

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 KAJIAN API

Api tidak terbentuk begitu saja, namun terjadi karena ada reaksi kimia antara uap bahan bakar dengan oksigen dan panas. Teori ini lebih dikenal sebagai segitiga api (*fire triangle*) yang menjadi faktor terciptanya api, jika salah satu dari faktor tersebut tidak ada maka api tidak dapat tercipta (Ramli, 2010). Ketiga faktor itu adalah:



Gambar 7 Segitiga Api

Sumber: <http://nusantaratraisser.co.id/>, diunduh pada 12 September 2022

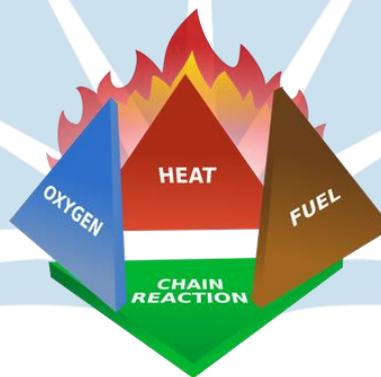
1. *Fuel* (bahan bakar), merupakan elemen bahan bakar padat, cair dan gas pembakaran yang bercampur dengan oksigen di udara. Bahan bakar dapat berasal dari:
 - a. Bahan bakar padat, misalnya kayu, kertas, plastik, serat, logam, dll.
 - b. Bahan bakar cair, misalnya bensin, minyak tanah, alkohol, tiner, dll.
 - c. Bahan bakar gas, misalnya propana, hidrogen, karbit yang terkena air, dll.
2. *Heat* (sumber panas), merupakan energi yang cukup untuk menyalakan bahan bakar dan oksigen di udara yang akan memicu kebakaran. Sumber panas dapat berasal dari mesin, api yang terbuka, sinar matahari, energi mekanik, kompresi, listrik dan perpindahan panas.
3. Oksigen. Tanpa elemen oksigen di udara, tidak akan terjadi proses kebakaran dan kadar yang dibutuhkan untuk terjadi kebakaran minimal sebesar 21%.

Heat Release Rate (HRR) atau tingkat pelepasan panas dari pembakaran bahan bakar biasanya disebut variabel yang paling penting dalam kebakaran (Babrauskas & Peacock, 1992). Ukuran dan kecepatan api berhubungan langsung dengan bahaya terhadap nyawa manusia, harta benda dan lingkungan. Definisi formal HRR adalah tingkat dimana energi panas dihasilkan oleh pembakaran (NFPA Glossary of Terms, 2021)

Laju pelepasan panas atau HRR dipertimbangkan sebagai kekuatan api dengan merinci jumlah energi (kilojoule) dari waktu ke waktu (detik) yang dihasilkan api, oleh karena itu satuan HRR adalah watt (W). HRRPUA merupakan laju pelepasan panas atau HRR yang diukur berdasarkan luasan permukaan yang terbakar (kW/m²) (Gorbett & Kozhumal, 2023).

Semakin cepat bahan bakar terbakar, semakin cepat panas dilepaskan sehingga transfer kembali ke permukaan bahan bakar terjadi lebih cepat. Setelah api dinyalakan, lebih banyak panas yang dilepaskan dan umpan balik panas berkembang, putaran umpan panas ini mempengaruhi kecepatan pengapian bahan bakar terdekat lainnya, serta menghasilkan asap dan produk pembakaran lainnya (Gorbett & Kozhumal, 2023).

Studi lebih lanjut mengungkapkan kejadian kebakaran tidak hanya disebabkan oleh tiga faktor yang telah dijabarkan di atas, namun ada faktor keempat, yaitu reaksi pembakaran berantai (*Chemical Chain Reaction*). Sehingga teori segitiga api berubah menjadi model baru yang dinamakan bidang empat api (Ramli, 2010).



Gambar 8 Reaksi Pembakaran Berantai

Sumber: <https://www.kajianpustaka.com/>, diunduh pada 12 September 2022

Dasar teori ini menjabarkan hasil dari pembakaran normal akibat dari reaksi kimia yang terbentuk zat CO, CO₂, SO₂, asap, gas, dan hidroksil yang merupakan radikal bebas akibat reaksi atom oksigen dengan hidrogen. Bila terdapat dua hidroksil, maka terbentuk reaksi yang menghasilkan H₂O dan O radikal bebas atau $2\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ radikal. O radikal ini lah yang menjadi umpan kimia baru sehingga pembakaran dapat berlangsung, oleh sebab itu dinamakan reaksi pembakaran berantai (Rahardjo & Hafizh, 2019).

