

Bab II Tinjauan Pustaka

II.1 Risiko Kebakaran

Risiko adalah potensi konsekuensi yang merugikan bagi kehidupan manusia, kesehatan, properti atau lingkungan. Perkiraan risiko didasarkan pada kemungkinan kondisi yang terjadi pada sebuah kejadian. Risiko kebakaran dapat dilihat sebagai kemungkinan bahaya kebakaran yang tidak diinginkan dalam situasi yang tidak menentu, dengan terdapat kemungkinan kerugian atau kerusakan berupa nyawa, properti, bisnis, warisan, maupun lingkungan.

II.1.1 Penyebab Kebakaran

Kebakaran terjadi karena adanya gabungan unsur pembentuk api yang membentuk rekasi rantai kimia. Kebakaran dapat dihentikan dengan menghilangkan salah satu unsur pembentuk api, sehingga proses pembakaran berhenti. Unsur pembentuk api terdiri dari:

a. Bahan bakar (*fuel*)

Bahan bakar merupakan bahan atau benda yang dapat terbakar. Terdapat tiga bentuk bahan bakar yaitu padat (kayu, kertas, kapas, dan lain-lain), cair (bensin, solar, minyak tanah, dan lain-lain), dan gas (LPG, LNG, karbit, dan lain-lain). Dalam sebuah bangunan, bahan bakar dapat ditemukan baik yang *moveable* seperti furnitur ataupun *fixed* seperti material dan bagian bangunan.

b. Panas (*heat*)

Penyalaaan sebuah benda disebabkan oleh tercapainya temperatur bakar akibat panas melalui perpindahan panas (*heat transfer*) dari sumber panas. Sumber panas pada bangunan dapat berupa percikan api, bunga api, gesekan, busur api las, listrik statis, faktor alam dan lain-lain. Panas dapat berpindah dari sumbernya ke benda lain dengan beberapa cara, yaitu (1) konduksi, (2) konveksi, dan (3) radiasi.

Konduksi adalah perpindahan panas pada benda solid ketika salah satu bagian dari sebuah objek dipanaskan. Kecepatan transfer energi dari area panas ke area yang

lebih dingin tergantung pada perbedaan suhu dan properti termal dari material. Properti termal yang berpengaruh antara lain adalah konduktivitas termal, kepadatan, dan *specific heat*. Konduktivitas termal adalah ukuran panas yang bisa berpindah melintasi area dengan perbedaan temperatur [W/(m.K)]. Material dengan nilai konduktivitas termal yang tinggi akan memiliki laju perpindahan panas yang semakin cepat. *Specific heat* adalah ukuran jumlah kalor yang dibutuhkan untuk mengubah satu derajat temperatur dari satu satuan massa material [kJ/(kg.K)]. Material dengan nilai *specific heat* yang tinggi memerlukan lebih banyak energi untuk menaikkan temperatur dari material dengan nilai *specific heat* rendah. Kepadatan (*density*) adalah ekspresi kuantitatif dari jumlah massa yang terkandung per satuan volume [kg/m³]. Material dengan kepadatan tinggi memiliki laju perpindahan panas lebih cepat dibanding dengan material dengan kepadatan rendah. Ketiga sifat di atas berperan selama tahap pertumbuhan api dan biasa disebut dengan *thermal inertia* (Persamaan II.1). Semakin rendah nilai *thermal inertia* suatu material, semakin cepat suhu permukaan akan naik.

$$I = \sqrt{k \rho c} \quad (\text{II.1})$$

Keterangan:

I = *thermal inertia* [J/(m².k.√s)]
 k = konduktivitas termal [W/(m.K)]
 ρ = kepadatan (*density*) [kg/m³]
 c = *specific heat* [kJ/(kg.K)]

Konveksi adalah transfer energi panas oleh pergerakan cairan atau gas panas dari sumber panas ke bagian yang lebih dingin. Panas ditransfer melalui konveksi pada benda solid saat gas panas melewati permukaan yang lebih dingin. Laju perpindahan panas ke benda solid dengan konveksi ditentukan oleh perbedaan suhu, luas permukaan yang terkena gas panas, dan kecepatan dari gas panas. Konveksi memiliki peran utama penyebaran panas saat gas panas dari api bergerak ke atas ruang dan menyebar ke seluruh bangunan.

Radiasi adalah transfer energi panas dari permukaan yang panas ke permukaan dingin oleh gelombang elektromagnetik tanpa media intervensi. Panas dari api ditransfer secara langsung dari sumber objek dan diserap oleh benda-benda lebih

dingin, termasuk cairan dan gas. Saat api sudah mencapai pembakaran penuh pada ruangan, radiasi menjadi cara perpindahan panas paling dominan.

c. Oksigen

Kandungan oksigen dalam udara bebas mencapai kurang lebih 21%. Pada kadar oksigen 21%, manusia dapat bernapas normal dan api akan semakin membesar. Pada kadar oksigen 18% manusia dalam posisi pingsan atau lemas sedangkan api akan mengecil. Pada kadar oksigen 15% manusia sudah gagal pernapasan atau tidak dapat hidup sedangkan api sudah padam. Dapat disimpulkan bahwa minimal kadar oksigen di udara supaya api tetap menyala adalah 16%.

II.1.2 Produk Kebakaran

Kebakaran menghasilkan produk termal dan produk non termal. Produk termal terdiri dari nyala api (*flame*) dan panas (*heat*) sedangkan produk non termal terdiri dari asap (*smoke*) dan gas (*gases*). Produk non-termal berupa asap serta kandungan gas beracun merupakan penyebab utama kematian manusia dalam kebakaran bangunan (75%). Produk kebakaran akan menimbulkan risiko bagi keselamatan bangunan serta penghuni.

a. Api (*flame*) dan panas (*heat*)

Panas ditimbulkan oleh api dalam sebuah peristiwa kebakaran. Seseorang yang terpapar panas berlebihan dalam kebakaran dapat mengalami *hyperthermia*, kulit terbakar, dan kerusakan saluran pernapasan. Selain akibat yang dapat menimbulkan bahaya bagi manusia, api dan panas memberikan bahaya bagi bangunan. Panas dapat menyebar secara konduksi, konveksi dan radiasi, sehingga membuat api menyebar pada bagian bangunan lain yang apabila tidak segera dihentikan, akan terjadi kebakaran yang besar dan bangunan akan rusak atau hancur.

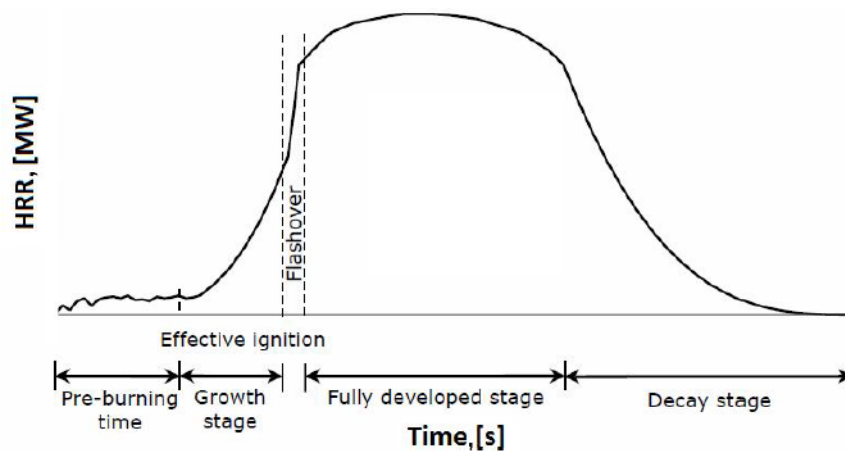
b. Asap (*smoke*) dan gas (*gases*)

Asap merupakan produk kebakaran yang mengandung uap panas, gas, dan partikel padat. Kepadatan asap yang lebih rendah dari udara disekitarnya

mengakibatkan pergerakan ke atas sehingga udara di sekitar akan terbawa ke atas. Kecepatan penyebaran asap yang lebih tinggi daripada penyebaran api membuat asap dan gas beracun menjadi penyebab utama kematian dalam peristiwa kebakaran.

II.1.3 Tahap Perkembangan Api

Terdapat empat tahap perkembangan api, yaitu tahap penyalaan / pra-pembakaran (*pre-burning*), tahap pertumbuhan (*growth*), tahap pembakaran penuh (*fully developed*) dan tahap surut (*decay*) (Grigoras dan Sotropa, 2013). Grafik tahap perkembangan api dapat dilihat pada Gambar II.1.



Gambar II.1 Grafik tahap perkembangan api
Sumber: Grigoras dan Sotropa, 2013

Flashover bukan merupakan suatu tahapan dalam perkembangan api, tetapi sebuah transisi cepat antara tahap pertumbuhan dengan tahap pembakaran penuh. Tidak semua peristiwa kebakaran mencapai keempat tahap tersebut. Dalam perkembangannya, tahapan kebakaran tergantung kepada unsur api dan tindakan yang dilakukan manusia dalam mencegah penyebaran kebakaran tersebut. Tahapan perkembangan api dijelaskan sebagai berikut:

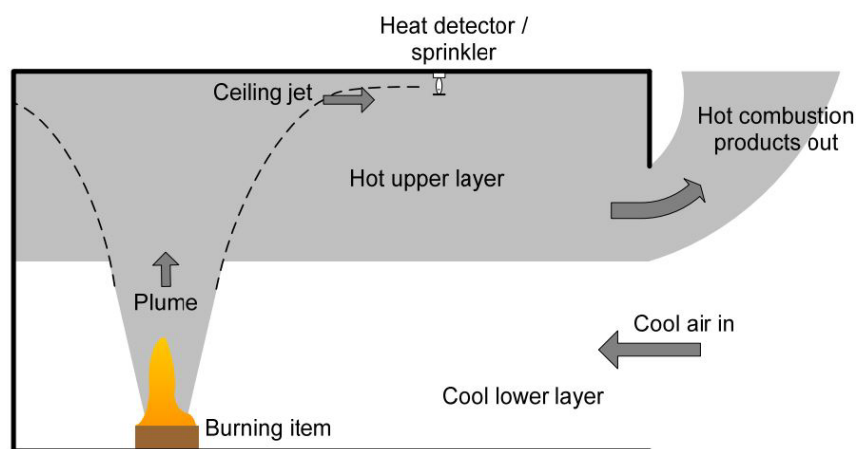
a. Tahap penyalaan / pra-pembakaran (*pre-burning*)

Tahap pertama dimulai dari kombinasi unsur api (bahan bakar, panas, dan oksigen) yang menimbulkan reaksi kimia dan membentuk api. Menyadari

keberadaan api pada tahap ini memberikan kesempatan terbaik dalam pemadaman. Akan tetapi sering kali karena gejala yang ditimbulkan masih relatif kecil, kejadian pada tahap ini sering kali tidak diketahui.

b. Tahap pertumbuhan (*growth*)

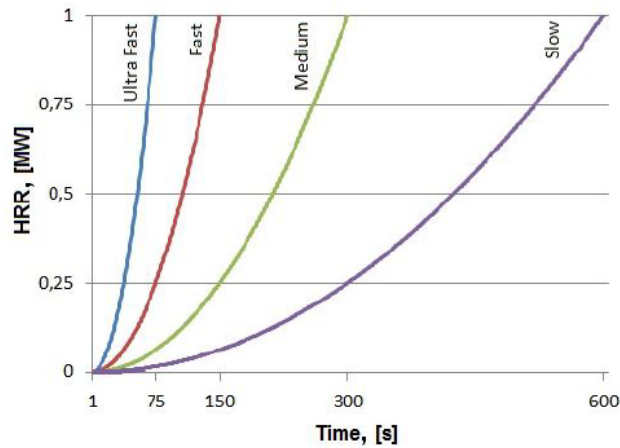
Tahap pertumbuhan terjadi ketika struktur beban api dan oksigen digunakan sebagai bahan bakar. Selama tahap pertumbuhan, asap pada ruang terbentuk menjadi dua lapisan, yaitu lapisan atas yang panas (*hot upper layer*) dan lapisan bawah yang lebih dingin (*cool lower layer*) (Gambar II.2). Saat api mencapai langit-langit, gas panas akan bergerak radial di bawah langit-langit menjauhi api, aliran gas panas ini dikenal sebagai *ceiling jet*. Temperatur *ceiling jet* mempengaruhi pengoperasian sistem proteksi aktif pada bangunan seperti sistem deteksi dan sistem pemadam otomatis. Temperatur dan kecepatan *ceiling jet* dipengaruhi beberapa faktor, yaitu ukuran api, ketinggian langit-langit, dan jarak radial dari pusat api (Alpert, 2002).



