Pengetahuan mengenai cara memadamkan api di Gedung, Pengetahuan mengenai penggunaan APAR, Pengetahuan mengenai *hydrant*, Pengetahuan mengenai detektor asap, Pengetahuan mengenai nomor darurat Gedung, Lokasi muster point, Perilaku ketika menghadapi kebakaran, Pengetahuan mengenai rambu-rambu exit.
2. **Faktor Mesin** : Deteksi asap, *Alarm* kebakaran, *Sprinkle*, APAR, *Hydrant*, Penghalang asap, Simbol keadaan darurat, Sistem pencahayaan darurat, Titik berkumpul dalam keadaan darurat.
3. **Faktor Material** : Tingkat ketahanan api, Konstruksi dan penunjangnya, Staf petugas pemadam kebakaran, Akses eksit koridor, Eksit, Pintu, Ruang terlindung dan proteksi tangga, Jalan terusan eksit, Kapasitas sarana jalan keluar, Jumlah sarana jalan keluar.
4. **Faktor Metode** : Sistem manajemen keselamatan kebakaran.
5. **Faktor Lingkungan** : Sumber ignisi, Sumber bahan bakar dan oksigen, Kondisi dari gedung lain disekitar, Akses petugas pemadam kebakaran ke lingkungan gedung, Akses petugas pemadam kebakaran ke dalam gedung, Lokasi pemadam kebakaran di sekitar gedung, Lokasi sumber air untuk hidran di sekitar gedung

Dokumentasi visual dan catatan inspeksi terhadap kondisi alat proteksi seperti hydrant, alarm, dan APAR yang dimiliki pada fasilitas perkantoran perusahaan.

Data input yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

Data umum Lokasi

- Denah & tata ruang : luas ruangan (m²), fungsi ruang (panel Listrik, pantry, server), Jalur evakuasi, posisi sekat/dinding tahan api.
- Keterangan bangunan : jumlah lantai, material konstruksi, ventilasi, kapasitas penghuni per lantai.
- Inventaris peralatan risiko tinggi : panel Listrik, UPS, genset, server rack, peralatan dapur.
- Sejarah insiden : catatan kejadian kebakaran/nyala api dalam 5-10 tahun terakhir.

Data initiating event (IEF)

Untuk setiap skenario awal (mis. Korsleting panel Listrik, overheating server, tumpahan minyak di pantry, human error) :

- Frekuensi inisiasi : kejadian per tahun (1/year). Jika tidak tersedia lokal, akan digunakan data referensi (NFPA/USFA/CCPS).
- Deskripsi skenario : kondisi yang memicu, lokasi, waktu (shift), probabilitas awal
- Data sumber : Inspeksi teknis, rekaman perbaikan, wawancara teknis.

Data lapisan proteksi (*Indepent Protection Layers*)

Untuk setiap proteksi potensial disetiap skenario :

- Nama IPL : smoke detector, fire alarm panel, automatic sprinkler, APAR, fire door, hydrant, emergency lighting, fire bridge response.
- Fungsi keselamatan : deteksi, suppression, isolasi, evakuasi.
- Independensi : apakah sistem ini benar-benar independent dari sistem control proses/kelistrikan yang sama.
- PFD (Probability of Failure on Demand) : nilai PFD per IPL (nilai referensi atau hasil uji). Jika tidak ada data, nilai PFD menggunakan referensi CCPS/IEC/literature sebagai asumsi.
- Data pendukung : hasil uji fungsi, catatan pemeliharaan interval uji.

Conditional Modifiers (CM)

Faktor kondisi yang mempengaruhi efektivitas proteksi :

- Waktu respon manusia (detik/menit) dan tingkat pelatihan (skor)
- Kondisi ventilasi, tingkat penyebaran asap
- Ketersediaan sumber air untuk hydrant/sprinkler
- Kondisi listrik cadangan yang mempengaruhi operasi detector/sprinkler

Semua diberi nilai faktor (0-1) sebagai multiplier

Data Konsekuensi : Konsekuensi keselamatan, ekonomi dan kategori severity skala 1-5 untuk tujuan penentuan ALARP. Sumber data dari valuasi aset, asuransi, manajemen Keuangan Perusahaan atau data referensi yang disesuaikan.

Tabel 1. Data Input yang Diperlukan

Kategori	Input Data / Informasi yang Diperlukan	Sumber Data / Metode Pengumpulan
Identifikasi bahaya (<i>Hazard Identification</i>)	Potensi sumber api: korsleting listrik, peralatan panas (printer, AC), rokok, dll.	Observasi lapangan, wawancara, data HSSE, laporan insiden sebelumnya (5-10 tahun terakhir)
Kondisi awal (<i>Initiating Event</i>)	Kebakaran kecil akibat korsleting listrik di ruang server	Hasil inspeksi instalasi listrik, laporan pemeliharaan
Frekuensi kejadian awal (<i>Initiating Event Frequency</i>)	1×10^{-3} kejadian/tahun (berdasarkan data historis industri perkantoran)	Statistik kebakaran Gedung (5-10 tahun terakhir)
Lapisan Perlindungan (<i>Independent Protection Layers/IPL</i>)	1. Detektor asap otomatis 2. Sistem alarm kebakaran 3. Sprinkler otomatis 4. Petugas keamanan & tim tanggap darurat	Data sistem proteksi kebakaran Gedung
Efektivitas IPL (<i>Probability of Failure on Demand/PFD</i>)	- Detektor asap: 0.1 - Alarm: 0.1 - Sprinkler: 0.01 - Petugas keamanan: 0.1	Nilai tipikal dari standar LOPA (CCPS, IEC 61511)
Konsekuensi (<i>Severity</i>)	Kebakaran ruang server menyebabkan kerusakan peralatan TI dan dokumen penting → potensi kerugian Rp 2 miliar, gangguan operasional 7 hari	Analisis dampak finansial dan operasional
Cabang Pohon Kejadian (ETA)	Skenario berhasil/gagal tiap lapisan proteksi (deteksi → alarm → sprinkler → evakuasi)	Pengembangan <i>Event Tree</i> berdasarkan urutan kejadian kebakaran

Sumber: Data primer diolah (2024)

Populasi

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh sistem proteksi kebakaran, sumber potensi risiko, serta kondisi operasional pada Gedung Demo Room dan Kantor ICT Zona 4. Selain itu, populasi juga termasuk individu yang terlibat langsung dalam aktivitas operasional Gedung dan Kantor. Populasi individu terdiri dari penanggung jawab Gedung, tenaga ahli, teknisi gedung, dan penghuni gedung.