2.2 KEBAKARAN

2.2.1 Penjalaran Api

Kebakaran biasanya bermula dari api kecil, kemudian membesar dan menyebar ke daerah sekitarnya, penyebaran api dapat melalui berbagai cara yaitu (Ramli, 2010):

1. Konveksi, merupakan penjalaran melalui besi, beton, kayu atau dinding. Jika suatu ruangan terbakar maka panasnya akan merambat melalui dinding sehingga ruangan di sebelahnya akan mengalami peningkatan suhu yang dapat menyebabkan api merambat dengan mudah.
2. Konduksi, merupakan penjalaran api melalui fluida, misalnya bahan cair atau udara. Suatu ruangan dapat terbakar akibat menerima hembusan angin yang membawa udara panas ke area sekitarnya.
3. Radiasi, merupakan penjalaran panas melalui proses radiasi dari pancaran cahaya atau gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh nyala api. Dalam proses radiasi terjadi perpindahan panas yang dapat menyebabkan penjalaran api.

2.2.2 Penyebab Kebakaran

Menurut Depnaker RI 1987, kebakaran dapat terjadi karena tiga faktor:

1. Aspek manusia
Manusia memegang peran paling utama dalam sebuah kejadian kebakaran, faktor manusia sebagai penyebab kebakaran, antara lain:
 - a. Menyimpan benda yang mudah terbakar tanpa perlindungan khusus.
 - b. Menggunakan listrik berlebih.
 - c. Sikap staf pekerja yang kurang memperhatikan keselamatan kerja.
 - d. Minimnya pengawasan yang dilakukan terhadap pekerja.
 - e. Lalainya dalam mengawasi sistem penanggulangan bencana kebakaran.
2. Aspek alam
Alam merupakan tempat tinggal manusia yang juga dapat menjadi faktor penyebab kebakaran, antara lain:
 - a. Petir yang menyambar material mudah terbakar.
 - b. Letusan gunung berapi, lahar panasnya dapat membakar hutan dan bangunan yang dilaluinya.
3. Aspek teknis

- a. Melalui proses fisik atau mekanis seperti panas yang dapat meningkatkan suhu dan timbul percikan api.
- b. Melalui proses kimia, terjadi pengangkutan, penyimpangan, penanganan barang berbahaya atau bahan kimia tanpa mengikuti petunjuk yang ada.
- c. Melalui tenaga listrik, hubungan arus pendek menimbulkan panas dan percikan api yang dapat membakar komponen di sekitarnya

2.2.3 Bahaya Kebakaran

Kebakaran dapat menimbulkan trauma baik fisik maupun psikis, bahaya kebakaran antara lain adalah (Ramli, 2010):

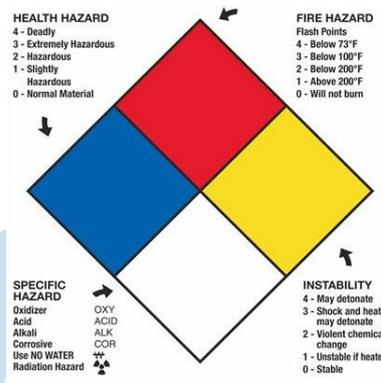
1. Terbakar api langsung, panas yang terlalu tinggi akan menyebabkan luka bakar bahkan kematian akibat hangus terbakar. Kerusakan pada kulit dipengaruhi oleh temperatur api mulai dari 45°C untuk efek ringan dan efek terparah dimulai dari suhu 72°C.
2. Terjebak asap kebakaran, kematian karena terjebak asap diakibatkan oleh minimnya oksigen dan terlalu banyak menghirup gas beracun. Kemungkinan gas beracun yang ada tergantung jenis material yang terbakar, namun yang biasa ditemui adalah hidrogen sianida, asam sianida, karbon monoksida, karbon dioksida, dan lain-lain.
3. Bahaya susulan, yang paling sering dijumpai adalah runtuhnya konstruksi bangunan dan ledakan bahan atau material dalam ruangan yang terbakar.
4. Trauma, kondisi panik akibat terperangkap, kehilangan arah untuk melakukan evakuasi diri dan melihat korban lain yang mungkin tidak selamat tepat di depan mata dapat membuat korban selamat mengalami tekanan jiwa.

2.2.3.1 Kategori kebakaran

Jenis kebakaran di Indonesia ditetapkan sebagai berikut (Musadek et al., 2021)

- a. Api kelas A, disebabkan oleh bahan padat non logam. Contohnya adalah kayu, kertas, karet atau plastik, kain, dan sebagainya.
- b. Api kelas B, disebabkan oleh bahan pelarut organik atau bahan bakar cair. Contohnya adalah benzena, eter, kerosin, solar, bensin, LPG/LNG, dan sebagainya.
- c. Api kelas C, disebabkan oleh barang elektronik atau instalasi listrik. Contohnya adalah setrika, kompor listrik, televisi dan lain-lain.
- d. Api kelas D, disebabkan oleh benda logam. Contohnya kalium, litium, natrium, magnesium, aluminium, dan lain-lain.
- e. Api kelas E, disebabkan oleh bahan masakan misalnya minyak nabati maupun hewani.