Gambar II.2 Perkembangan kebakaran dalam ruang
Sumber: Wade, Spearpoint, Bittern dan Tsai, 2007

Menurut NFPA 72 yang dikutip oleh Flischmann (2009), terdapat 4 kategori tahap pertumbuhan yaitu pertumbuhan api lambat, sedang/medium, cepat, dan ultra cepat (Gambar II.3). Definisi ini ditentukan oleh waktu yang dibutuhkan kebakaran untuk mencapai 1055 kW, yang ditunjukkan oleh Tabel II.1. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi tahap pertumbuhan, yaitu lokasi sumber

penyalaan, jumlah dan jenis bahan bakar yang terdapat di sekitarnya, dan geometri ruang.



Gambar II.3 Laju pelepasan kalor untuk api t^2
 Sumber: Grigoros dan Sotropa, 2013

Tabel II.1 Kategori Tahap Pertumbuhan
 Sumber: Flischmann, 2009

Klasifikasi	Waktu Pertumbuhan (detik) Waktu mencapai 1055 kW	Laju Pelepasan Panas (kW/s ²)
Lambat	600	0,00293
Sedang	300	0,01172
Cepat	150	0,0469
Ultra Cepat	75	0,1876

Flashover dapat dianggap sebagai transisi yang terjadi selama rentang waktu yang singkat dalam hitungan detik. *Flashover* terjadi ketika radiasi dari lapisan atas begitu kuat sehingga semua bahan mudah menyala kembali. *Flashover* terjadi ketika suhu lapisan atas mencapai 500 °C - 600°C. Peningkatan radiasi dari lapisan atas tidak hanya membakar semua bahan bakar di ruangan tetapi juga meningkatkan laju pelepasan panas dari semua benda yang terbakar. Sehingga pada tahap *flashover*, benda-benda yang sebelumnya terbakar sebagian, mendadak terbakar seluruhnya. Kecepatan pembakaran yang sangat cepat membuat api sudah sulit untuk dikendalikan.

Waktu untuk mencapai *flashover* sejak penyalaan dimulai tergantung dari ukuran ruang, jumlah beban api, dan ukuran bukaan. Akan tetapi terdapat beberapa literatur yang menyebutkan perkiraan waktu tercapainya *flashover* untuk kasus bangunan *residential*. Menurut Lentini dan Spaulding (2012), waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *flashover* pada ruang *residential* adalah tiga sampai lima menit. Menurut Waters (1999) ruang keluarga rata-rata membutuhkan waktu 3 menit 41 detik untuk mencapai *flashover* dan ruang tidur hanya membutuhkan waktu 2 menit 12 detik. Dapat disimpulkan bahwa pada ruang *residential*, *flashover* umumnya tercapai dalam waktu kurang dari lima menit.

c. Tahap pembakaran penuh (*fully developed*)

Tahap ini terjadi ketika tahap pertumbuhan telah mencapai titik maksimal dan seluruh bahan yang mudah terbakar (*combustible material*) telah menyala. Tahap ini merupakan tahap dengan temperatur paling tinggi (700 °C-1200 °C) dan tahap paling berbahaya. Pada tahap ini kebakaran dapat menimbulkan kerusakan pada komponen struktur bangunan sehingga dapat menyebabkan keruntuhan bangunan.

d. Tahap surut (*decay*)

Tahap ini biasanya merupakan tahap terpanjang dari tahap perkembangan api. Tahap surut ditandai dengan penurunan oksigen maupun bahan bakar yang signifikan dan berakhirnya api.

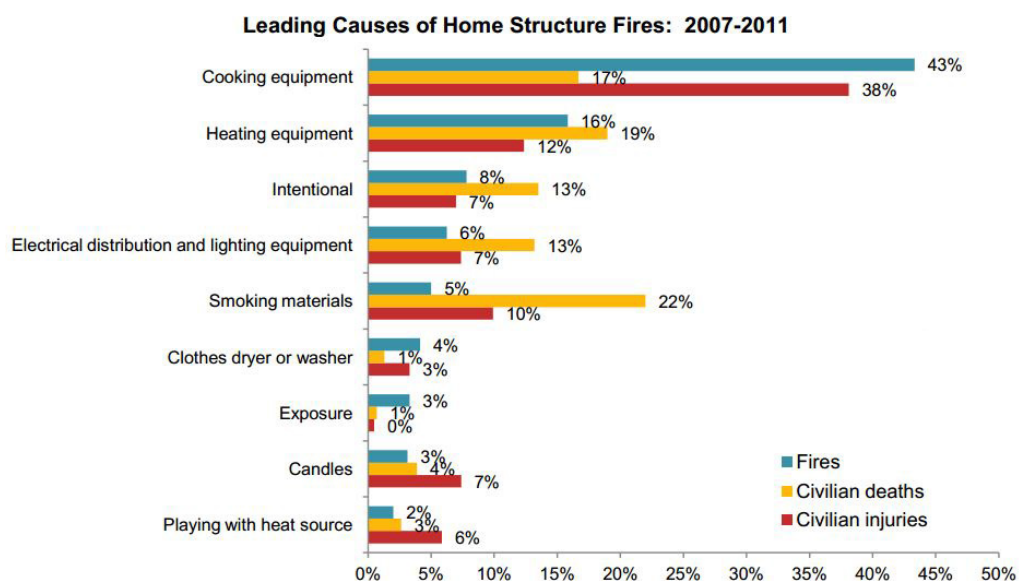
II.1.4 Statistik Kebakaran

Di Indonesia, pendataan kejadian kebakaran permukiman dilakukan oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). Akan tetapi hingga saat ini belum ada data statistik kebakaran yang membahas spesifik mengenai kejadian pada bangunan cagar budaya. Data yang ditampilkan dalam situs BNPB juga belum maksimal: tidak semua penyebab utama kebakaran diketahui dan tidak ada data mengenai ruang asal api dimulai. Menurut data BNPB (2015), dari Agustus 2011 hingga Maret 2015 terdapat 960 kejadian kebakaran permukiman di Indonesia. Penyebab kebakaran paling banyak terjadi karena hubungan arus pendek listrik (66,9%), kompor dan tabung gas (4,3%), pembakaran sampah (1,8%), lilin

(1,1%), rokok (1,0%), lain-lain (4,5%), sedangkan 20,4% belum memiliki keterangan dan masih dalam penyelidikan pihak berwajib.

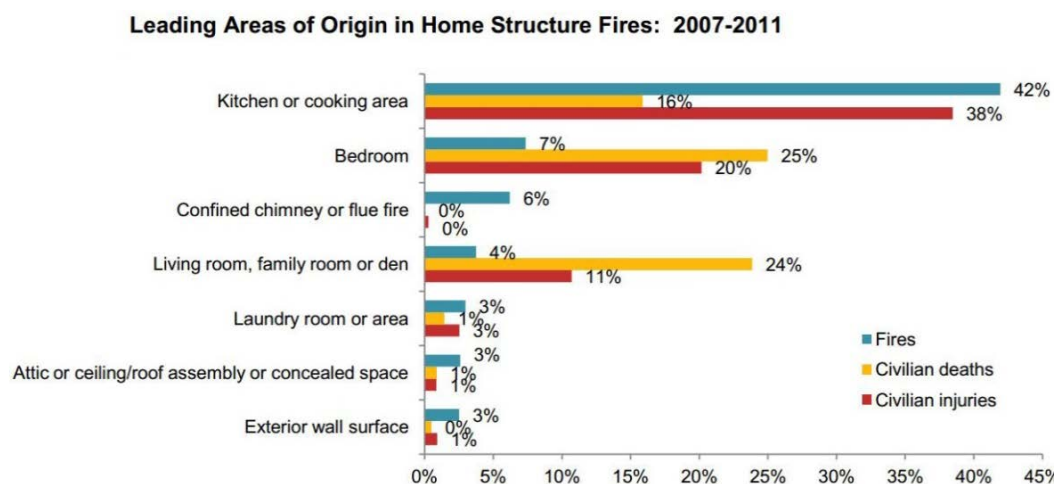
Di negara-negara maju, pengumpulan data dan statistik kebakaran telah menjadi perhatian dan telah dikumpulkan selama bertahun-tahun. Data statistik digunakan untuk dievaluasi setiap tahun sehingga dapat memperbaiki regulasi dan digunakan untuk mewadahi perusahaan asuransi. Beberapa negara yang memiliki data statistik kebakaran yang lengkap adalah Amerika dan Inggris. Data statistik kebakaran Amerika dilakukan oleh NFPA dan dapat dengan mudah diakses di situsnya. Sedangkan Inggris memiliki statistik yang diperbaharui tiap tahunnya oleh Department for Communities and Local Government.

Menurut data statistik dari NFPA, 76,7% kebakaran terjadi pada bangunan hunian, sedangkan sisanya pada bangunan non-hunian. U.S. Fire Departments menangani rata-rata 366.000 kasus kebakaran rumah per tahun selama tahun 2007-2011. Menurut statistik, peralatan memasak adalah penyebab utama kebakaran diikuti peralatan pemanas di urutan kedua (Gambar II.4). Peralatan memasak yang dimaksud menyebabkan kebakaran adalah kompor (57%), oven atau alat panggang (16%), *microwave* (5%), *portable cooking* (4%), dan panggangan (2%).



Gambar II.4 Penyebab kebakaran hunian di Amerika tahun 2007–2011
Sumber: NFPA, 2013

Dua dari lima (42%) kebakaran dimulai dari dapur. Ruang asal api yang berasal dari kamar tidur hanya sebesar 7%, namun kebakaran ini menyebabkan 25% kematian dan 20% luka-luka. Kebakaran pada ruang tidur memberikan risiko dua kali lebih besar dari kebakaran ruang lain. Cerobong asap merupakan ruang asal api terbanyak ketiga (6%) karena statistik dilakukan di negara yang memiliki iklim empat musim. Ruang lain yang paling banyak menjadi ruang asal api adalah ruang keluarga (4%), ruang laundry (3%), atap (3%) dan permukaan eksterior (3%) (Gambar II.5).



Gambar II.5 Ruang asal api pada kebakaran hunian di Amerika tahun 2007–2011
Sumber: NFPA, 2013

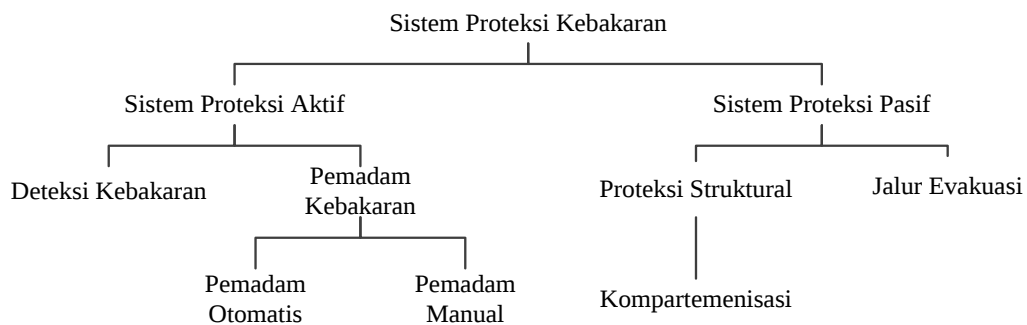
II.2 Konsep Perlindungan Bangunan

II.2.1 Sistem Proteksi

Sistem proteksi kebakaran pada bangunan dibagi menjadi sistem proteksi aktif dan pasif (Gambar II.6). Sistem proteksi pasif adalah bagian dari bangunan yang dapat meminimalkan bahaya kebakaran pada bangunan dan memungkinkan penghuni mempunyai cukup waktu untuk menyelamatkan diri ke tempat yang aman. Sedangkan sistem proteksi aktif adalah sistem yang terpisah dari bagian bangunan yang dapat mengurangi risiko kebakaran, sistem ini bekerja ketika kebakaran mulai terjadi.