Sampel

Penentuan sampel dilakukan menggunakan teknik *purposive sampling*, yaitu metode pemilihan responden berdasarkan kriteria tertentu yang disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. Hal ini dilakukan mempertimbangkan tingkat risiko dan relevansi terhadap potensi kejadian kebakaran. Sampel meliputi :

- Ruang dengan risiko tinggi seperti ruang panel Listrik, ruang server, dan pantry;
- Skenario *initiating event* utama;
- Lapisan proteksi yang berperan signifikan dalam mitigasi risiko.

Pendekatan ini digunakan karena penelitian bersifat risk-based dan berorientasi pada analisis rekayasa.

Analisis LOPA

Pada tahapan ini, data yang dikumpulkan dari studi literatur dan laporan lapangan kemudian diolah. Data input pada analisis LOPA meliputi :

- Informasi dasar tentang sumber kebakaran, penyebab kebakaran dan konsekuensi kebakaran Gedung perkantoran;
- Informasi tentang pengendalian yang ada seperti sistem proteksi kebakaran pasif dan aktif,
- Frekuensi peristiwa penyebab
- Probabilitas kegagalan lapisan perlindungan
- Ukuran konsekuensi
- Definisi risiko yang dapat ditoleransi

Adapun urutan dalam melakukan analisis adalah dengan mengidentifikasi bahaya dan faktor penyebab dari kejadian kebakaran pada area perkantoran kemudian melakukan assessment dan penentuan mode kegagalan dari sistem proteksi kebakaran yang dimiliki pada area perkantoran. Selanjutnya dilakukan analisa pasangan sebab akibat dari daftar risiko dan *Independent Protection Layer* (IPL) menggunakan metode LOPA.

Langkah dalam penerapan LOPA adalah sebagai berikut :

1. Menentukan skenario berbahaya (misal: kebakaran akibat korsleting panel listrik, gagal fungsi sprinkler).
2. Mengidentifikasi lapisan perlindungan independen (*Independent Protection Layers/IPL*).
3. Menentukan *Probability of Failure on Demand (PFD)* untuk setiap IPL.

Hasil dari analisis LOPA adalah rekomendasi pengendalian lebih lanjut dan sebagai data input pengembangan lebih lanjut analisis *Event Tree*.

Analisis ETA

ETA selanjutnya digunakan untuk menentukan apakah peristiwa tersebut dapat dikendalikan oleh sistem dan prosedur keselamatan yang telah didesain dan diterapkan dalam sistem.

Data input pada analisis ETA meliputi :

- Peristiwa pemicu kebakaran Gedung perkantoran
- Setiap IPL yang terdapat pada analisis LOPA serta probabilitas kegagalan dari setiap barriers.
- Skenario-skenario yang mungkin terjadi

Tahapan dalam melakukan analisis ETA adalah sebagai berikut :

1. Menentukan peristiwa awal (contoh: korsleting di panel listrik).
2. Mengidentifikasi lapisan proteksi (detektor asap, alarm, sprinkler, evakuasi manual).
3. Menyusun diagram pohon kejadian (*event tree*) untuk setiap jalur sukses/gagal sistem proteksi yang dimiliki.

4. Menghitung probabilitas setiap jalur dengan mengalikan nilai probabilitas antar kejadian.

Hasil dari analisis ETA berupa :

- Deskripsi kualitatif tentang hasil potensi dari peristiwa pemicu;
- Perkiraan kuantitatif tentang frekuensi peristiwa atau probabilitas serta pentingnya relatif dari berbagai urutan kegagalan dan peristiwa yang berkontribusi;
- Evaluasi kuantitatif tentang efektivitas pengendalian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap Identifikasi Bahaya dan Skenario

Berdasarkan hasil wawancara, observasi, dan analisis data, diperoleh beberapa skenario kebakaran Gedung perkantoran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 Skenario kebakaran gedung perkantoran.

Tabel 2. Skenario Kebakaran Gedung Perkantoran

Skenario ID	Skenario Kebakaran	Sumber Bahaya	Area
S1	Korsleting listrik	Instalasi listrik, Perangkat IT	Panel/ruang server, Ruang alat peraga, Data center
S2	<i>Human error</i>	Penggunaan listrik	Ruang kerja
S3	Kebakaran pantri	Material mudah terbakar	Pantri

Sumber: Data primer diolah berdasarkan hasil observasi dan wawancara (2024)

Dari ketiga skenario kebakaran gedung perkantoran, korsleting listrik menjadi skenario paling dominan karena dapat berupa:

- Kerusakan instalasi listrik
- Kerusakan peralatan listrik
- Instalasi listrik tidak standard

Berdasarkan data statistik *National Fire Protection Association* (NFPA) dan *US Fire Administration* (USFA), frekuensi kebakaran gedung non-residensial dari tahun 2020-2024.