NFPA 704 menyatakan dalam wajik untuk mendefinisikan “square-on-point” (Hart, 2021)



Gambar 9 Klasifikasi Bahaya Material

Sumber: www.carltonusa.com, 2021

Untuk *fire hazard* sendiri disimbolkan dengan warna merah dengan deskripsi *degree of hazard* sebagai berikut (NFPA 704 Standard System for the Identification of the Hazard Materials for Emergency Response, 2022)

Tabel 2 Tingkat bahaya kebakaran

Tingkat	Kriteria		Contoh
0	Tidak bisa terbakar		air, beton, batu dan pasir
1	Pemanasan ringan	Punya titik nyala 93°C (200°F)	minyak kedelai dan ammonia
2	Pemanasan sedang	Punya titik nyala diantara 38 °C (100 °F) dan 93 °C (200 °F)	diesel, kertas dan sulfur
3	Pemanasan serius	Punya titik nyala diantara 23 °C (73 °F) dan 38 °C (100 °F)	bensin dan aseton
4	Pemanasan ekstrim atau mudah terbakar pada suhu dan tekanan normal	Titik nyala dibawah 23 °C (73 °F).	propana, hidrogen, dan acetylene

Sumber: NFPA 704 Standard System for the Identification of the Hazard Materials for Emergency Response, 2022

NFPA 400 Hazardous Materials Code, 2022 menyatakan bahwa bahan bakar yang ada pada rangking di atas dapat memengaruhi kebutuhan ventilasi yang digunakan bangunan selain desain bangunan, terbuka atau tertutup, itu sendiri.

Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor PER.04/MEN/1980 tentang Syarat-Syarat Pemasangan Dan Pemeliharaan Alat Pemadam Api Ringan menyatakan golongan kebakaran berdasarkan bahan bakarnya, sebagai berikut:

Tabel 3 Golongan Kebakaran berdasarkan Bahan Bakar

Golongan		Bahan yang Terbakar	
A	Bahan padat kecuali logam	Kebakaran pada permukaan bahan	Kayu, kertas, tekstil, dll
		Kebakaran sampai bagian dalam dan bahan	Kayu, majun, arang batu, dll
		Kebakaran dan barang-barang yang jarang didapat dan berharga	Benda yang ada di museum, arsip-arsip, koleksi-koleksi, dll
		Kebakaran dan bahan-bahan saat pemanasan mudah terurai	Karet busa, plastik busa dll
B	Bahan cair dan gas	Kebakaran dari bahan yang tidak dapat bercampur dengan air	Bensin, bensol, cat, tir, lak, aspal, gemuk, minyak, dll
		Kebakaran yang larut dalam air	Alkohol, hand sanitizer dll
		Gas yang mengalir	LPG
		Bahan dengan air pembentuk gas mudah terbakar	Karbit, posfat dll
C	Aparat-aparat listrik bertegangan (berspaning)	Panel penghubung, peti penghubung, sentra telepon, transformator, dll	
D	Logam	Magnesium, natrium, kalsium, aluminium	

Sumber: PerMenakertrans, 1980

2.2.3.2 Tingkat Potensi Bahaya Kebakaran

SNI 03-3987-1995 mengelompokkan bahaya kebakaran menjadi tiga bagian:

1. Bahaya kebakaran ringan, hanya terdapat sedikit barang jenis A yang dapat terbakar dan jenis B yang tersimpan aman dengan kata lain api tidak mudah menjalar. Tempat ini biasanya adalah bangunan rumah (hunian), pendidikan (ruang kelas), kebudayaan, kesehatan, dan keagamaan.
2. Bahaya kebakaran menengah, terdapat barang jenis A yang mudah terbakar dan jenis B yang dapat terbakar yang jumlahnya lebih banyak dibanding dengan tempat yang bahaya

kebakarannya ringan. Tempat ini diantaranya adalah bangunan perkantoran, rekreasi, umum, pendidikan (ruang praktikum).

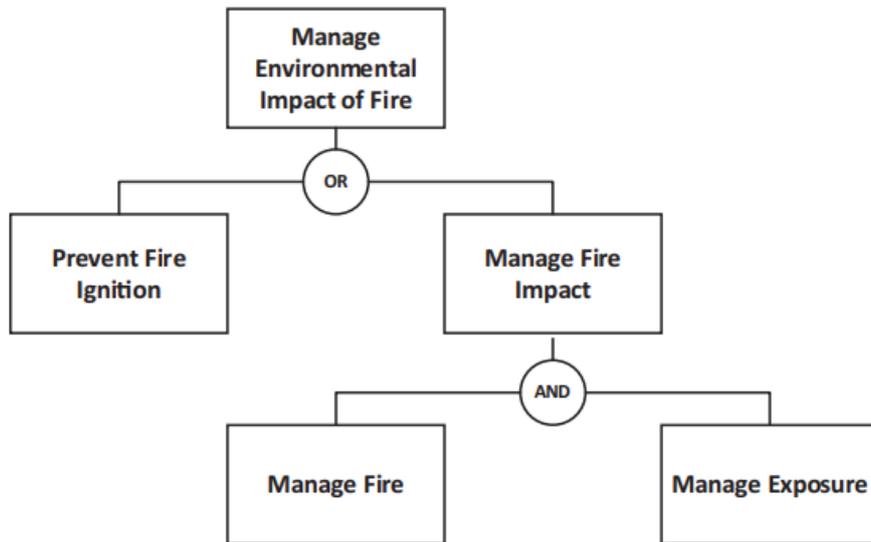
3. Bahaya kebakaran tinggi, terdapat barang jenis A yang mudah terbakar dan barang jenis B yang dapat terbakar yang jumlahnya lebih banyak dari perkiraan jumlah di tempat dengan bahaya kebakaran menengah. Contoh tempatnya adalah bangunan transportasi (terminal), tempat pameran atau showroom, pertokoan, pasar raya, dan gudang.