Dalam memasang sistem proteksi kebakaran pada bangunan cagar budaya, rentan terjadi kerusakan yang disebabkan oleh kurangnya pemahaman bagaimana desain

instalasi proteksi kebakaran harus dapat sejalan dengan signifikansi budaya dan karakteristik yang berbeda pada bangunan cagar budaya. Desain proteksi kebakaran pada bangunan cagar budaya harus dirancang dengan pendekatan berbasis kinerja sesuai dengan karakter bangunan masing-masing agar menghindari kerusakan pada material atau kualitas dari karakter bersejarah bangunan.



Gambar II.6 Pembagian sistem proteksi kebakaran
Sumber: TAN 22, 2001

Terdapat beberapa prinsip pemasangan sistem proteksi pada bangunan cagar budaya menurut TAN 22, Fire Risk Management in Heritage Buildings (2001):

- Intervensi minimal, perubahan pada bangunan cagar budaya harus sedikit mungkin memberikan dampak pada bangunan dan elemennya.
- Reversibility*, perubahan pada bangunan cagar budaya seharusnya dapat dikembalikan dikemudian hari.
- Esensial, pekerjaan dilakukan untuk mencapai tujuan yang ditetapkan dan dibutuhkan berdasarkan penilaian risiko kebakaran.
- Sensitif, perangkat sistem proteksi kebakaran harus dipasang dengan pertimbangan karena berdampak pada penampilan bangunan secara keseluruhan.
- Tepat, langkah perlindungan proteksi kebakaran harus sesuai dengan tingkat risikonya.
- Mematuhi hukum, langkah proteksi kebakaran yang diwajibkan oleh hukum tidak mengesampingkan hukum lainnya (persetujuan bangunan, izin perencanaan)

1. Sistem Deteksi dan Alarm pada Bangunan cagar budaya

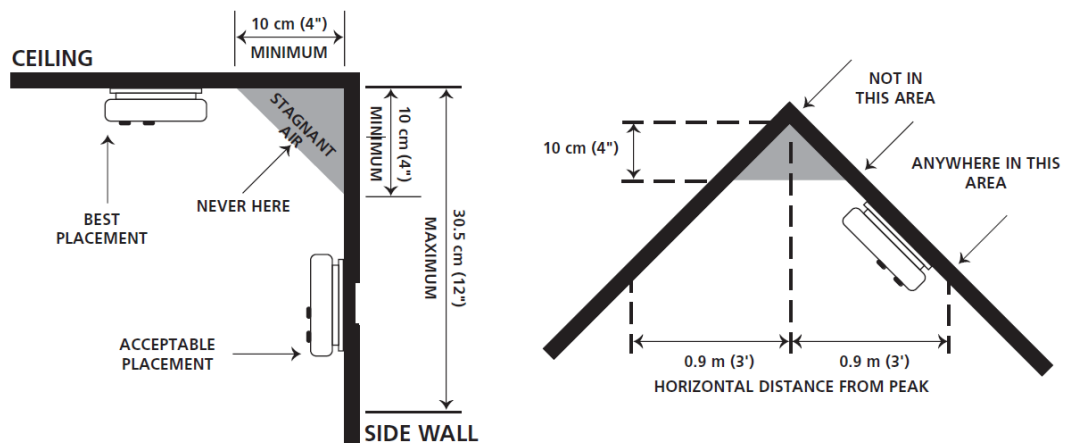
Menurut CFPA-E Guideline No.30 (2013), toilet dan ruang yang berpenghuni pada bangunan cagar budaya dengan pintu tertutup serta perlu melewati koridor atau beberapa ruang lain untuk mencapai jalan keluar, harus dilengkapi dengan alarm yang secara otomatis dipicu oleh sistem deteksi. Secara umum, sistem alarm terdiri dari dua jenis, yaitu sistem alarm kebakaran manual serta sistem alarm kebakaran otomatis.

Sistem alarm kebakaran manual terdiri dari beberapa komponen, yaitu panel alarm, titik panggil manual (*manual call point*) dan signal alarm. Titik panggil manual berbentuk kotak berwarna merah yang dilengkapi dengan kaca pada bagian depan. Titik panggil manual harus diletakan pada lokasi yang mudah dilihat seperti lintasan menuju ke luar dengan ketinggian 1,4 m diatas lantai (SNI 03-3985-2000). Alarm kebakaran manual memungkinkan orang yang menemukan api untuk segera membunyikan alarm dan memperingatkan penghuni lainnya bahwa terjadi kebakaran. Titik panggil manual sebaiknya ada di setiap lantai pada bangunan bertingkat.

Sistem alarm kebakaran otomatis membunyikan alarm dengan adanya sensor dari sistem deteksi. Terdapat berbagai macam sistem deteksi kebakaran yang dapat mendeteksi produk kebakaran seperti asap, panas, cahaya, suara, dan gas. Akan tetapi sistem deteksi asap (*smoke detector*) paling umum digunakan karena dapat mendeteksi kebakaran dari tahap paling awal. Terdapat dua jenis detektor asap yaitu jenis *photoelectric* dan *ionization*. Tipe detektor *photoelectric* bereaksi lebih cepat pada kebakaran yang membara (*smoldering fires*), biasanya kebakaran yang melibatkan furnitur *upholstered*, matras, dan kasur. Sedangkan detektor *ionization* bereaksi lebih cepat terhadap kebakaran yang menyala (*flaming fires*), biasanya kebakaran yang melibatkan kertas atau cairan mudah terbakar. Di samping itu, terdapat tipe detektor asap dual *ionization/photoelectric* namun dengan harga yang lebih mahal. Tipe detektor asap dapat berbeda-beda pada tiap ruang disesuaikan dengan konstruksi dan furnitur pada bangunan.

Terdapat dua jenis sistem deteksi asap dan alarm kebakaran otomatis berdasarkan cara kerjanya, yaitu *smoke detector* dan *smoke alarm*. *Smoke detector* hanya memiliki sensor *built-in* dan merupakan dari sebuah sistem. Untuk membunyikan alarm, *smoke detector* memerlukan perangkat eksternal berupa *sounding audible device* dan komponen kontrol seperti panel alarm kebakaran. Sedangkan *smoke alarm* merupakan perangkat tunggal yang dilengkapi dengan *audibel sounder*, komponen kontrol (baterai atau listrik) dan sensor. *Smoke alarm* tidak terhubung dengan panel kontrol alarm kebakaran (Oster, 2008). Kedua instalasi ini memiliki persamaan dalam persyaratan luas cakupan dan persyaratan lokasi.

Sistem *smoke alarm* saat ini juga memungkinkan dengan sistem *wireless* atau menggunakan baterai sehingga tidak memerlukan pemasangan kabel. Ketika satu alarm berbunyi, semua alarm akan berbunyi. Satu alarm asap dapat digunakan untuk melindungi ruangan dengan luas 83,6 m². Alarm dapat dipasang di langit-langit atau di dinding. Alarm yang dipasang di langit-langit harus memiliki jarak minimal 10 cm dari dinding. Alarm yang dipasang di dinding harus memiliki jarak minimal 10 cm dan maksimal 30,5 cm di bawah langit- langit. Alarm yang di pasang di ruang bawah atap harus memiliki jarak maksimal 0,9 m dari ujung atap diukur secara horizontal (Gambar II.7).



Gambar II.7 Syarat lokasi *smoke detector* dan *smoke alarm*
 Sumber: www.systemsensor.com, diunduh 6 November 2014

Pemasangan sistem deteksi dan alarm pada bangunan cagar budaya harus memperhatikan dampaknya pada bangunan. Ketika detektor tidak dapat diposisikan sesuai dengan standar yang ditetapkan, (SNI 03-3985-2000), detektor dapat diposisikan dengan pendekatan yang lebih fleksibel dengan harapan dapat memberikan tingkat cakupan yang masih dapat diterima. Misalnya posisi detektor dapat disesuaikan ketika menghindari kerusakan pada langit-langit yang berpola (Gambar II.8).



Gambar II.8 Detektor pada bangunan cagar budaya dengan langit-langit berpola
Sumber: Coull, 2013

2. Sistem Pemadam Manual pada Bangunan cagar budaya

Alat Pemadam Api Ringan (APAR) adalah sistem pemadam manual yang digunakan di dalam bangunan. Jenis APAR yang digunakan harus sesuai dengan klasifikasi bahaya kebakaran yang ada: kebakaran kelas A, B, C, D, atau K (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 26/PRT/M/2008). Kebakaran kelas A adalah kebakaran karena benda-benda padat selain logam seperti kayu, kertas, kain, dan lain-lain. Kebakaran kelas B adalah kebakaran karena bahan bakar cair atau gas yang mudah terbakar seperti kerosine, solar, bensin, LPG. Kebakaran kelas C adalah kebakaran karena instalasi listrik bertegangan seperti sakelar listrik. Kebakaran kelas D adalah kebakaran karena benda-benda logam seperti magnesium, aluminium, dan lain-lain. Kebakaran kelas K adalah kebakaran karena konsentrasi lemak yang tinggi, biasanya kebakaran ini terjadi di dapur.

Terdapat beberapa jenis APAR, yaitu APAR air, tepung kimia, busa, dan CO₂. APAR jenis air (*water fire extinguisher*) digunakan untuk kebakaran kelas A, merupakan yang paling murah dan umum digunakan. APAR jenis tepung kimia (*dry chemical powder*) digunakan untuk kebakaran kelas A, B, dan C. APAR jenis busa (*foam fire extinguisher*) digunakan untuk kebakaran kelas A dan B. APAR jenis CO₂ digunakan untuk kebakaran kelas B dan peralatan berlistrik. Tata cara pemasangan APAR secara umum diatur dalam SNI 03-3987-1995. Secara umum sistem APAR harus diletakan pada lokasi yang mudah ditemukan, mudah dijangkau dan mudah diambil. Jarak antar APAR tidak lebih dari 23 m (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 26/PRT/M/2008).

3. Sistem Pemadam Otomatis pada Bangunan cagar budaya

Survey Fire Protection Association (FPA) menunjukkan bahwa 74% kebakaran terjadi pada malam hari, saat tidak ada orang yang dapat mendeteksi dan melawan api (TAN 14, 1998). Sistem pemadam otomatis dapat mendeteksi keberadaan kebakaran dan mengurangi tingkat kerusakan. Terdapat beberapa sistem pemadam otomatis yang tersedia, yaitu *foam system*, *gas system*, dan *water based system* (sprinkler). Jenis sistem yang dipakai, ditentukan dari jenis bahaya kebakaran yang mungkin muncul pada suatu bangunan.

Foam system digunakan untuk melindungi risiko yang melibatkan ruang penyimpanan dan cairan yang mudah terbakar. *Foam system* biasanya digunakan untuk perlindungan tangki penyimpanan, gudang penyimpanan cairan yang mudah terbakar, hanggar pesawat, *heliports*, dan area *truck loading*. *Gas system* digunakan untuk melindungi aset bernilai tinggi seperti ruang server komputer, ruang kontrol PLC, dan penyimpanan artefak di mana tingkat proteksi kebakaran yang tinggi diperlukan dan penggunaan air atau *foam* dapat merusak benda yang dilindungi. Terdapat beberapa macam gas yang digunakan antara lain Proinert™, NOVEC™ 1230, HFC-227ea (FM200®), dan Carbon Dioxide (CO₂).