Jumlah kebakaran gedung non-residensial pada periode 2020-2024 berkisar antara 105.000 hingga 120.000 kejadian per tahun. Kebakaran tersebut mengakibatkan sekitar 120 hingga 140 orang korban meninggal (*severity level 5 Catastrophic*) dan lebih dari 1.000 orang korban luka setiap tahunnya dengan total kerugian properti mencapai USD 3-4 miliar (*severity level 4 Significant*). Kejadian kebakaran ini tentunya akan menimbulkan pemberitaan secara nasional/regional (*severity level 4 Significant*). Penyebab kejadian kebakaran dari tahun 2020-2024 didominasi oleh aktivitas memasak (30,20%), kegagalan sistem kelistrikan (12,20%), kesalahan manusia (13,60%), tindakan tidak disengaja (10,00%), dan dari aktivitas lainnya (34,00%). Dari data tersebut menunjukkan bahwa faktor manusia dan sistem kelistrikan merupakan kontributor utama kebakaran gedung dengan kemungkinan kejadian dari korsleting listrik sebesar $1,38 \times 10^{+4}$ per tahun dan dari human error sebesar $1,54 \times 10^{+4}$ per tahun.

Dapat diketahui bahwa frekuensi penyebab kejadian kebakaran gedung perkantoran berasal dari korsleting listrik yang memberikan konsekuensi terhadap manusia berupa korban meninggal dan kerusakan properti yang dimiliki perusahaan. Penyebab kejadian kebakaran yang berasal dari korsleting Listrik terjadi 2 kejadian dalam 5 tahun sehingga dapat dihitung frekuensi kejadian sebesar 0,4 per tahun.

Kebakaran gedung perkantoran memiliki level risiko *moderate to high* hingga *high* dimana perlu dilakukan perilaku risiko dengan *reduce/mitigate* atau *transfer/sharing*. Probabilitas maupun keparahan/*severity* dari kejadian kebakaran gedung perkantoran sangat memungkinkan memberikan level 5/*Catastrophic* dimana dari segi manusia itu dapat memberikan korban lebih dari 1 orang sehingga perlu dilakukan pencegahan dan penanggulangan terhadap sistem proteksi kebakaran yang dimiliki agar tidak memberikan eskalasi dampak kejadian besar (*major accident*).

Analisis Lapisan Proteksi (LOPA)

Identifikasi Lapisan Proteksi

Lapisan perlindungan independen (*Independent Protection Layer/IPL*) eksisting yang teridentifikasi dapat dilihat pada Tabel 3 Lapisan proteksi eksisting gedung perkantoran dengan mengembangkan data yang telah teridentifikasi.

Tabel 3. Lapisan Proteksi Eksisting Gedung Perkantoran PT XYZ

Nama IPL	Kondisi		Keterangan
	Gedung demo room	Gedung ICT	
<i>Basic proses control</i>	Bangunan konkrit	Bangunan konkrit	Material bangunan dan pengaturan penyimpanan bahan mudah terbakar (jika ada)
Deteksi asap	Tidak tersedia	Tidak tersedia	Gap utama
<i>Fire alarm</i>	Tersedia namun terbatas	Tersedia	Tidak terintegrasi penuh, bergantung pada deteksi dan waktu respon manusia
<i>Fire Hydrant</i>	Tersedia namun terbatas	Tersedia namun terbatas	Tersedia di luar gedung
APAR	Tersedia, kondisi baik	Tersedia, kondisi baik	Bergantung pada pelatihan dan waktu respon manusia
<i>Sprinkler</i>	Tidak tersedia	Tersedia	Bergantung pada otomasi
<i>Emergency response</i>	Tersedia	Tersedia	Bergantung kesiapsiagaan

Sumber: Data primer diolah berdasarkan hasil observasi dan wawancara (2024)

Pada Tabel 3 terdapat sistem proteksi yang bukan termasuk kedalam lapisan perlindungan independen (IPL) seperti jalur evakuasi yang jelas dan mudah diakses, rencana evakuasi yang terlatih, *training* dan *awareness*. Namun hal tersebut akan mempengaruhi respon dari IPL yang telah dimiliki.

Analisis Probabilitas Kegagalan (PFD)

Berdasarkan referensi standar (CCPS/NFPA), probabilitas kegagalan lapisan proteksi yang teridentifikasi pada gedung perkantoran dapat dilihat Tabel 4.7 Probabilitas kegagalan lapisan proteksi eksisting.

Tabel 4. Probabilitas Kegagalan Lapisan Proteksi Gedung Perkantoran

Nama IPL	Kategori IPL	PFD	Keterangan
<i>Basic proses control</i>	Pencegahan & pengendalian awal	10^{-1}	Tidak independen sepenuhnya

Nama IPL	Kategori IPL	PFD	Keterangan
<i>Fire alarm</i>	Deteksi dini	10^{-1}	Bergantung pada deteksi dan waktu respon manusia
<i>Fire Hydrant</i>	Pencegahan & pengendalian awal	10^{-1}	10^{-2} jika terintegrasi
APAR	Pencegahan & pengendalian awal	10^{-1}	Bergantung pada pelatihan dan waktu respon manusia
<i>Sprinkler</i>	Pencegahan & pengendalian awal	10^{-2}	Bergantung pada otomasi
<i>Emergency response team</i>	Evakuasi & perlindungan manusia	10^{-1}	Rutin dilatih

Sumber: CCPS (2015), NFPA (2021), dan data primer diolah (2024)

Hasil Perhitungan Risiko LOPA

Dalam penentuan risiko LOPA, diperlukan pengolahan data dari tingkat keparahan kejadian, penyebab pemicu, kemungkinan kejadian pemicu dari jumlah kejadian kebakaran dari tahun 2020-2024, nilai PFD mulai dari lapisan proteksi sistem kontrol dasar (*basic design control*), *alarm* dan tindakan operator, *fire suppression*, APAR, dan *emergency response* serta kondisi termodifikasi seperti faktor okupansi dan kemungkinan pemicu. Pada lingkup penelitian ini, tidak terdapat kejadian antara kebakaran gedung karena bukan fasilitas proses produksi.