Sedangkan NFPA 10 Standard for Portable Fire Extinguisher menentukan bahaya kebakaran sebagai berikut:

1. Bahaya ringan, apabila material padat dan cair yang mudah terbakar memiliki jumlah sedikit. Contoh tempatnya adalah kantor, kelas, tempat ibadah, studio perakitan, dan lobi hotel.
2. Bahaya sedang, apabila material padat dan cair yang mudah terbakar memiliki jumlah yang lebih banyak dibandingkan tempat yang memiliki bahaya ringan. Contohnya area makan, gudang, pabrik lampu, showroom, tempat parkir.
3. Bahaya tinggi, apabila material padat dan cair yang mudah terbakar sedang digunakan, masih tersimpan, dan/atau sisa produk melebihi kapasitas. Contoh lokasinya adalah bengkel, hanggar, bengkel kayu, area pengecatan.

2.2.4 Mitigasi Kebakaran Gedung

Pengelolaan dampak lingkungan akibat kebakaran dapat dikelompokkan menjadi sarana untuk mencegah penyalaan api, sarana mengelola perkembangan dan penyebaran limbah kebakaran, dan sarana pengelolaan keselamatan penghuni (NFPA 550 Guide to the Fire Safety Concepts Tree, 2016). NFPA telah menyajikan opsi fundamental yang disajikan berupa pohon pengelola dampak lingkungan kebakaran sebagai berikut:



Gambar 10 Pohon Pengelola Dampak Lingkungan Kebakaran

Sumber: Meacham, 2023 yang diadaptasi, reproduksi dan modifikasi dari (NFPA 550 Guide to the Fire Safety Concepts Tree, 2016)

Mitigasi kebakaran dan proteksi kebakaran adalah dua konsep yang berbeda dalam rangka pencegahan dan pengendalian kebakaran, namun keduanya sama sama berdampak pada proses evakuasi. Proteksi kebakaran adalah upaya untuk mengurangi dampak kebakaran saat kebakaran terjadi. Proteksi kebakaran melibatkan pemasangan sistem proteksi kebakaran, seperti alat pemadam api, sprinkler dan sistem deteksi kebakaran. Selain itu, proteksi kebakaran juga mencakup pengaturan rencana evakuasi pelatihan karyawan tentang penggunaan alat proteksi kebakaran dan penyediaan sarana penyelamatan (Ramli, 2010)

Teknik proteksi kebakaran melibatkan perancangan perangkat, sistem, dan proses melindungi manusia, properti dan operasi bisnis dari kebakaran. Langkah pencegahan kebakaran dapat direkayasa menggunakan berbagai jenis proteksi yang meliputi: sistem deteksi dengan interlock untuk menutup pintu atau sebagai peredam, *shutdown* HVAC, atau *shutdown* proses yang terjadi; tahan api untuk bangunan, struktur, atau proses; dinding tahan api, penghalang api, pintu api, dan konstruksi tahan api lainnya; sistem inerting; sistem kontrol asap; sistem sprinkler; sistem banjir dan pereaksi; dan sistem pemadam khusus, termasuk yang menggunakan bahan kimia basah atau kering, busa dan *free agent* (Lataille, 2003).

Proteksi kebakaran dalam lingkup teknik arsitektur memperhatikan lokasi bangunan, paparan yang mungkin terjadi pada bangunan, ukuran bangunan dan ukuran area kebakaran, tata letak bangunan, mudah terbakarnya bahan finishing bangunan, dan permasalahan keamanan. Selain bidang arsitektural, proteksi kebakaran berkaitan dengan disiplin ilmu lain seperti teknik kimia

yang memperhatikan bahaya material, penyimpanan material, evaluasi bahan dan utilitas yang dapat menimbulkan kebakaran. Bidang kelistrikan memperhatikan kontrol sistem bangunan, deteksi kebakaran dan sistem alarm, kontrol sistem pemadaman, pompa kebakaran yang digerakkan oleh tenaga listrik, penerangan darurat, cadangan daya, peralatan listrik yang berlokasi berbahaya, dan sistem perlindungan listrik. Bidang mekanik memperhatikan sistem pemipaan kebakaran, pasokan air untuk proteksi kebakaran, sistem HVAC bangunan, sistem kontrol dan manajemen asap, dan sistem ventilasi area (Lataille, 2003).