Sistem pemadam otomatis yang paling umum dan sering digunakan adalah sistem sprinkler. Terdapat beberapa tipe sprinkler berdasarkan cara kerjanya, yaitu *wet*

pipe system, *dry pipe system* dan *deluge system*. *Wet pipe system* digunakan di gedung-gedung yang tidak akan bermasalah apabila tersiram oleh air. Pada sistem ini, saat terjadi kebakaran dan tingkat panas mencapai titik pecah *bulb sprinkler*, pipa yang telah terisi dengan air akan langsung mengeluarkan air tersebut. *Dry pipe system* biasa digunakan pada tempat yang memiliki suhu rendah di mana *wet pipe system* tidak dapat digunakan karena air di dalam pipa akan membeku. *Deluge system* digunakan untuk perlindungan tempat dengan risiko kebakaran berat seperti tempat penimbunan bahan bakar. Sistem ini tidak menunggu *bulb sprinkler* untuk pecah. Saat alarm berbunyi, air dengan cepat mengisi saluran dan keluar melewati sprinkler yang terpasang.

Sistem sprinkler berdasarkan spesifikasinya dapat dibagi menjadi *standard sprinkler* dan *residential sprinkler*. *Standard sprinkler* umumnya digunakan pada bangunan industrial dan komersial. *Residential sprinkler* dioptimalkan untuk bangunan hunian dibawah empat lantai dalam upaya meningkatkan kemudahan instalasi dan mengurangi biaya instalasi, namun tetap menjaga keselamatan bangunan dari bahaya kebakaran. Pola distribusi air *residential sprinkler* dirancang agar satu ruang dapat dikendalikan dengan satu sprinkler, tidak bergantung pada pola *overlapping* seperti *standard sprinkler* di bangunan luas. *Residential sprinkler* dibuat lebih sensitif terhadap panas dan membutuhkan pasokan air yang lebih sedikit dari sprinkler standar. Hal ini dikarenakan pasokan air pada bangunan perumahan tidak sebanyak bangunan industrial atau komersial. Dalam NFPA 13D and NFPA 13R: Automatic Sprinkler Systems for Residential Occupancies Handbook (2013), jarak antar sprinkler dan jarak maksimum ke dinding ditentukan oleh produsen yang telah diverifikasi oleh *listing laboratory*.

Terdapat beberapa spesifikasi yang mempengaruhi kinerja sprinkler, antara lain RTI, *c-factor*, temperatur aktivasi, *k-factor*, laju air, dan tekanan. RTI (*Response Time Index*) adalah ukuran sensitivitas termal sprinkler yang mempengaruhi respon sprinkler terhadap aliran udara panas [$\sqrt{m.s}$]. *C-factor* (*conductivity*) adalah ukuran konduktansi antara elemen responsif panas pada sprinkler dan komponen lain pada sprinkler [$\sqrt{m/s}$]. Temperatur aktivasi adalah nilai

temperatur yang menyebabkan *bulb sprinkler* pecah dan sistem sprinkler mulai bekerja. *K-factor (discharge coefficient)* merupakan konstanta yang ditetapkan oleh produsen yang berhubungan dengan laju air yang bisa diharapkan dari sprinkler pada tekanan tertentu. Hubungan antara k-factor, aliran air, dan tekanan dapat dilihat pada Persamaan II.2.

$$Q = K\sqrt{P} \quad (\text{II.2})$$

Keterangan:

Q = laju air (*flow rate*) [L/menit]

K = *k-factor* [L/(min.atm^{1:2})]

P = tekanan (*pressure*) [atm]

Terdapat penelitian yang dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem sprinkler dan sistem berbasis gas FM-200 (Forssell dan Robin, 2007). FM-200 umumnya digunakan untuk memadamkan kebakaran di ruang komputer, museum, situs bersejarah, dan perpustakaan. FM-200 menggunakan CF_3CHF_2 , senyawa aktif yang digunakan sebagai propelan dalam inhaler medis, sehingga FM-200 aman untuk penghuni. Tidak seperti air yang melakukan pemadaman dengan pendinginan, FM-200 memadamkan api dengan menghentikan reaksi kimia yang terjadi antara sumber panas, bahan bakar, dan oksigen.

Tes dilakukan pada ruang telekomunikasi dengan ukuran 10 x 10 x 3,7 m. Hasil tes yang diperoleh menunjukkan perbedaan dalam kedua sistem pemadam tersebut (Tabel II.2). FM-200 dapat mendeteksi api 78 detik setelah penyalaan, 30 detik setelahnya memulai aktivasi, dan memadamkan api pada detik ke 125. Akan tetapi beberapa langit-langit terlepas setelah menggunakan sistem FM-200. Kemungkinan penyebabnya adalah tingginya tekanan gas dan terlalu dekatnya jarak *nozzle* dengan langit-langit. Sistem sprinkler tidak menimbulkan kerusakan struktural setelahnya, namun tidak berhasil memadamkan api dan air serta meninggalkan sisa residu yang perlu dibersihkan setelah pemadaman.

Tabel II.2 Perbandingan Hasil Tes Sprinkler dan FM-200
Sumber: Forssell dan Robin, 2006

	Sistem Sprinkler	Sistem FM-200
Waktu deteksi (detik sejak penyalaan)	94 s (<i>photoelectric</i>) 112 s (<i>ionization</i>)	78 s
Aktivasi sistem (detik sejak penyalaan)	Timur laut: 273 s Timur: 347 s	108 s
Pemadaman api (detik sejak aktivasi)	Tidak padam	125 s
Ukuran api saat aktivasi	Timur laut: 200 kW Timur: 350 kW	25 kW
Suhu <i>ceiling jet</i> saat aktivasi	> 121 °C	24 °C
Suhu maksimum langit-langit	293 °C	82 °C
Kerusakan karena asap	Ada	Tidak ada
Kerusakan karena air	Ada	Tidak ada

Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa diperlukan kombinasi antara kedua sistem untuk mendapatkan hasil optimal. Sistem sprinkler tidak cocok untuk perlindungan aset yang dapat rusak terhadap air dan asap. Sistem gas tidak cocok untuk perlindungan terhadap struktur, namun efektif untuk melindungi aset berharga karena lebih sensitif, cepat memadamkan api, dan tidak meninggalkan residu (Tabel II.3). Menurut Artim dan Watts (n.d.), sistem gas bekerja efektif pada ruang asal api dan ruang yang tertutup rapat sehingga gas tidak akan keluar dari ruang. Sistem gas hanya direkomendasikan untuk situasi tertentu dan tidak dianjurkan untuk digunakan diseluruh bangunan.

Tabel II.3 Perbandingan Sistem Sprinkler dan Sistem FM-200
Sumber: Forssell dan Robin, 2006

	Sistem Sprinkler	Sistem FM-200
Agen pemadam	Air	Gas
Tujuan desain	Kontrol api: membatasi kebakaran dan kontrol suhu langit - langit	Pemadaman api
Aktivasi	Kepala sprinkler T > 57 °C	Aktivasi otomatis mengikuti deteksi
Ukuran api saat aktivasi	Dapat 100 kW	Di bawah 0.1 kW dengan <i>air sampling detection system</i>
<i>Total flooding</i>	Tidak, air tidak tiga dimensi sehingga tidak akan mengisi seluruh permukaan	Ya, gas akan terdistribusi merata ke seluruh permukaan

Kebersihan	Tidak bersih, air dapat juga merusak	Bersih, tidak meninggalkan residu yang harus dibersihkan setelah pemadaman
Proteksi	Proteksi terhadap struktur, tidak pada isi ruangan	Perlindungan pada isi ruangan, tidak pada struktur
Harga	Rendah	Tinggi

Tata cara dalam perencanaan dan pemasangan sistem sprinkler otomatis dalam bangunan diatur dalam SNI 03-3989-2000, namun dalam bangunan cagar budaya, sistem pemadam otomatis harus terintegrasi, tidak merusak bangunan, dan bersifat *reversible*. Komponen sistem sprinkler terdiri dari sistem pipa dan kepala sprinkler (*sprinkler head*). Setiap rancangan komponen sistem sprinkler pada bangunan cagar budaya harus dirancang unik sesuai dengan signifikansi bangunan. Terdapat tiga macam pendekatan dalam penempatan komponen sprinkler, yaitu pendekatan ekspos, pendekatan kamufase, dan pendekatan *concealed* (sembunyi).

Dalam pendekatan ekspos, kepala dan pipa sprinkler tidak disembunyikan atau disamarkan. Pendekatan ini merupakan pendekatan yang paling murah karena membutuhkan paling sedikit pemotongan, penambalan, dan *refinish*. Biasanya pendekatan ekspos digunakan di ruang bawah tanah, loteng atau ruang sekunder di mana penampilan tidak terlalu penting. Akan tetapi pendekatan ini jarang direkomendasikan untuk kasus bangunan cagar budaya kecuali risiko pemotongan melebihi risiko dampak visual. Terdapat contoh bangunan cagar budaya yang menggunakan pendekatan ekspos antara lain AVA Gallery, New Hampshire (Gambar II.9) dan Frödinge Church, Swedia (Gambar II.10). Untuk ruang bawah atap, sprinkler dapat diletakkan di kuda-kuda atau gording. Dalam pendekatan ekspos umumnya sprinkler digantung atau dipasang menggunakan gantungan *band hanger* seperti Gambar II.9 atau *pipe strap* seperti Gambar II.10. Pemasangan sprinkler pada struktur utama seperti kuda-kuda dapat menggunakan tambahan *wood blocking* apabila pemasangan langsung dikhawatirkan mengganggu integritas struktural.



Gambar II.9 Sprinkler di AVA Gallery, New Hampshire
 Sumber: www.ironworksfire.com, diunduh 11 November 2014



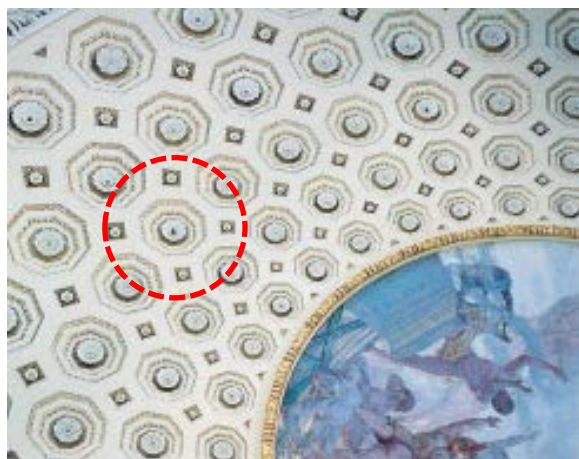
Gambar II.10 Pemasangan *nozzle* pada atap di Frödinge Church, Swedia
 Sumber: Arvidson, 2006

Pendekatan kedua adalah pendekatan kamuflase, dalam pendekatan ini pipa sprinkler juga di ekspos untuk menghindari pemotongan dan penambalan. Akan tetapi agar tidak mencolok, pipa dicat sesuai dengan warna latar belakang dinding atau langit-langit, selain itu warna kepala sprinkler juga disesuaikan. Saat ini kepala sprinkler telah diproduksi dalam berbagai macam warna untuk pertimbangan estetika. Terdapat contoh bangunan cagar budaya yang menggunakan pendekatan kamuflase dalam sistem instalasi *sprinkler* yaitu Eno Memorial Hall, Connecticut (Gambar II.11).