Lingkup kejadian kebakaran terjadi pada gedung demo room dan gedung ICT dengan penyebab pemicu berupa korsleting listrik. Tingkat keparahan/severity mengacu pada penjelasan Tabel 4.3 bahwa kejadian kebakaran gedung dapat mengakibatkan lebih dari 1 orang korban meninggal (*severity level 5 Catastrophic*) dan kategori severity terkait aspek manusia (*people*) merupakan aspek yang memiliki tingkat dampak tertinggi.

Pada penjelasan subbab 4.2, diketahui bahwa kemungkinan penyebab pemicu dari korsleting listrik sebesar $1,38 \times 10^{-4}$ per tahun. Nilai kemungkinan pemicu dijadikan sebagai kemungkinan pada perhitungan pada skenario yang teridentifikasi. Lapisan perlindungan pada setiap gedung disesuaikan Tabel 4.6 dengan nilai *Probability of Failure* mengacu pada Tabel 4.7.

Berdasarkan CCPS, faktor yang dapat mempengaruhi kondisi termodifikasi (*Conditional Modifier/CM*) adalah kehadiran manusia saat kejadian, lamanya orang/aset terpapar bahaya, eskalasi menjadi kejadian besar (*major accident hazard*), sistem evakuasi dan proteksi pasif yang dimiliki, kecepatan deteksi dan respon, dan jenis konsekuensi yang dianalisis. Berdasarkan kondisi dari operasional kebakaran diakibatkan konsleting panel listrik, gedung *demo room* dan gedung ICT tidak selalu ada orang, hanya jam kerja, eskalasi bisa tidak berkembang, dan deteksi lambat sehingga CM masuk kategori sedang (nilai 0,5).

Hasil perhitungan risiko LOPA pada setiap skenario yang teridentifikasi pada kebakaran gedung perkantoran Tabel 4.8.

Tabel 5. Perhitungan Risiko LOPA pada Skenario yang Teridentifikasi

Deskripsi Dampak Peristiwa	Tingkat Keparahan (<i>Severity</i>)	Deskripsi penyebab pemicu	Kemungkinan pemicu (freq/tahun)	Lapisan Perlindungan (<i>Probability of Failure</i>)				
				Sistem kontrol dasar	Alarm dan tindakan operator	<i>Fire Suppression</i>	APAR	<i>Emergency Response</i>
Gedung Demo Room								
Kebakaran	<i>Catastrophic</i>	Korsleting listrik	1,38E+04	0,1	0,1	<i>Not available</i>	0,1	0,1
Gedung ICT								
Kebakaran	<i>Catastrophic</i>	Korsleting listrik	1,38E+04	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1

Tabel 5. Perhitungan risiko LOPA pada setiap skenario yang teridentifikasi (Lanjutan)

Deskripsi Dampak Peristiwa	Tingkat Keparahan (<i>Severity</i>)	Deskripsi penyebab pemicu	Kemungkinan pemicu (freq/tahun)	Kondisi termodifikasi (<i>Conditional Modifier</i>)		Kemungkinan kejadian antara	Kemungkinan Akhir	
				Faktor okupansi	Kemungkinan pemicu			
Gedung Demo Room								
Kebakaran	<i>Catastrophic</i>	Korsleting listrik	4,00E-01	0,5	<i>Not applicable</i>	<i>Not applicable</i>	6,89E-01	
Gedung ICT								
Kebakaran	<i>Catastrophic</i>	Korsleting listrik	4,00E-01	0,5	<i>Not applicable</i>	<i>Not applicable</i>	6,89E-03	

Sumber: Data primer diolah (2024)

Interpretasi LOPA

Pada Tabel 4.8 Hasil perhitungan LOPA menunjukkan bahwa nilai kemungkinan akhir pemicu kejadian dari skenario pemicu kejadian korsleting listrik pada gedung demo room sebesar $6,89 \times 10^{-1}$ per tahun dan pada gedung ICT sebesar $6,89 \times 10^{-3}$ per tahun.

Dengan nilai batas risiko (*tolerable*) sebesar 10^{-6} per tahun, secara matematis, nilai risiko gedung demo room dan gedung ICT berada diatas batas toleransi. Secara praktis, risiko tergolong tinggi terhadap eskalasi kebakaran gedung.

Analisis Event Tree

Penyusunan Event Tree

Skenario *initiating event* mengenai kebakaran yang disebabkan korsleting listrik. Lapisan proteksi yang dimiliki *fire alarm*, *fire hydrant*, *fire suppression*, APAR, dan evakuasi manual. Respon kegagalan dari setiap lapisan proteksi yang dimiliki ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai Sukses atau Kegagalan dari Setiap Lapisan Proteksi yang Dimiliki

Nama Lapisan Proteksi	Fungsi	Sukses/Gagal	Referensi
<i>Fire alarm</i>	Memberikan peringatan	0,9/0,1	NFPA 72
<i>Fire suppression</i>	Pemadaman otomatis	0,95/0,05	NFPA 2001
<i>Fire hydrant</i>	Pemadaman tindakan manusia	0,8/0,2	NFPA 72
APAR	Pemadaman awal oleh manusia	0,8/0,2	CCPS (2001/2015)

Sumber: NFPA (2021), CCPS (2015)