Sementara itu, Mitigasi kebakaran adalah rangkaian tindakan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kebakaran dan dampak yang ditimbulkannya. Hal ini mencakup peningkatan pemeliharaan, penghapusan bahan yang mudah terbakar dan pengaturan ruang yang memadai, dan pelatihan karyawan tentang tindakan pencegahan kebakaran. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kebakaran secara keseluruhan (Damkar Banda Aceh, 2020).

2.2.4.1 Mencegah pengapian menurut NFPA

Teori segitiga api dapat menjadi acuan untuk melakukan pencegahan terjadinya kebakaran melalui pencegahan pengapian dengan cara mengendalikan potensi sumber penyalaan, mengendalikan bahan bakar atau membatasi ketersediaan oksigen (Meacham, 2023).

1. Mengontrol sumber energi panas

Mengontrol interaksi energi dengan panas adalah tentang meminimalkan sumber penyalaan secara kompeten, yakni sumber penyalaan potensial dengan kekuatan yang cukup untuk menyebabkan penyalaan bahan bakar. Hal ini dapat dicapai dengan menghilangkan sumber penyalaan potensial sama sekali seperti nyala api terbuka, busur listrik, dan sejenisnya. Jika hal ini tidak memungkinkan, seringkali layak untuk membatasi laju pelepasan energi (HRR) dari sumber energi melalui perpindahan material.

2. Mengendalikan bahan bakar

Kontrol bahan bakar adalah pendekatan yang sangat efektif, tetapi tidak selalu praktis. Dalam beberapa kasus, dimungkinkan untuk memilih bahan yang tidak mudah terbakar, seperti untuk sistem struktural atau insulasi termal. Namun, tidak praktis untuk melarang penyimpanan bahan bakar di gudang, ritel, dan fasilitas sejenis lainnya. Beberapa jenis hunian, menggunakan sistem reduksi oksigen (hipoksia) mungkin layak untuk menurunkan konsentrasi oksigen sehingga menghambat pembakaran.

2.2.4.2 Pengurangan risiko kebakaran menurut Damkar

Kebakaran gedung terutama yang terjadi di tempat kerja harus diminimalkan risikonya, karena memiliki efek yang menyebabkan kerugian besar bagi suatu instansi, sekalipun gedung tersebut memiliki asuransi, namun langkah pencegahan tetap harus dilakukan. Setelah faktor penghambat evakuasi ditemukan, tahap selanjutnya adalah mengurangi risiko kebakaran yang dapat dilakukan sebagai berikut (Damkar Banda Aceh, 2020):

1. Mengurangi potensi sumber api

Korsleting listrik menjadi sumber api utama, karena bunga api akibat korsleting listrik yang melompat ke material mudah terbakar menjadi cikal bakal kebakaran.

2. Mengurangi atau menghilangkan bahan yang mudah terbakar

Mitigasi kebakaran berdasarkan material interior dapat dilakukan jika meminimalisir potensi sumber api tidak memungkinkan untuk dilakukan. Mengontrol bahan bakar adalah mitigasi yang paling efektif, dalam banyak kasus dimungkinkan untuk memilih material yang tidak mudah terbakar (Gorbett & Kozhumal, 2023).

3. Melakukan pengaturan aliran udara agar tidak mempercepat penyebaran api

Pengaturan udara atau ventilasi harus disesuaikan dengan desain bangunannya, bangunan tertutup atau terbuka, maupun material atau bahan seperti apa yang ada di dalam gedung, karena perbedaan desain bangunan akan mempengaruhi jenis ventilasi yang dapat digunakan untuk melakukan mitigasi kebakaran.

Ventilasi pada bangunan tertutup atau bagiannya yang terdapat bahan atau material mudah berdebu, menghasilkan kabut, asap, uap atau pun gas yang eksplosif, mudah terbakar, korosif sangat beracun atau mungkin memancarkan radiasi harus dilengkapi dengan ventilasi pembuangan mekanis atau ventilasi alami yang dapat diterima oleh bahan atau material yang ada (NFPA 400 Hazardous Materials Code, 2022).

4. Jalur evakuasi yang jelas dan aman

Penetapan jalur evakuasi harus sesuai dengan tipe penghuni bangunan, setelahnya dapat dilakukan pemberian jalur evakuasi sesuai standar keamanan dan keselamatan yang ada (NFPA 101 Life Safety Code, 2021)

2.2.5 Evakuasi Kebakaran

Evakuasi merupakan kesempatan bagi penghuni bangunan melakukan penyelamatan diri atau berpindah dari lokasi kejadian bahaya melalui rute yang sederhana, cepat, dan aman (Hariman, 1982). Namun menurut Puyan Abolghasemzadeh, ada perbedaan antara istilah evakuasi dan

pencarian jalan keluar (*egress*). *Egress* menggambarkan proses penyelamatan diri dari bahaya tanpa bantuan regu penyelamatan atau orang lain dan umumnya aksi ini dilakukan berdasarkan karakteristik naluri dan pengalaman individu. Sedangkan evakuasi telah direncanakan dan dikendalikan oleh pihak yang telah terlatih untuk menyelamatkan orang dari situasi ekstrim (Sun et al., 2022).