Gambar II.11 Sprinkler di Eno Memorial Hall, Connecticut
Sumber: www.alfirect.com, diunduh 11 November 2014

Pendekatan ketiga adalah pendekatan *concealed*. Pendekatan *concealed* menyembunyikan komponen sprinkler sebanyak mungkin sehingga dapat meminimalkan dampak visual dalam ruang. Pendekatan ini merupakan pendekatan paling mahal karena membutuhkan banyak pemotongan serta perbaikan dari bangunan dan terkadang memerlukan tambahan sprinkler karena tidak selalu bisa menempatkan sprinkler pada posisi yang efektif. Pendekatan ini lebih baik dipasang hanya untuk ruangan yang memiliki dampak visual sangat tinggi terhadap pemasangan sprinkler. Terdapat contoh bangunan cagar budaya yang menggunakan pendekatan *concealed* dalam sistem instalasi sprinkler yaitu US Library of Congress (Gambar II.12).



Gambar II.12 *Sprinkler head* di US Library of Congress
Sumber: Gibbon, 2001

Ada beberapa pilihan pipa untuk sistem sprinkler pada bangunan cagar budaya antara lain tembaga, baja (galvanis atau non-galvanis), dan plastik. Pipa baja paling umum digunakan namun cenderung menimbulkan korosi dari waktu ke waktu. Tembaga lebih mahal dari baja namun relatif dapat berdiameter kecil sehingga sering menjadi pilihan untuk instalasi di bangunan besejarah. Pipa sprinkler plastik terdiri dari CPVC (*Chlorinated Poly Vinyl Chloride*) dan PEX (*Cross-linked Polyetheylene*). CPVC adalah pipa termoplastik, lebih murah dari tembaga dan baja dan tahan terhadap korosi. CPVC lebih mudah untuk dipasang di bangunan cagar budaya karena mudah untuk dipotong sehingga sering digunakan untuk alternatif dari pipa baja atau tembaga. PEX adalah pipa plastik yang fleksibel dan berdiameter kecil. PEX sangat murah dibanding dengan jenis lain namun tidak sesuai untuk instalasi dengan pendekatan ekspos dan kamuflase.

4. Sistem Pencahayaan dan Tanda Keluar pada Bangunan cagar budaya

Pencahayaan darurat disediakan untuk menerangi jalur keluar apabila pencahayaan utama pada sebuah bangunan padam. Syarat bangunan yang harus mempunyai pencahayaan darurat diatur dalam SNI 03-6574-2001. Secara umum kebutuhan pencahayaan darurat ditentukan oleh kebutuhan orang menemukan jalan keluar dalam kebakaran. Dalam kasus di mana sebuah bangunan hanya terbuka untuk umum pada siang hari, dimungkinkan untuk menyatakan bahwa pencahayaan darurat tidak diperlukan.

Keberadaan tanda keluar sangat penting dalam bangunan yang berisi penghuni yang tidak familiar dengan denah bangunan. Ukuran, pencahayaan dan lokasi pemasangan tanda keluar memiliki ketentuan yang diatur dalam SNI 03-6574-2001. Akan tetapi dalam kasus bangunan cagar budaya, dibutuhkan tampilan yang lebih fleksibel dalam menentukan posisi dari tanda keluar. Dibutuhkan sensitivitas terhadap interior bangunan dalam menentukan posisi tanda keluar. Apabila tanda keluar permanen terlalu memberi dampak pada signifikansi bangunan, dimungkinkan dalam melakukan pendekatan alternatif, misalnya penggunaan tanda keluar yang tidak permanen atau berupa *free standing sign* yang hanya dipasang ketika bangunan dibuka untuk umum (Gambar II.13).

Dibutuhkan penilaian apakah suatu bangunan cagar budaya benar-benar membutuhkan tanda keluar apabila terjadi kebakaran. Hal ini dapat dipertimbangkan berdasarkan luas bangunan, faktor elemen bangunan dan frekuensi keterbukaan bangunan untuk publik.



Gambar II.13 *Free standing sign*
Sumber: Coull, 2013

5. Kompartemenisasi pada Bangunan cagar budaya

Kompartemenisasi adalah usaha untuk mencegah penjararan kebakaran dengan cara membatasi api dengan dinding, lantai, kolom, balok yang tahan terhadap api untuk waktu yang sesuai dengan kelas bangunan. Sebuah tes kompartemen kebakaran yang dilakukan oleh BRE (Building Research Establishment) di Inggris menunjukkan bahwa kompartemenisasi, dengan menutup pintu dan bukaan tidak hanya mencegah kerusakan asap pada ruang asal api tapi juga mencegah api mencapai *flashover* pada ruang asal (Cooke, 2003). Pada bangunan cagar budaya, langkah kompartemenisasi memiliki risiko merusak integritas atau tampilan estetika bangunan sehingga perlu dirumuskan dengan cermat.

Cat *intumescent* atau juga sering disebut dengan *fire retardant* adalah cat yang dirancang khusus untuk memberikan perlindungan terhadap paparan panas ekstrim dari kebakaran. Cat *intumescent* dapat digunakan untuk melindungi berbagai material seperti lembaran logam, PVC, baja, kayu, batu bata dan lain-lain. Teknologi ini dapat menahan api mulai dari 30 menit hingga 90 menit.

Lapisan cat *intumescent* pada material yang terkena api akan membentuk lapisan busa isolasi dan menunda penyalaan pada material. Pada bangunan cagar budaya, cat *intumescent* harus dipastikan tidak merusak tekstur atau warna bangunan.

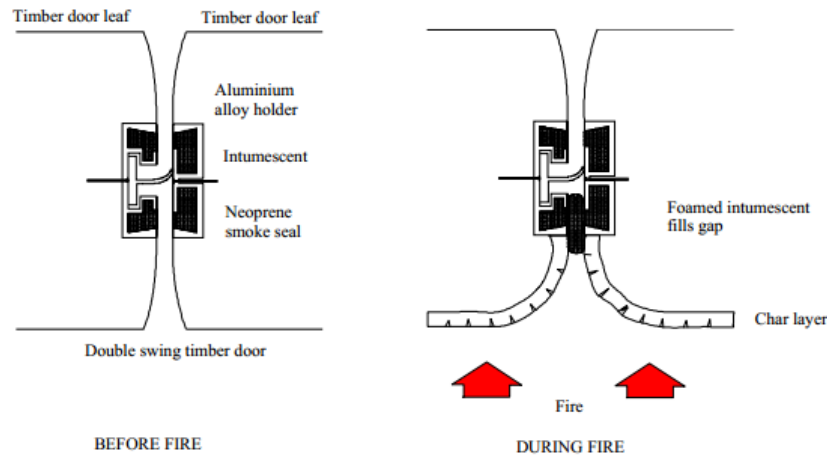
Penyebaran api dalam bangunan juga dapat dibatasi dengan penutup pintu otomatis. Penutup pintu otomatis memastikan pintu selalu tertutup sehingga saat terjadi kebakaran, api dan asap tidak menyebar dengan cepat dari ruang asal api. Saat ini terdapat penutup pintu otomatis yang tersembunyi (*concealed door closer*) yang cocok digunakan pada bangunan cagar budaya. Instalasi *concealed door closer* terpasang dengan rapi antara daun pintu dan bingkai pintu, sehingga tidak terlihat saat pintu tertutup dan tidak mengganggu estetika saat pintu terbuka. *Concealed door closer* diproduksi dalam berbagai macam warna sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan estetika bangunan cagar budaya. Di bawah ini adalah contoh bangunan cagar budaya South Lodge Hotel, London yang menggunakan *concealed door closer* sebagai sistem proteksi pasif pada bangunan (Gambar II.14).



Gambar II.14 Contoh *concealed door closer* di South Lodge Hotel, London
Sumber: www.concealeddoorclosers.com, diunduh 16 Desember 2014

Meskipun pintu dalam kondisi tertutup, seringkali terdapat celah antara daun pintu dan bingkai pintu yang dapat mengalirkan gas panas dan asap. *Fire seal* pada pintu diperlukan agar terjadi kompartemen penuh pada ruang. *Seal* dapat menahan aliran panas dan asap dari 30 menit sampai 60 menit. *Seal* dirancang untuk

berekspansi ketika mengalami panas dan mengisi celah antara daun pintu dan bingkai (Gambar II.15).



Gambar II.15 Contoh *fire seal* untuk pintu dubel
 Sumber: Cooke, 2003

II.2.2 Manajemen Keselamatan Kebakaran

Selain penyediaan proteksi aktif dan proteksi pasif, bangunan juga perlu mempunyai kesiagaan dalam mengantisipasi dan mengatasi kebakaran. Melalui manajemen keselamatan kebakaran, pengelola dan penghuni bangunan diharapkan dapat membantu mengendalikan kebakaran, khususnya pada tahap awal kebakaran. Manajemen keselamatan kebakaran (*fire safety management*) atau juga disebut manajemen penanggulangan kebakaran adalah segala upaya yang menyangkut sistem organisasi, personel, sarana dan prasarana, serta tata laksana untuk mencegah, mengeliminasi serta meminimalkan dampak kebakaran pada bangunan, lingkungan dan kota (Kep. Men PU Nomor 11/KPTS/2000). Secara umum, manajemen keselamatan kebakaran memiliki peran (a) memastikan bahwa langkah-langkah keselamatan dapat dilakukan dengan baik, (b) memulai tindakan dalam kebakaran untuk membantu penghuni mencapai tempat aman, (c) meninjau keselamatan kebakaran pada bangunan seperti instalasi pemadam kebakaran (Chow, 2001).

Menurut Kep.Men PU Nomor 20/PRT/M/2009 tentang Pedoman Teknis Manajemen Proteksi Kebakaran di Perkotaan, lingkup manajemen keselamatan

kebakaran pada bangunan gedung terdiri dari (a) unit manajemen kebakaran bangunan, (b) sarana dan prasarana penanggulangan kebakaran, (c) organisasi penanggulangan kebakaran, (d) tata laksana operasional, dan (e) sumber daya manusia. Sarana dan prasarana dalam penanggulangan kebakaran terkait dengan ketersediaan sumber air, akses bangunan, dan sistem proteksi bangunan. Organisasi terkait dengan tim penanggulangan kebakaran yang perlu dibentuk oleh pengelola bangunan sehingga dapat menjalankan tugas untuk menanggulangi kebakaran. Sumber daya manusia pada bangunan terkait dengan pengetahuan, pengalaman, dan keahlian yang harus dimiliki dalam pencegahan dan penanggulangan kebakaran. Hal ini dapat tercapai dengan melakukan pembinaan dan pelatihan oleh pihak-pihak terkait.

Tata laksana operasional dapat dibagi menjadi tahap pra kebakaran, saat kebakaran, dan pasca kebakaran. Pencegahan saat pra kebakaran dapat dilakukan dengan membuat rencana pengamanan kebakaran (*fire safety plan*) yang mencakup rencana tindakan darurat kebakaran (*fire emergency plan*), pelatihan personel, pemeriksaan dan pemeliharaan bangunan, rencana aksi, dan rencana hubungan dengan lingkungan. Manajemen saat kebakaran dapat dilakukan dengan evakuasi orang dan barang, pencarian sumber api, dan pemadaman api. Manajemen setelah kebakaran dapat dilakukan dengan membuat laporan kebakaran dan pemeriksaan serta penelitian terhadap tingkat keandalan dan kerusakan bangunan.

Salleh dan Ahmad (2009) melakukan penelitian mengenai kondisi manajemen keselamatan kebakaran pada bangunan cagar budaya di Malaysia. Penelitian dilakukan pada 37 bangunan cagar budaya yang memiliki fungsi sebagai museum. Dari hasil survey ditemukan bahwa semua bangunan (100%) tidak memiliki strategi tindakan darurat, 89% tidak melakukan penilaian risiko secara regular, 84% tidak pernah melakukan latihan kebakaran, 46% tidak memiliki sistem alarm, dan 43% tidak memiliki sistem deteksi otomatis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sebagian besar bangunan cagar budaya masih memiliki manajemen keselamatan kebakaran yang tidak dapat diandalkan.