Probabilitas *Event Tree*

Probabilitas dari setiap konsekuensi kejadian mulai dari kejadian kebakaran terkendali, kebakaran lokal, kebakaran berkembang hingga kebakaran besar. Kebakaran ini disesuaikan dengan sukses/gagal dari setiap sistem proteksi yang ada di setiap gedung. Hasil probabilitas *event tree* dari setiap kebakaran gedung dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Probabilitas *Event Tree* Kebakaran Gedung

No	Jalur event	Probabilitas		Dampak Kejadian
		ICT	<i>Demo room</i>	
1	Semua berhasil	54,72%	57,60%	Kebakaran terkendali
2	APAR gagal	13,68%	14,40%	Kebakaran lokal
3	<i>Fire hydrant</i> gagal	17,10%	18,00%	Kebakaran berkembang
4	<i>Fire suppression</i> gagal	4,50%	N/A	Kebakaran berkembang
5	<i>Alarm</i> gagal	10,00%	10,00%	Kebakaran besar

Sumber: Data primer diolah (2024)

Berdasarkan Tabel 7, menunjukkan hasil bahwa kebakaran dapat dikendalikan sebesar 54,72-57,60% sedangkan kebakaran berkembang hingga menjadi besar sebesar 42,40-45,28%. Hal ini dapat disebabkan dengan tidak adanya sistem proteksi kebakaran yang otomatis dan sistem proteksi yang memiliki ketergantungan pada manusia.

Hasil Analisis Probabilitas Lanjut

Probabilitas lanjut dilakukan dengan mengkombinasi kemungkinan kejadian dari metode LOPA dengan kemungkinan kejadian pada *event tree*. Kemungkinan akhir merupakan hasil perkalian kemungkinan kejadian LOPA dan kemungkinan kejadian *event tree*.

Dengan mengacu melakukan kombinasi probabilitas dari LOPA dan *event tree* diperoleh hasil probabilitas lanjut sebagaimana pada Tabel 4.11.

Tabel 8. Hasil Probabilitas Lanjut Kombinasi LOPA dan *Event Tree*

Deskripsi Dampak Peristiwa	Kemungkinan pemicu (freq/tahun)	Kemungkinan LOPA	Kemungkinan <i>event tree</i>	Kemungkinan Akhir
Kebakaran gedung demo room	1,38E+04	6,89E-01	42,40%	2,92E-01
Kebakaran gedung ICT	1,38E+04	6,89E-03	45,28%	3,12E-03

Sumber: Data primer diolah (2024)

Berdasarkan Tabel 8, kemungkinan kejadian akhir dari kombinasi metode LOPA dan event tree diperoleh pada gedung demo room sebesar $2,92 \times 10^{-1}$ per tahun dan pada gedung ICT sebesar $3,12 \times 10^{-3}$ per tahun. Dengan mengacu pada Tabel 3.3, skala probabilitas kejadian kebakaran pada gedung demo room level 4 kategori sangat mungkin terjadi dan pada gedung ICT level 3 kategori bisa terjadi. Hasil probabilitas lanjut tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap level probabilitas kejadian kebakaran pada setiap gedung. Level probabilitas lanjut memiliki hasil yang sama dengan probabilitas pada metode LOPA.

Evaluasi Tingkat Risiko

Evaluasi tingkat risiko dilakukan dengan mengintegrasikan hasil analisis LOPA dan event tree untuk memperoleh nilai probabilitas kejadian akhir serta tingkat konsekuensi dari setiap skenario kebakaran. Probabilitas akhir kejadian kebakaran pada gedung demo room berada pada level 4 dengan kategori sangat mungkin terjadi, sedangkan pada gedung ICT berada pada level 3 dengan kategori bisa terjadi.

Dari sisi keparahan atau severity, kejadian kebakaran pada kedua gedung tersebut berdampak terhadap manusia berupa korban jiwa lebih dari 1 orang, sehingga masuk pada level 5 atau kategori catastrophic. Dampak terhadap aset dan peralatan juga signifikan, dengan nilai aset gedung demo room sebesar USD 312.500 dan gedung ICT sebesar USD 625.000, yang menurut Tabel 3.4 Skala Severity termasuk pada level 3 atau kategori moderate. Selain itu, kejadian kebakaran ini juga berpotensi memberikan dampak terhadap reputasi dan legal Perusahaan secara regional (induk Perusahaan), termasuk dampak legal terhadap regulator akibat pemberitaan yang muncul, sehingga dampak ini dikategorikan pada level 4 atau significant.

Dengan menggunakan persamaan dasar di mana risiko merupakan hasil perkalian antara probabilitas dan konsekuensi, diperoleh skala risiko akhir sebesar 20 untuk kebakaran gedung demo room dan 15 untuk kebakaran gedung ICT. Kedua nilai tersebut menempatkan risiko kebakaran pada kedua gedung dalam kategori tinggi (high).

Berdasarkan prinsip ALARP (As Low As Reasonably Practicable) yang diterapkan Perusahaan, tingkat risiko pada kategori tinggi atau high dengan rentang nilai 15–25 tergolong tidak dapat diterima (unacceptable). Kondisi ini mengharuskan dilakukannya serangkaian rencana mitigasi segera, antara lain dengan menunda pekerjaan atau operasi hingga rencana mitigasi jangka panjang dapat menurunkan risiko ke tingkat moderate. Apabila pekerjaan atau operasi tetap harus dilanjutkan, maka penerapan dispensasi dan rencana mitigasi jangka pendek harus mendapat persetujuan dari Pimpinan Tertinggi Perusahaan, sementara rencana mitigasi jangka panjang tetap harus dipersiapkan dan dijalankan dengan monitoring berkala guna memastikan efektivitas tindakan pengendalian serta penurunan tingkat risiko. Lebih lanjut, untuk skenario risiko yang berpotensi menyebabkan multiple fatalities, minimal perlu dilakukan analisis risiko semi-quantitative.