Sarana jalan keluar (*means of egress*) berarti rute darurat yang terus menerus dan tidak terhalang bagian bangunan ataupun strukturnya baik vertikal maupun horizontal yang dapat dilalui menuju jalur aman (Pisailert & Patvichaichod, 2021). Menurut NFPA 101 Life Safety Code Handbook 14th Edition, 2008, *Means of egress* terdiri dari tiga bagian: akses keluar bangunan (*exit access*) adalah bagian dari upaya pencarian jalan keluar dari dalam bangunan menuju media keluar; media keluar (*exit*) merupakan bagian pencarian jalan keluar yang telah terpisah dari ruang lain dengan konstruksi yang menyediakan jalan aman menuju pelepasan keluar; pelepasan keluar (*exit discharge*) berarti bagian dari pencarian jalan keluar antara perhentian jalan keluar dengan area luar (Kraithep & Patvichaichod, 2022).

Studi dasar kinerja keselamatan kebakaran gedung dilakukan dengan mensimulasikan ASET dan RSET. ASET (Available Safe Egress Time) adalah tersedianya waktu safety exit yang berasal dari prediksi panas dan penyebaran asap yang disebabkan oleh kebakaran, sedangkan RSET (Required Safe Escape Time) adalah waktu pergerakan penghuni yang diperlukan untuk sampai ke tempat aman (Schröder et al., 2020). Desain keselamatan kebakaran berbasis kinerja membandingkan ASET dan RSET untuk mendapatkan tingkat minimal proteksi kebakaran (*margin of safety*) yang harus disediakan agar bangunan memenuhi syarat minimal keselamatan (Sujatmiko et al., 2020)

Faktor penting untuk memahami konsep RSET, yaitu: (Salankar et al., 2018)

1. Ignition (IG) : waktu saat api menyala.
2. Detection (DET) : waktu saat api kebakaran terdeteksi
3. Alarm (AL) : waktu di mana alarm aktif
4. Recognition (REC) : waktu saat penghuni sadar akan adanya kebakaran
5. Response (RESP) : waktu saat penghuni tanggap akan kebakaran
6. Evacuation (EVAC) : waktu di mana evakuasi benar-benar dilakukan
7. Untenable Condition (UC) : waktu ketika api menghasilkan gas seperti narkotika, gas iritan, panas, asap, dan gas beracun yang dapat membunuh penghuni.

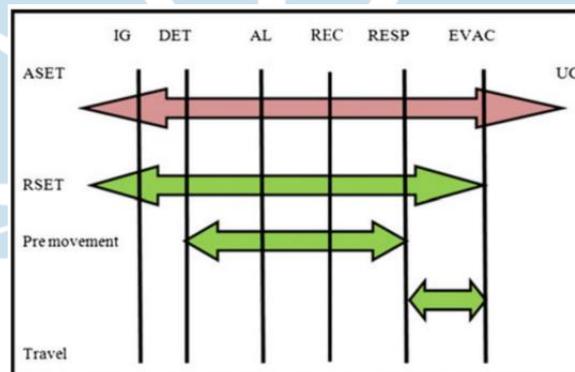
Kriteria untuk mengevaluasi ASET (Tosolini et al., 2012)

1. Lower layer height (LLH) : lapisan minimum asap dari atas lantai
2. Upper layer temperature (ULT) : suhu maksimum yang dapat bertahan pada lapisan asap paling atas
3. Smoke optical density (OD) : tingkat jarak pandang yang dipenuhi asap
4. Max FEC of irritation gases (FEC irritant) : batas ambang untuk konsentrasi gas iritan
5. Max FED of toxic gases (FED toxic) : batas ambang gas yang membuat sesak napas
6. Max FED dose of heat (FED heat) : batas ambang dosis panas

Tabel 4 Ambang Batas Kriteria Kinerja

Kriteria kinerja	Batas ambang	Sumber
LLH (m)	2.0	(National Fire Protection Association, 2000)
ULT (°C)	200	ISO 16738, 2009
OD	5.0	(Xiao et al., 2022)
FED _{toxic}	0.3	ISO 13571, 2007
FED _{heat}	0.3	ISO 13571, 2007

Sumber: Tosolini et al., 2012



Gambar 11 Konsep ASET/RSET

Sumber: Salankar et al., 2018

Maka dapat disimpulkan, jika $ASET > RSET$ artinya penghuni dapat berevakuasi dengan aman; jika $ASET < RSET$ artinya penghuni tidak dapat menyelamatkan diri karena tidak ada jalur exit menuju daerah aman sehingga penghuni mengalami situasi panik; jika $ASET = RSET$ dapat diasumsikan sebagai batas evakuasi penghuni bangunan.