II.3 Metode Penilaian Berbasis Kinerja

Penilaian risiko kebakaran pada bangunan merupakan sebuah proses pemahaman dari bahaya kebakaran di sebuah bangunan yang tidak diinginkan. Penilaian risiko kebakaran berhubungan erat dengan persyaratan keselamatan kebakaran. Terdapat dua pendekatan dalam merancang sistem proteksi kebakaran maupun mengevaluasi kinerja bangunan terhadap kebakaran, yaitu pendekatan preskriptif dan pendekatan berbasis kinerja.

Pendekatan preskriptif telah lama digunakan oleh sebagian besar negara. Pendekatan ini memberikan keuntungan karena memungkinkan evaluasi langsung apakah persyaratan yang telah ditetapkan telah terpenuhi atau tidak. Meskipun demikian pendekatan ini memiliki kekurangan, antara lain adanya persyaratan tanpa pernyataan tujuan, menganggap bahwa hanya ada satu cara dalam mencapai tingkat keselamatan, tidak dapat digunakan untuk bangunan kompleks, dan desain dengan pendekatan ini sering kali tidak hemat secara biaya dan kurang fleksibel untuk menghadapi situasi yang tidak biasa (Hadjisophocleous dkk., 1998).

Dalam rangka membuat desain yang lebih fleksibel dengan biaya yang lebih efektif, terdapat pendekatan baru selain pendekatan preskriptif, yaitu pendekatan berbasis kinerja. Pendekatan berbasis kinerja (*performance based approach*) merupakan pendekatan logis dan sistematis untuk melakukan penilaian keselamatan bangunan cagar budaya dari kebakaran. Terdapat lima elemen utama dalam pendekatan berbasis kinerja, yaitu (1) tujuan (*goals*), (2) sasaran (*objectives*), (3) kriteria kinerja (*performance criteria*), (4) skenario kebakaran, dan (5) evaluasi (Watts, 2001). Tujuan dan sasaran diterjemahkan menjadi kriteria kinerja. Selanjutnya kombinasi antara skenario kebakaran, spesifikasi desain bangunan, serta asumsi digunakan dalam pemodelan kebakaran ataupun metode perhitungan lainnya untuk melihat apakah kriteria kinerja sudah tercapai atau belum.

Pendekatan berbasis kinerja muncul sejak tahun 1990-an di negara maju sebagai alternatif dari pendekatan preskriptif. Banyak negara telah menggunakan

pendekatan berbasis kinerja karena diharapkan lebih memberikan keuntungan dibandingkan pendekatan preskriptif. Menurut Hadjisophocleous, Benichou, dan Tamin (1998), beberapa keuntungan pendekatan berbasis kinerja adalah adanya tujuan keselamatan kebakaran yang jelas, memungkinkan solusi desain yang inovatif dan fleksibel, memungkinkan efektifitas biaya, memungkinkan pengenalan teknologi baru dan menghilangkan kompleksitas dari peraturan preskriptif. Di samping itu menurut Watts (2001), pendekatan berbasis kinerja memberikan kesempatan untuk menentukan proteksi kebakaran sesuai dengan karakter masing-masing bangunan. Hal ini dapat meningkatkan kemampuan untuk memprediksi bahaya kebakaran dan kinerja secara lebih akurat serta meringankan konflik antara peraturan bangunan keselamatan kebakaran dengan properti bersejarah.

Walaupun begitu menurut Suprpto (2007), ditinjau dari aspek penerapannya, ditemukan berbagai kendala dalam melakukan pendekatan ini, yaitu dibutuhkan pemahaman akan prinsip kebakaran, kelengkapan data menyangkut perilaku bahan, struktur dan utilitas serta kemampuan penggunaan perangkat lunak. Di samping itu, dibutuhkan waktu peralihan dari pendekatan preskriptif ke pendekatan berbasis kinerja. Di Indonesia sendiri, pendekatan berbasis kinerja telah dimulai sejak satu dekade lalu, namun penggunaannya belum optimal serta belum dipakai luas (Tambunan, 2012). Hal ini disebabkan tidak mudahnya menetapkan *level of safety* serta dibutuhkan kemampuan memilih metode yang tepat.

II.3.1 Penentuan Tujuan

Tujuan adalah pernyataan yang menggambarkan aspirasi yang disusun dan disepakati oleh pihak yang berkepentingan (Watts, 2001). Secara umum terdapat empat tujuan dalam keselamatan kebakaran, yaitu keselamatan jiwa, properti (bangunan), keberlanjutan operasi, dan keselamatan lingkungan. Dalam kasus bangunan cagar budaya, tujuan dari keselamatan akan kebakaran yang utama adalah untuk preservasi bangunan cagar budaya dari bahaya kebakaran. Di samping itu, keselamatan jiwa juga merupakan tujuan yang penting dalam

keselamatan akan kebakaran. Dalam NFPA 914, *Code for Fire Protection in Historic Structures* (2001) tujuan dari keselamatan kebakaran pada bangunan cagar budaya adalah untuk menjaga elemen bersejarah (*historic fabric*) dan memberikan perlindungan dan keselamatan jiwa dari efek kebakaran.

II.3.2 Penentuan Sasaran

Sasaran adalah hasil spesifik di mana tujuan terpenuhi (Watts, 2001). Tujuan masih mudah untuk diukur, sedangkan sasaran lebih mutlak dan dirumuskan secara kuantitatif. Sasaran yang akan digunakan dalam penilaian dapat mengacu pada rumusan yang tercantum dalam standar atau dirumuskan oleh pemilik kepentingan. Sasaran merefleksikan tingkat maksimum yang dapat diterima terhadap cedera penghuni, kerusakan pada bangunan dan isinya, kerusakan pada proses dalam bangunan, interupsi bisnis, atau kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh kebakaran. Akan tetapi perlu diperhatikan bahwa tidak mungkin menciptakan lingkungan yang bebas dari risiko sama sekali.

II.3.3 Perumusan Kriteria Kinerja

Kriteria kinerja adalah nilai ambang batas di mana tujuan dapat secara terukur dievaluasi (Watts, 2001). Kriteria kinerja disusun berdasarkan tujuan dan sasaran yang ingin dicapai dan dinyatakan dalam nilai yang dapat dikuantifikasi, misalnya temperatur, radiasi panas, tingkat kandungan racun, dan lain-lain.

1. Perumusan Kriteria Kinerja Keselamatan Jiwa

Kriteria keselamatan jiwa dapat dibuktikan apabila waktu yang dibutuhkan untuk setiap penghuni menuju ke tempat yang aman tidak melebihi waktu timbulnya kondisi berbahaya bagi penghuni (Yung, 2008). Saat ini konsep tersebut dikenal dengan *Required Safe Egress Time* (RSET) lebih pendek dari *Available Safe Egress Time* (ASET). Kriteria kinerja keselamatan jiwa yang diusulkan oleh NFPA 914 adalah setiap penghuni yang tidak dekat dengan sumber api, tidak mengalami kondisi berbahaya secara seketika maupun kumulatif.

Beberapa metode yang diusulkan oleh NFPA 914 antara lain:

- a. Memastikan penghuni tidak terkena efek kebakaran dan menetapkan batas kondisi yang dapat dipertahankan.
- b. Setiap ruangan atau area sudah terevakuasi sebelum asap dan lapisan gas beracun sampai pada level di bawah 1,8 m dari atas lantai.
- c. Lapisan asap dan gas beracun tidak akan sampai pada level di bawah 1,8 m dari atas lantai pada setiap ruangan berpenghuni.
- d. Efek kebakaran tidak mencapai satupun ruangan yang berpenghuni.

2. Perumusan Kriteria Kinerja Keselamatan Bangunan

Tidak mungkin ada kebakaran yang bebas dari risiko sama sekali. Kriteria kinerja keselamatan bangunan dibuat untuk memprioritaskan objek atau bagian bangunan yang dapat diterima untuk mendapat risiko kebakaran. NFPA 914 mengusulkan metode sasaran keselamatan bangunan cagar budaya yaitu ruang dan konten dengan signifikansi sejarah tidak terkena efek dari kebakaran yang dapat menimbulkan kerusakan yang tidak dapat dikembalikan (*irreversible*).

Beberapa metode yang diusulkan oleh NFPA 914 antara lain:

- a. Membuat kriteria kinerja yang memastikan ruang tertentu terbebas dari api, asap atau panas kebakaran.
- b. Setiap ruang terisolasi dari kebakaran sebelum asap dan lapisan termal pada ruang tersebut mencapai level di mana kerusakan yang tidak dapat dikembalikan (*irreversible*) terjadi.
- c. Asap dan lapisan termal tidak mencapai level di mana kerusakan permanen terjadi pada semua ruang.
- d. Tidak ada efek kebakaran yang mencapai ke ruangan lain selain ruangan asal.

II.3.4 Penyusunan Skenario Kebakaran

Prinsip utama dalam setiap proses evaluasi keselamatan kebakaran pada bangunan adalah skenario kebakaran. Skenario adalah urutan peristiwa yang meliputi kejadian awal dan konsekuensinya (Watts, 2001). Untuk menentukan apakah desain bangunan mencapai kriteria kinerja, skenario kebakaran dilihat menggunakan model simulasi kebakaran atau pengukuran risiko kebakaran lain.

Skenario kebakaran disusun berdasarkan data karakteristik bangunan, karakteristik penghuni dan karakteristik kebakaran bangunan yang akan dievaluasi. NFPA 914 menjabarkan delapan pendekatan skenario yang dapat digunakan untuk mengevaluasi desain bangunan yang diusulkan. Akan tetapi skenario dalam evaluasi tidak terbatas pada skenario yang diberikan oleh NFPA 914. Skenario harus dirumuskan lagi sesuai dengan karakteristik bangunan yang akan dievaluasi.

Skenario yang diusulkan oleh NFPA 914 antara lain:

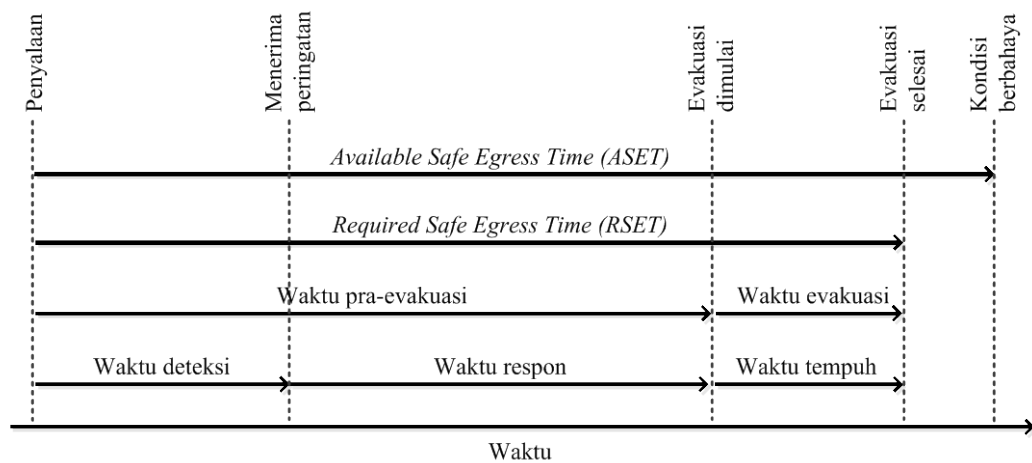
- a. Mewakili kebakaran spesifik khas karakteristik bangunan.
- b. Kebakaran yang berkembang sangat cepat di sarana utama jalan keluar, dengan kondisi pintu interior terbuka sejak awal kebakaran.
- c. Kebakaran yang di mulai dari sebuah ruangan yang biasanya kosong, yang berpotensi membahayakan penghuni di ruang besar atau daerah yang lain.
- d. Kebakaran berasal dari dinding atau langit-langit ruang yang berdekatan dengan ruang besar.
- e. Kebakaran yang berkembang dengan lambat, di dekat daerah hunian yang tinggi.
- f. Kebakaran paling parah akibat kemungkinan beban bahan bakar terbesar dari bangunan.
- g. Api berasal dari luar bangunan.
- h. Api berasal dari bahan bakar di ruangan di mana sistem proteksi aktif dan pasif tidak berfungsi.