Hasil evaluasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa kebakaran gedung demo room dan gedung ICT memiliki kategori risiko tinggi dengan nilai risiko masing-masing 20 dan 15. Probabilitas kejadian yang diperoleh dari analisis kombinasi LOPA dan event tree menunjukkan bahwa kemungkinan terjadinya kebakaran masih relatif tinggi, terutama pada gedung demo room yang belum dilengkapi sistem proteksi otomatis. Di samping itu, tingkat konsekuensi yang berada pada kategori catastrophic menegaskan bahwa kebakaran berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap keselamatan manusia, aset, dan keberlangsungan operasional Perusahaan. Dengan demikian, berdasarkan evaluasi prinsip ALARP, tingkat risiko yang ada saat ini masih berada pada kategori tidak dapat diterima (unacceptable), sehingga diperlukan tindakan mitigasi tambahan, khususnya melalui peningkatan sistem proteksi kebakaran yang bersifat otomatis dan terintegrasi.

Penentuan Rekomendasi Mitigasi

Berdasarkan hasil analisis LOPA dan event tree yang telah dilakukan, tingkat risiko kebakaran gedung demo room dan gedung ICT PT XYZ masih berada pada kategori tinggi (*high risk*) dengan nilai risiko masing-masing sebesar 20 dan 15 serta probabilitas kejadian yang masih melebihi batas toleransi (ALARP). Hal ini menunjukkan bahwa lapisan proteksi yang ada saat ini belum mampu menurunkan risiko secara optimal.

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, kelemahan utama sistem proteksi adalah:

1. Tidak tersedia sistem proteksi otomatis seperti tidak tersedianya automatic sprinkler pada Sebagian besar gedung khususnya demo room; dan tidak tersedianya *smoke detector* terintegrasi.
2. Ketergantungan pada sistem manual seperti APAR, hydrant, respon manusia dalam melakukan tindakan pengendalian kebakaran gedung.
3. Keterbatasan sistem deteksi dini seperti fire alarm tidak terintegrasi dengan sistem deteksi otomatis; keterlambatan respon awal meningkatkan probabilitas eskalasi kebakaran gedung.
4. Keterbatasan sistem evakuasi seperti emergency sign, lampu darurat, dan jalur evakuasi di beberapa ruangan gedung.

Rekomendasi mitigasi teknis yang dapat diberikan berupa peningkatan sistem proteksi aktif, peningkatan sistem proteksi pasif, peningkatan faktor manusia, dan peningkatan sistem manajemen keselamatan gedung.

Berdasarkan hasil analisis, rekomendasi mitigasi diutamakan pada peningkatan sistem proteksi aktif dan pasif serta penguatan faktor manusia. Implementasi sistem proteksi otomatis seperti *sprinkler* dan *smoke detector* menjadi prioritas utama karena mampu menurunkan probabilitas eskalasi kebakaran secara signifikan. Dengan penerapan rekomendasi ini, diharapkan tingkat risiko kebakaran pada Gedung PT XYZ dapat diturunkan hingga mencapai tingkat yang dapat diterima sesuai prinsip ALARP yang dimiliki Perusahaan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi kebakaran pada gedung perkantoran PT XYZ masih memiliki keterbatasan dalam menurunkan tingkat risiko kebakaran secara efektif. Hal ini terlihat dari hasil analisis LOPA menunjukkan nilai *Probability of Failure on Demand* (PFD) sebagian besar lapisan proteksi berada pada kisaran 10^{-1} , serta hasil *event tree* menunjukkan probabilitas kebakaran berkembang masih cukup tinggi yaitu sebesar 42,40-45,28%.

Berdasarkan teori yang dijelaskan pada Bab II, kondisi tersebut sesuai dengan konsep yang terdapat pada CCPS (2015) bahwa lapisan proteksi dengan nilai PFD tinggi (mendekati angka satu) memiliki tingkat keandalan yang rendah, sehingga diperlukan penambahan atau

peningkatan *Independent Protection Layer* (IPL) untuk mencapai tingkat risiko yang dapat diterima. Selain itu, tidak tersedianya sistem proteksi otomatis seperti *sprinkler* dan *smoke detector* yang terintegrasi menunjukkan adanya gap antara kondisi eksisting dengan standar internasional NFPA 13 (*sprinkler system*) dan NFPA 72 (*fire alarm system*), yang menekankan pentingnya deteksi dini dan pemadaman otomatis dalam mengendalikan kebakaran pada tahap awal.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian terdahulu Amini et al., (2022) yang menyatakan bahwa keberadaan sistem proteksi otomatis secara signifikan dapat menurunkan probabilitas eskalasi kebakaran dibandingkan dengan sistem manual.

Berdasarkan hasil analisis LOPA dan *event tree* diperoleh bahwa risiko gedung demo room dan gedung ICT berada pada kategori *high risk* dengan nilai risiko masing-masing adalah 20 dan 15. Probabilitas kejadian masih berada di atas batas toleransi risiko (10^{-6} per tahun). Hal ini menunjukkan bahwa sistem proteksi eksisting belum mampu menurunkan risiko hingga mencapai tingkat ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*). Menurut ISO 31000 (2018) dan HSE (2001), risiko pada kategori ini berada pada zona *unacceptable* sehingga memerlukan tindakan mitigasi yang bersifat wajib dan segera.

Selanjutnya hasil *event tree* menunjukkan bahwa keberhasilan sistem proteksi sangat dipengaruhi oleh keberadaan sistem otomatis, kecepatan deteksi, dan keterlibatan manusia. Ketergantungan pada faktor manusia menjadi salah satu penyebab utama tingginya risiko, sebagaimana dijelaskan dalam teori bahwa sistem berbasis manusia memiliki ketidakpastian yang tinggi (Ramli, 2010).