Proses penyelamatan diri maupun evakuasi tidak lepas kaitannya dengan ketahanan bangunan (*tenability*) terhadap kebakaran maupun paparan asap, konsentrasi asap, panas dan visibilitas, yang dapat mengganggu efisiensi pelepasan keluar atau pada tingkat yang lebih tinggi dapat mencegah respon atau ketidakmampuan berlari dan menyebabkan kematian. Ketebalan asap dapat mempengaruhi penghuni melakukan *egress*, pada jarak pandang $\pm 3m$ orang cenderung

berbalik daripada harus menerobos asap, sedangkan jarak pandang yang harus diterima penghuni setidaknya 10 meter untuk dapat mengarahkan diri menuju rute keluar dan keluar (Purser, 2018).

Waktu evakuasi atau proses menuju tempat aman saat terjadi kebakaran tergantung pada jenis konstruksi bangunan yang terbakar yang ditetapkan menjadi tiga kelas (Ramli, 2010).

1. Kelas A: konstruksi bangunan seluruhnya tidak mudah terbakar, waktu evakuasi maksimum adalah 3 menit.
2. Kelas B: bangunan terdiri dari konstruksi mudah terbakar dan tidak mudah terbakar, waktu maksimum melakukan evakuasi adalah 2,5 menit.
3. Kelas C: bangunan yang sepenuhnya menggunakan konstruksi mudah terbakar misalnya rumah kayu, waktu maksimal evakuasi adalah 2 menit.

Karakteristik penghuni gedung akan mempengaruhi waktu dalam proses evakuasi, untuk itu diperlukan konfigurasi antara kecepatan gerak manusia di dalam simulasi untuk mengetahui secara lebih detail terkait waktu tempuh yang terjadi (Abolghasemzadeh, 2013). Sedangkan kecepatan gerak manusia menurut Xiao et al., 2022 dibagi menjadi berikut:

Tabel 5 Kecepatan Gerak Manusia

Lantai jalan	Remaja (m/s)		Dewasa (m/s)	
	Laki-laki	Perempuan	Laki-laki	Perempuan
Lantai datar	1.96	1.78	1.83	1.69

Sumber: Xiao et al., 2022

Ketersediaan jalur evakuasi harus memenuhi standar dan peraturan yang berlaku, di Indonesia sendiri standar jalur evakuasi diatur dalam SNI 03-1746-2000 tentang tata cara perencanaan dan pemasangan sarana jalan keluar untuk penyelamatan terhadap bahaya kebakaran pada bangunan gedung yang mengacu pada NFPA 101: Life Safety Code editi tahun 1997.

Tabel 6 Standar Kebutuhan Evakuasi

Indikator	Standar		Sumber
Tangga	Lebar bersih	110cm, 90cm apabila beban hunian dari total seluruh lantai yang difasilitasi kurang dari 50.	SNI 03-1746-2000
	optrade	Min. 10cm	

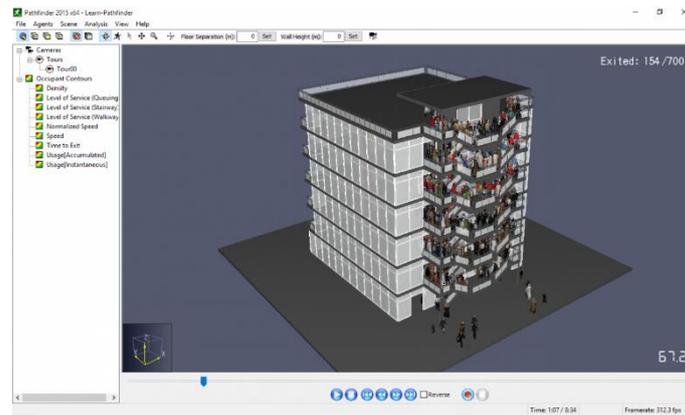
		Maks. 18cm	
	antrade	Min 28cm	
	Pagar pengaman	Sarana jalan keluar >75cm diatas lantai atau dibawah tanah harus ada	
Ramp	Lebar bersih	Maks 110cm	
	kemiringan	1:12 sampai 1:8	
	Pagar pengaman	ada	
	Rel pegangan	ada	
Sirkulasi	pintu	Min. 80cm	
	Kebutuhan minimal manusia berjalan	60 cm	Data Arsitek Jilid 1