Masing-masing skenario kebakaran selanjutnya dievaluasi untuk melihat apakah bangunan memenuhi kriteria kinerja atau tidak. Apabila kriteria kinerja tidak terpenuhi, terdapat dua cara yang dapat dilakukan. Pertama, merubah sistem keselamatan bangunan yang terdiri dari pencegahan kebakaran, kontrol perkembangan api dan asap, sistem deteksi, sistem pemadam, jalur evakuasi, dan sistem proteksi pasif. Kedua, merevisi sasaran dan kriteria kinerja. Sasaran tidak dapat sewenang-wenang diubah untuk memastikan kriteria kinerja terpenuhi,

tetapi berdasarkan analisis yang telah dilakukan (SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection, 2000).

II.4 RSET dan ASET

Prinsip utama dalam kriteria kinerja keselamatan jiwa adalah setiap penghuni memiliki cukup waktu untuk keluar dari bangunan ke tempat yang aman sebelum tercapainya kondisi tak tertahankan dari kebakaran. Saat ini konsep tersebut dikenal dengan RSET (*Required Safe Time Egress Time*) dan ASET (*Available Safe Egress Time*) (Yung, 2008; Babrauskas dkk., 2010). Yung (2008) mendefinisikan bahwa RSET adalah durasi waktu yang dibutuhkan sejak muncul api muncul hingga semua penghuni berada pada tempat yang aman. Sedangkan ASET adalah durasi waktu yang dibutuhkan sejak api muncul hingga kondisi asap kritis yang menghambat evakuasi. Dengan kata lain, dalam tujuan keselamatan jiwa, konsep RSET lebih kecil dari ASET harus tercapai. Diagram konsep RSET dan ASET djelaskan pada Gambar II.16.



Gambar II.16 Waktu evakuasi
Sumber: Yung, 2008

II.4.1 RSET

Konsep RSET pertama kali dikembangkan oleh NIST (National Institute of Standards and Technology) dan terus dikembangkan oleh peneliti-peneliti lain. Dalam Babrauskas, Fleming, dan Russell (2010), pada awalnya pengembangan konsep RSET dilakukan oleh Jonathan Sime. Sime membagi RSET menjadi tiga komponen, yaitu (1) fase *recognition*, (2) fase *coping*, dan (3) fase *escape*.

Sementara menurut Fleischmann (2009), RSET dapat dibagi menjadi empat bagian waktu, yaitu (1) waktu deteksi, (2) waktu alarm, (3) waktu pra-pergerakan, dan (4) waktu tempuh. Dapat disimpulkan bahwa RSET dapat dibagi menjadi dua komponen yaitu waktu pra-evakuasi (waktu deteksi dan waktu respon) dan waktu evakuasi (waktu tempuh).

Waktu pra-evakuasi merupakan waktu yang dibutuhkan penghuni untuk mendeteksi dan merespon kebakaran sebelum memulai evakuasi. Terdapat beberapa penelitian tentang hubungan waktu pra-evakuasi dengan faktor yang berpengaruh. Menurut Lo dkk. (2001), waktu pra-evakuasi dipengaruhi oleh tingkat kesadaran saat adanya peringatan dan perilaku respon. Menurut PD7974-6 The Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety Design of Buildings yang dikutip oleh Flischmann (2009) waktu pra-evakuasi bagi penghuni dipengaruhi oleh tingkat kesadaran penghuni (terbangun atau mengantuk), kefamiliaran terhadap bangunan dan tipe alarm yang digunakan pada bangunan. Menurut Kobes dkk. (2010), waktu pra-evakuasi dipengaruhi oleh tingkat kesadaran, kemampuan penghuni dalam observasi dan Waktu evakuasi adalah waktu yang dibutuhkan sejak penghuni mulai bergerak hingga sampai ke tempat yang aman. Waktu evakuasi menurut Flischmann (2009) dipengaruhi oleh kecepatan penghuni dan perbandingan jumlah mengambil keputusan, serta kinerja respon penghuni dalam menerima dan menginterpretasikan bahaya. Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan faktor yang mempengaruhi waktu pra-evakuasi adalah alat deteksi kebakaran yang digunakan, tingkat kesadaran penghuni, dan karakteristik respon penghuni.

penghuni dengan luas jalur evakuasi. Menurut SFPE Engineering Guide to Performance Based Fire Protection (2000), waktu evakuasi dipengaruhi oleh jumlah penghuni, distribusi penghuni dalam bangunan, umur, kesehatan, kapasitas mental, motivasi dan status kewaspadaan penghuni (terbangun atau mengantuk). Menurut Kobes dkk. (2010), waktu evakuasi antara lain dipengaruhi oleh faktor pertumbuhan api, tingkat mobilitas penghuni, kefamiliaran terhadap bangunan, kepadatan (jumlah penghuni terhadap jalur evakuasi), *layout* bangunan, dan

ukuran akses evakuasi. Secara umum, faktor yang dapat mempengaruhi RSET dapat dikelompokkan menjadi jumlah penghuni, tingkat mobilitas penghuni, distribusi penghuni, dan kondisi jalur evakuasi.

II.4.2 ASET

ASET adalah durasi waktu yang dibutuhkan sejak api muncul hingga kondisi asap kritis yang menghambat evakuasi. Kondisi asap kritis dalam evakuasi biasanya berhubungan dengan sampainya lapisan asap pada ketinggian kepala, tingginya panas dan rendahnya tingkat *visibility* yang menghalangi penghuni melakukan evakuasi. Tidak ada standar secara universal untuk nilai kondisi asap kritis. Salah satu contoh kondisi asap kritis yang direkomendasikan oleh British Standar yang dikutip dalam Yung (2008) adalah tinggi lapisan asap < 2 m, temperatur lapisan asap > 200 °C dan jarak pandang < 10 m. Menurut Purser (2002), kondisi berbahaya tercapai apabila temperatur udara di dalam ruangan mencapai 120 °C. Sedangkan menurut NFPA 914, kondisi berbahaya tercapai apabila lapisan asap dan gas beracun sampai pada level 1,8 m dari atas lantai.

Tercapainya salah satu dari tiga kondisi tersebut sudah dapat menghambat evakuasi, lebih parah lagi kondisi tersebut dapat menyebabkan kematian dalam waktu singkat. Ketinggian asap dapat menimbulkan bahaya karena apabila lapisan asap yang terdapat di langit-langit sudah turun sampai dengan ketinggian kepala manusia, kandungan racun terutama karbon dioksida akan terhirup oleh penghuni. Butcher dan Parnell (1979) mengatakan bahwa 1% karbon monoksida yang terkandung dalam atmosfir asap yang terhirup oleh manusia dapat mengakibatkan hilangnya kesadaran dalam waktu kurang dari 5 menit.

Geometri ruang mempengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi berbahaya. Semakin besar ukuran ruang dan semakin tinggi langit-langit, maka semakin banyak waktu yang dibutuhkan oleh gas panas untuk mengisi lapisan atas (*upper layer*) (Lentini dan Spaulding, 2012). Apabila suhu lapisan atas asap meningkat maka radiasi bawah akan mengalami peningkatan secara cepat dan meningkatkan temperatur dari bahan bakar lain sehingga kebakaran menyebar

dengan cepat. Berdasarkan konfigurasi ruang, ruang panjang dan sempit akan memberikan panas dari permukaan yang berdekatan dengan lebih mudah sehingga akan membuat pertumbuhan api yang lebih cepat dibandingkan dengan ruangan persegi (Fitzgerald, 2004).

Selain itu pertumbuhan api dipengaruhi dengan keberadaan ventilasi. Saat pertumbuhan api dalam ruang tanpa ventilasi, oksigen akan habis sehingga pembakaran akan terhenti. Ventilasi pada ruang memberikan suplai oksigen untuk pertumbuhan dan penyebaran api. Parkes dan Fleischmann (2005) melakukan penelitian dengan membandingkan HRR (*Heat Release Rate*) untuk tiga ventilasi yang berbeda pada ruangan yang sama berukuran 3,6 x 2,4 x 1,2 m. Variasi ventilasi terdiri dari ventilasi penuh (2,4 x 1,2 m), soffit (2,4 x 1,0 m) dan pintu (0,4 x 1,0 m). Dari hasil penelitian didapatkan bahwa HRR ventilasi pintu lebih tinggi dibandingkan HRR ventilasi penuh dan soffit. Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa dimensi ventilasi tidak berbanding lurus dengan pertumbuhan api. Dalam beberapa kasus kebakaran, dapat terjadi *over-ventilated* (jumlah oksigen yang tersedia lebih dari yang diperlukan untuk pembakaran sempurna) yang menyebabkan tingkat penyebaran api justru akan berkurang karena udara yang berlebih akan terinduksi ke dalam api sehingga mengurangi temperatur api (LWF, 2013).

Sumber bahan bakar pada bangunan mempengaruhi penyebaran, pertumbuhan, dan durasi kebakaran. *Layout* furnitur/bahan bakar pada ruang mempengaruhi penyebaran api. Furnitur dengan jarak yang dekat dengan sumber penyalaan akan lebih cepat panas dan melepaskan gas mudah terbakar dibandingkan dengan furnitur yang berjarak jauh. Sehingga apabila *layout* furnitur pada ruang saling berdekatan, penyebaran api akan semakin cepat. Jenis bahan bakar mempengaruhi pertumbuhan kebakaran. Masing-masing material memiliki properti termal berbeda yang mempengaruhi pertumbuhan api. Kecepatan permukaan material menyerap panas ditentukan oleh nilai *thermal inertia*. Penjelasan mengenai properti termal material dapat dilihat pada Bab II.1.1. Bentuk bahan bakar juga mempengaruhi kecepatan penyebaran api. Benda yang tipis

cenderung lebih cepat panas dan menyala lebih cepat dibanding dengan benda yang tebal. Di samping itu, jumlah bahan bakar akan menentukan berapa lama proses pembakaran akan terjadi (SFPE, 2000; Yung, 2008; Lentini dan Spaulding, 2012).

Lokasi sumber penyalan pada ruang juga merupakan faktor yang mempengaruhi pertumbuhan api (Lentini dan Spaulding, 2012). Kebakaran di tengah ruang membuat udara datang dari segala sisi dan menghasilkan api yang lebih pendek. Kebakaran di dekat dinding membuat udara hanya datang dari setengah sisi karena terhambat dinding. Kebakaran ini menghasilkan api yang lebih tinggi serta kenaikan temperatur lapisan atas dan *flashover* yang lebih cepat. Kebakaran di pojok ruang membuat udara datang berkurang 75 persen. Kebakaran ini menghasilkan api yang lebih tinggi serta kenaikan temperatur lapisan atas dan *flashover* yang lebih cepat daripada kebakaran di tengah ruang dan kebakaran di dekat dinding. Contoh pengaruh lokasi sumber penyalan pada ruang dapat dilihat pada Gambar II.17. Gambar II.17 menunjukkan kebakaran pada tiga bantal sofa yang identik, 17 detik setelah penyalan. Selain itu, jarak antara api ke langit-langit juga akan mempengaruhi waktu yang dibutuhkan gas panas memenuhi lapisan atas dan sistem proteksi bereaksi.



Gambar II.17 Efek lokasi sumber penyalan pada ruang terhadap ketinggian api. Penyalan di tengah ruang (kiri), penyalan di dekat dinding (tengah), dan penyalan di pojok (kanan).