Hasil penelitian ini memberikan implikasi penting terhadap penerapan manajemen risiko di PT XYZ khususnya dalam aspek keselamatan gedung (*Building Fire Safety Management*). Sistem proteksi yang ada saat ini masih bersifat reaktif (mengandalkan pemadaman setelah kebakaran terjadi) dan belum optimal dalam pencegahan dengan implikasi perlunya pengembangan sistem yang lebih preventif melalui deteksi dini dan sistem pemadaman otomatis. Hal ini sesuai dengan konsep manajemen risiko modern dalam ISO 31000 (2018) yang menekankan pendekatan preventif dalam pengendalian risiko.

Hasil LOPA menunjukkan bahwa sebagian besar IPL memiliki nilai PFD sebesar 10^{-1} , yang berarti tingkat kehandalan rendah. Implikasi manajerial perlu mengambil keputusan investasi pada *upgrading*/peningkatan sistem proteksi kebakaran dengan menambahkan *sprinkler system*, *smoke detector*, dan *fire suppression system* (khusus gedung demo room). Investasi ini akan meningkatkan faktor reduksi risiko secara signifikan sesuai dengan konsep LOPA (Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2015).

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem proteksi belum terintegrasi dan belum ada pengelolaan sistem kebakaran secara menyeluruh sehingga Perusahaan perlu mengimplementasikan *fire safety management system*, prosedur inspeksi dan audit berkala, sistem dokumentasi dan monitoring. Hal ini sesuai dengan konsep manajemen keselamatan dalam standar NFPA dan ISO 31000.

Hasil ETA juga menunjukkan bahwa keberhasilan pengendalian kebakaran sangat dipengaruhi oleh faktor manusia, khususnya dalam penggunaan APAR dan respon awal (Dinata et al., 2025). Perusahaan perlu meningkatkan kompetensi tenaga kerja, melakukan pelatihan rutin tanggap darurat, dan membentuk tim fire warden (Handayana et al., 2016; Hardjo et al., 2026; Semara Putra, 2024). Namun sesuai dengan teori CCPS, sistem berbasis manusia tidak dapat dijadikan satu-satunya kontrol utama sehingga harus dikombinasikan dengan sistem otomatis.

Kebakaran pada gedung perkantoran tidak hanya memberikan dampak pada keselamatan, tetapi juga pada gangguan operasional, kerugian ekonomi, dan kerusakan reputasi Perusahaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat konsekuensi berada pada kategori *Catastrophic* yang berarti berpotensi menyebabkan kerugian besar. Pengelolaan risiko kebakaran harus menjadi bagian dari *business continuity management* (BCM) dan strategi keberlanjutan Perusahaan. Hal ini sesuai dengan pendekatan ISO 22301 (*Business Continuity*) yang menekankan pentingnya kesiapsiagaan terhadap bencana.

Penelitian ini memberikan kontribusi teoritis dalam mengembangkan penerapatan metode LOPA dan ETA pada gedung perkantoran, yang sebelumnya lebih digunakan pada industri proses. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pendekatan semi-kuantitatif dapat diterapkan pada sistem proteksi kebakaran gedung perkantoran. Penelitian memberikan model integrasi LOPA, ETA, *risk evaluation* dan *mitigation*.

KESIMPULAN

Sistem proteksi kebakaran gedung perkantoran PT XYZ belum sepenuhnya memenuhi standar minimal, terutama pada sistem deteksi dini, sprinkler, dan hydrant internal, yang menunjukkan bahwa tingkat kesiapan proteksi masih terbatas; hasil evaluasi menunjukkan bahwa kebakaran memiliki tingkat keparahan/severity 5 (*catastrophic*) dengan dampak mencakup korban jiwa lebih dari 1 orang, kerusakan aset, dan gangguan operasional sehingga kebakaran merupakan risiko kritis yang harus dikendalikan, dengan pencegahan eksisting yang dapat dilakukan berupa peningkatan terhadap sistem proteksi pasif melalui pemberian pelatihan penggunaan APAR dan hydrant, simulasi tanggap darurat secara berkala, dan pembentukan fire warden team untuk tim tanggap darurat dari setiap lantai dan gedung, serta peningkatan terhadap sistem manajemen berupa implementasi fire safety management system, audit berkala sistem proteksi yang dimiliki, dan monitoring serta maintenance rutin lapisan proteksi independent. Hasil LOPA menunjukkan bahwa beberapa lapisan proteksi eksisting memiliki nilai PFD tinggi (10^{-1}) dengan probabilitas akhir pada gedung demo room sebesar $6,89 \times 10^{-1}$ per tahun dan pada gedung ICT sebesar $6,89 \times 10^{-3}$ per tahun, yang menunjukkan bahwa lapisan proteksi eksisting dapat memberikan penurunan probabilitas awal sebesar $1,38 \times 10^{+4}$ per tahun, meskipun probabilitas akhir kejadian kebakaran dari hasil LOPA masih berada di atas batas toleransi. Probabilitas lanjut hasil dari LOPA dilakukan menggunakan event tree dengan menunjukkan hasil probabilitas kebakaran terkendali sebesar 54,72–57,60% dan probabilitas kebakaran berkembang 42,40–45,28%, sehingga kemungkinan kejadian akhir dari kombinasi metode LOPA dan event tree diperoleh pada gedung demo room sebesar $2,92 \times 10^{-1}$ per tahun dan pada gedung ICT sebesar $3,12 \times 10^{-3}$ per tahun; dengan mengacu pada Tabel 3.3 Skala Probabilitas, kejadian kebakaran pada gedung demo room memiliki probabilitas level 4 kategori sangat mungkin terjadi dan pada gedung ICT memiliki probabilitas level 3 kategori bisa terjadi, di mana hasil probabilitas lanjut tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap level probabilitas kejadian kebakaran pada setiap gedung karena level probabilitas lanjut memiliki hasil yang sama dengan probabilitas pada metode LOPA. Hasil evaluasi tingkat risiko menunjukkan bahwa kebakaran gedung demo room dan gedung ICT memiliki kategori risiko high dengan nilai risiko masing-masing 20 dan 15, dan berdasarkan evaluasi dengan prinsip ALARP, tingkat risiko yang ada masih berada pada kategori tidak dapat diterima (*unacceptable*) sehingga diperlukan tindakan mitigasi tambahan berupa peningkatan pada sistem proteksi otomatis, keandalan lapisan proteksi independent, dan kompetensi

manusia, dengan mitigasi utama yang perlu diimplementasikan adalah penambahan sprinkler dan smoke detector.