Sumber: diolah dari berbagai sumber

2.3 PROGRAM SIMULASI

2.3.1 Pathfinder

Pathfinder merupakan simulator evakuasi yang mengkombinasikan animasi tiga dimensi berkualitas tinggi untuk memberikan jawaban atau hasil perhitungan secara cepat (Thunderhead, 2022a). Software pathfinder menggunakan metode simulasi ganda, yakni sifat penghuni disesuaikan dengan kemungkinan pengambilan keputusan saat evakuasi dengan skenario yang beragam, hal ini memungkinkan perhitungan sesuai dengan apa yang diinginkan. Proses pergerakan maju divisualisasikan melalui 3D sehingga memungkinkan pengguna melakukan evaluasi lebih cepat dan menghasilkan grafik lebih realitas (Ronchi et al., 2016). Sebagai tambahan, program ini digunakan untuk menemukan hasil ASET (Sujatmiko et al., 2020)



Gambar 12 Tampilan Software Pathfinder

Sumber: www.thunderheadeng.com

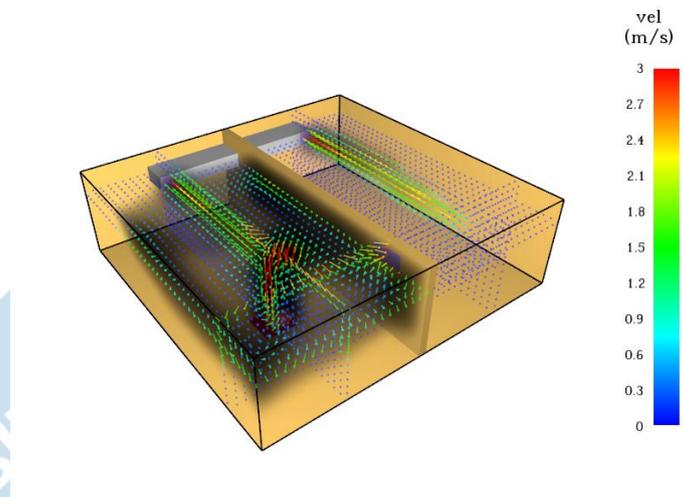
Program pathfinder memiliki parameter sebagai berikut (Sutrisno et al., 2016):

1. *Height*, ketinggian silinder yang digunakan untuk tabraan antar penghuni. Fungsinya untuk membatasi tabraan yang mungkin terjadi antara penghuni di lantai yang berbeda ketika lantai telah dimodelkan dekat bersama sama.
2. *Reduction Factor Parameter*, mode pengarah yang menentukan seberapa baik penghuni dapat melewati orang lain di koridor yang ketat. Faktor ini ditentukan sebagai lebih besar dari 0 dan kurang atau sama dengan 1 ($0 < RF \leq 1$). Faktor ini dikalikan langsung dengan lebar bahu selama perhitungan, sehingga faktor pengurangan 0.5 akan menyebabkan penghuni mampu menekan hingga setengah bahu lebar jalur.
3. *Comfort Distance*, menentukan jarak yang diinginkan satu penghuni akan mencoba untuk mempertahankan seberapa dekat dengan orang lain seperti kondisi menunggu antrian.
4. *Persist Time*, jumlah waktu penghuni yang akan mempertahankan prioritas tinggi ketika mencoba menyelesaikan masalah gerakan.
5. *Collision Response Time*, ketika dikalikan dengan kecepatan penghuni akan mulai merekan biaya untuk tabraan dengan penghuni lain ketika kemudi.
6. *Slow Factor*, menentukan sebagian kecil dari kecepatan penghuni dimana mereka dianggap lambat. Penghuni yang lambat akan mempertimbangkan arah belakang untuk memisahkan diri dengan orang lain, sementara gerak penghuni lain cepat, ketat dan fokus arah jelas.

2.3.2 Pyrosim

Pyrosim adalah program yang menampilkan grafik dari perhitungan migrasi dan model CFD (*computational fluida dynamics*) (Thunderhead, 2022b) yang dapat memprediksi sifat api, pergerakan asap atau aliran udara panas, suhu, panas api, dan gas beracun hasil pembakaran

yang merupakan faktor yang mempengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi (Ramdani et al., 2020)



Gambar 13 Tampilan Contoh Hasil Kerja Software Pyrosim

Sumber: www.thunderheadeng.com

Simulasi menggunakan pyrosim menunjukkan hasil RSET, misalnya sebagai berikut (Sujatmiko et al., 2020):

1. Hubungan antara kecepatan angin dengan perkembangan api. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula api berkembang dan menyebabkan suhu maupun gas beracun pada kompartemen api mengalami kondisi yang tidak dapat dipertahankan dalam waktu singkat. Akibatnya proses evakuasi penghuni menjadi lebih lambat karena asap menyebar lebih cepat.
2. Hubungan kecepatan angin dengan arah pergerakan asap. Kecepatan angin yang rendah membuat asap bergerak secara vertikal melalui pintu atau jendela yang membuat asap lebih cepat menyebar dan memenuhi koridor lantai lain terutama lantai di atasnya. Sedangkan ketika kecepatan angin tinggi, asap bergerak secara horizontal, hasilnya asap mudah menyebar dan memenuhi koridor pada lantai tersebut