REFERENSI

- Amini, M., Soltanzadeh, A., Ghiyasi, S., & Najafiyani, H. (2022). Assessment of Maximum Possible Loss Caused by Fire in High-Rise Buildings Using the LOPA Method : A Case Study on Central Insurance Building of Iran. *Archives of Occupational Health*, 6(3), 1281-1287.
- Azizah, A., Wahyuni, I., & Jayanti, S. (2023). Tinjauan Penerapan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) Dalam Implementasi Sistem Proteksi Kebakaran Aktif Di SMA Islam Hidayatullah Semarang. *Media Kesehatan Masyarakat Indonesia*, 22(3), 145–152.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2015). *Layer of Protection Analysis : Simplified Process Risk Assessment* (2nd ed.). American Institute of Chemical Engineers.
- Dianawati, R., & Mokhtar, A. (2024). Analisis Keselamatan dan Penentuan Safety Integrity Level (SIL) pada Sistem Pengisian Tabung LPG menggunakan Metode LOPA. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia UMM*, 4(2).
- Dinata, F. R. D., Yulandar, S. A., Azzira, P. A., Sari, L., Mawarni, W., & Adira, S. K. (2025). Edukasi Penggunaan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) dalam Pencegahan Kebakaran di Pabrik Tahu Surya: Edukasi Penggunaan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) dalam Pencegahan Kebakaran di Pabrik Tahu Surya. *Jurnal Pengabdian Kesehatan Komunitas*, 5(2), 22–33.
- Fahmi, M., Rusba, K., & Ramdan, M. (2026). Penerapan Sistem Proteksi Kebakaran Pada Gedung Terminal PT Angkasa Pura Indonesia Kantor Cabang Bandar Sams Balikpapan. *IDENTIFIKASI*, 12(1), 393–402.
- Handayana, M. S., Suroto, S., & Kurniawan, B. (2016). Analisis Manajemen Pelaksanaan Pada Kesiapsiagaan dan Tanggap Darurat di Gedung Perkantoran X. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(1), 322–331.
- Hapsari, R. T. (2025). Gambaran Manajemen Penanggulangan Kebakaran Dan Sistem Proteksi Kebakaran Aktif Di Bandar Udara Sangia Nibandera Kolaka. *Journal of Health Sciences Leksia (JHSL)*, 3(1), 11–23.
- Hardjo, M. F. R. M. T., Wanci, R., Jaya, W. H., & Sapan, S. M. (2026). Simulasi Tanggap Darurat Bencana Gempa Bumi di Universitas Famika: Emergency Response Team (ERT). *Idea Pengabdian Masyarakat*, 6(01), 117–126.
- Manurung, J., & Sutanto, H. (2024). Evaluasi Sistem Pemadam Kebakaran (Fire Protection) di Gedung Perkantoran Cengkareng Business City (CBC) Tangerang. *Jurnal Praktik Keinsinyuran*, 1(02), 149–160.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2021). NFPA 13 : Standard for the Installation of Springkler Systems and NFPA 101: Life Safety Code. Batterymarch Park, Quincy: National Fire Protection Association.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2021). NFPA 551: Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. Batterymarch Park, Quincy: National Fire Protection Association.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2021). NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code. Batterymarch Park, Quincy: National Fire Protection Association.
- Putra, B. K. (2010). Pencegahan dan penanggulangan kebakaran di PT. INKA (persero) Madiun Jawa Timur. *Disertasi Doktor, Universitas Sebelas Maret*.
- Ramadhanu, M. H., Damayanti, N. A., Rahmadani, A. N., & Ashari, M. L. (2023). Sistem Pencegahan Dan Penanggulangan Kebakaran Pada Salah Satu Bangunan Gedung Kantor Galangan Di Tanjung Perak. *Journal of Student Research*, 1(6), 503–510.
- Sadewa, Y. A. A. (2018). *Penentuan SIL (Safety Integrity Level) pada Alat Coal Feeder dan*

- Coal Mill dengan Penerapan Metode LOPA (Layer Of Protection Analysis) di Perusahaan Pupuk.* Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Santoso, I. G., & Trijeti, T. (2020). Analisa Penyebab Keterlambatan Proyek Bangunan Gedung Perkantoran 53 Lantai Menggunakan Metode Fault Tree Analysis (FTA). *Prosiding Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ.*
- Semara Putra, I. B. G. (2024). *Evaluasi Pelatihan Tanggap Bencana di ITDC Nusa Dua.* Politeknik Negeri Bali.
- Zulfikri, M. F., Suardika, I. N., & Dewi, G. A. W. K. (2025). Analisis Penyebab dan Dampak Keterlambatan Proyek Menggunakan Metode Fault Tree Analysis dan Event Tree Analysis pada Pekerjaan Pintu Jendela Aluminium (Studi Kasus Proyek ITB Innovation Park Bandung). *Prosiding Seminar Nasional Ketekniksipilan Bidang Vokasional, 4(1).*