Sumber: Lentini dan Spaulding, 2012

Pertumbuhan api akan mempengaruhi waktu kondisi berbahaya bagi penghuni. Dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi pertumbuhan api antara lain ukuran ruang (volume), ketinggian langit-langit, ventilasi, *layout* ruang, tipe dan jumlah bahan bakar (material bangunan dan furnitur), dan lokasi sumber penyalan dalam ruang. Faktor yang mempengaruhi ASET secara umum dapat dikelompokkan menjadi geometri ruang, sumber bahan bakar dan lokasi sumber penyalan.

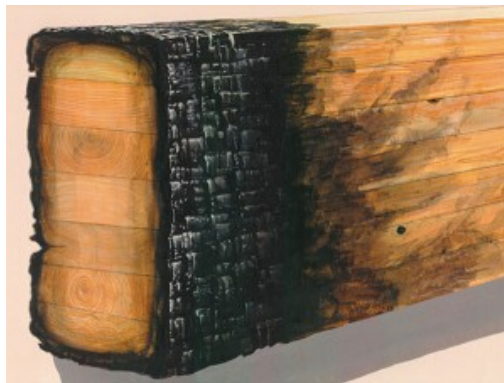
II.5 Waktu Kondisi Berbahaya Bangunan Cagar Budaya

Pada kasus bangunan cagar budaya, kondisi berbahaya terjadi apabila efek dari kebakaran menimbulkan kerusakan permanen. Kerusakan pada bangunan dapat disebabkan oleh efek termal, penyebaran api, dan efek asap. Efek termal dalam kebakaran dapat menyebabkan perubahan sifat material baik secara kimia, fisik, mekanik, dan termal (Tabel II.4). Kebakaran dapat mempengaruhi kapasitas beban dari elemen struktural dalam berbagai cara. Selain efek hangus dan *spalling* (terpecah), kebakaran dapat menyebabkan berkurangnya kekuatan material secara permanen dan kerusakan secara tidak langsung karena ekspansi termal. Waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya dapat ditentukan dengan menentukan batas efek termal yang menyebabkan perubahan pada material bangunan.

Tabel II.4 Perubahan Sifat Material Karena Kebakaran
Sumber: Gillie, 2011

Properti		Kayu	Batu Bata	Kaca
Kimia	Dekomposisi <i>Charring</i>	x x		
Fisik	Kepadatan <i>Softening</i> <i>Melting</i> <i>Spalling</i>	x	x x	x x x
Mekanik	Kekuatan Kekakuan <i>Creep</i> Ekspansi termal	x x x	x x x x	x x x
Termal	Konduktivitas <i>Specific heat</i>	x x	x x	x x

Menurut American Society of Home Inspectors (2007), semua bahan bangunan kecuali kayu cenderung menunjukkan kehilangan kekuatan yang signifikan ketika dipanaskan di atas 250 °C, kekuatan yang tidak mungkin pulih kembali setelah pendinginan. Material kaca akan melunak (*softening*) pada suhu 700 °C atau 800 °C. Material batu bata dapat menahan suhu sekitar 1000 °C dan *melting* pada sekitar suhu 1400 °C. Material kayu berubah coklat pada sekitar suhu 120 °C atau 150 °C, menghitam pada sekitar suhu 200 °C atau 250 °C dan memancarkan uap yang mudah terbakar (*pyrolysis*) pada suhu 300 °C. Diatas 400 °C atau 450 °C (300 °C apabila ada api), permukaan kayu akan terbakar mulai terjadi *charring* (Gambar II.18). Menurut Gerhards (1982) dalam Winter (2003), *pyrolysis* pada kayu akan terjadi pada suhu 200 °C dan mengalami *charring* pada 300 °C.



Gambar II.18 *Charring* pada kayu karena efek termal
Sumber: White, 2013

Menurut White dan Woeste (2013) lapisan kayu di bawah lapisan *char* akan mengalami kerugian permanen dalam kapasitas beban, tergantung pada intensitas dan durasi paparan api. Pengaruh termal terhadap sifat mekanik kayu tidak bersifat permanen pada suhu di bawah 100 °C. Material kayu akan mengalami potensi kerugian permanen dalam sifat mekanik akibat degradasi termal antara suhu 100 °C hingga 287 °C. Dari suhu 199 °C sampai 299 °C, komponen hemiselulosa dan lignin pada kayu akan mulai mengalami degradasi yang signifikan. Komponen selulosa kayu akan mengalami depolimerisasi antara suhu 297 °C sampai 349 °C.

Bangunan cagar budaya dapat dikatakan dalam kondisi berbahaya apabila efek dari kebakaran dapat menimbulkan kerusakan permanen pada material. Jika dilihat dari perubahan sifat material, kayu merupakan material yang paling cepat mengalami perubahan karena efek termal kebakaran. Dapat dikatakan bahwa pada bangunan kasus studi dengan material struktur utama kayu, waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya tercapai apabila temperatur mencapai 100 °C.

Faktor kondisi berbahaya pada bangunan sama dengan faktor yang mempengaruhi kondisi berbahaya bagi penghuni karena terkait dengan pertumbuhan api dalam kebakaran. Faktor yang mempengaruhi waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya antara lain ukuran ruang (volume), ketinggian langit-langit, ventilasi, *layout* ruang, tipe dan jumlah bahan bakar (material bangunan dan furnitur), dan lokasi sumber penyalan dalam ruang. Faktor yang mempengaruhi waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya secara umum dapat dikelompokkan menjadi geometri ruang, sumber bahan bakar dan lokasi sumber penyalan.

II.6 Metode Pengukuran Risiko

Metode pengukuran risiko secara umum dapat dibagi menjadi tes dan pemodelan. Tes dilakukan dengan cara melakukan percobaan langsung pada objek. Tes dapat dibagi dalam beberapa skala, yaitu tes skala kecil, tes skala sedang, dan tes skala penuh. Tes skala kecil biasanya digunakan dalam menilai aktivasi dari alat deteksi maupun alat pemadam, tes harus dilakukan di tempat khusus pengetesan. Tes skala sedang biasanya digunakan dalam menentukan kecukupan komponen sistem. Tes skala penuh biasanya digunakan dalam menilai bangunan dan komponen struktural seluruh sistem atau simulasi evakuasi pada bangunan yang sudah ada tanpa membuat penghuni terkena dampak fisik maupun psikologis dari kebakaran. Akan tetapi dalam melakukan evaluasi risiko bangunan secara keseluruhan, metode dengan tes kurang efisien bahkan tidak mungkin dilakukan karena tidak mungkin mengetes langsung kebakaran pada bangunan eksisting.

Saat ini dikembangkan metode pemodelan yang dapat digunakan untuk memprediksi kriteria kinerja melalui asumsi dan skenario yang dibuat. Pemodelan

lebih umum dipakai dalam evaluasi risiko kebakaran berbasis kinerja, walau tidak semua, karena keterbatasan dengan metode tes. Pemodelan dapat dibagi menjadi beberapa macam, yaitu model kebakaran (*fire model*), model evakuasi (*evacuation model*) dan model ketahanan (*tenability model*) (Kuligowski dkk., 2010). Pemilihan model kebakaran tergantung pada beberapa faktor, yaitu ketersediaan untuk publik, validasi model, dan kemudahan dalam penggunaan. Di samping itu, pemilihan model yang akan digunakan dapat merujuk pada hasil tinjauan terhadap berbagai model analisis berbasis komputer yang umumnya telah dikenal dan digunakan banyak kalangan.

Dalam mengukur RSET, pemodelan yang digunakan adalah model evakuasi. Model evakuasi memungkinkan membuat simulasi berdasarkan dua faktor, yaitu faktor fisik (geometri bangunan, hambatan, beban penghuni, penyebaran api, dan lain-lain) dan perilaku manusia (*pre-movement time*, pemilihan jalan keluar, kecepatan bejalan, dan lain-lain). Beberapa model evakuasi yang tersedia untuk publik antara lain EVACNET4, STEPS, PEDROUTE, Simulex, FDS+Evac, Pathfinder, Legion, SpaceSensor, dan lain-lain. Terdapat fitur yang membedakan antar model evakuasi yang terdiri dari fitur utama dan fitur tambahan. Fitur utama yang membedakan antar model evakuasi antara lain metode pemodelan, perilaku penghuni, pergerakan (*movement*), data kebakaran, dan visualisasi. Fitur tambahan yang membedakan antar model evakuasi antara lain *counterflow*, *exit block*, kondisi kebakaran yang mempengaruhi perilaku, *toxicity*, waktu pra-evakuasi, penggunaan elevator, dan pemilihan rute oleh (Kuligowski dkk., 2010).

Berdasarkan metode pemodelan, model evakuasi dapat dibagi menjadi *behavioral models*, *partial behavioral models* dan *movement models*. Berdasarkan pergerakan penghuni, model evakuasi dapat dibagi menjadi tipe pergerakan korelasi kepadatan (*density correlation*), pilihan pengguna, *inter-person distance*, potensial, kekosongan sel grid lain, kondisional, *acquiring knowledge*, *unimpeded flow*, dan *cellular automata*. Berdasarkan pemilihan rute oleh penghuni, model evakuasi dapat dibagi menjadi pemilihan rute tercepat, rute terpendek, rute yang ditetapkan oleh pengguna model dan rute berdasarkan kondisi bangunan (rute ini

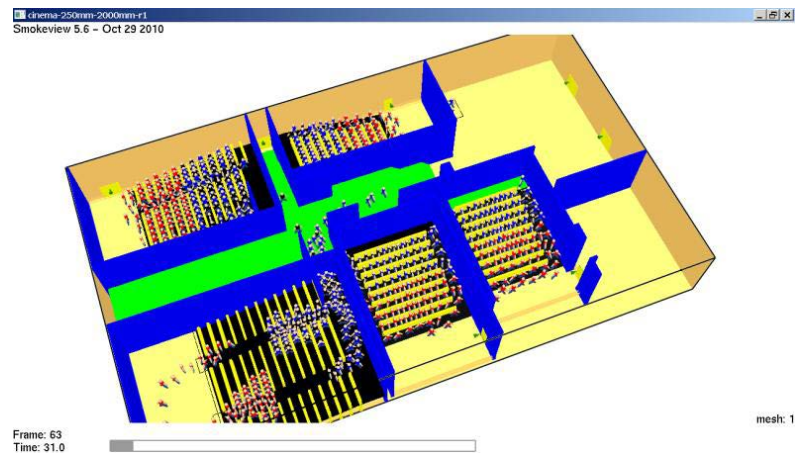
bisanya memungkinkan penghuni mengubah rute selama proses evakuasi) (Kuligowski dkk., 2010).

Salah satu model evakuasi yang tersedia untuk publik dan telah banyak digunakan adalah FDS+Evac. FDS+Evac adalah model evakuasi untuk FDS (*Fire Dynamics Simulator*) yang dikembangkan oleh National Institute of Standards and Technology (NIST). FDS+Evac termasuk dalam *partial behavior model*, model yang menghitung pergerakan penghuni dengan mulai secara implisit melihat perilaku penghuni. Pergerakan penghuni pada model ini termasuk dalam tipe *inter-person distance*, individu memiliki jarak minimum dari penghuni lain, hambatan, atau komponen bangunan. Pemilihan rute oleh penghuni dalam FDS+Evac dilakukan terhadap rute tercepat dan rute berdasarkan kondisi bangunan, misalnya kondisi kebakaran dan tindakan dari penghuni lain. FDS+Evac memperlakukan setiap penghuni sebagai agen yang terpisah sehingga masing-masing penghuni dapat memiliki karakteristik yang berbeda. Gerakan manusia dapat divisualisasikan menggunakan perangkat lunak Smokeview.

Terdapat beberapa studi yang membandingkan FDS+Evac dengan beberapa model evakuasi lain. Ronchi (2010) melakukan perbandingan antara FDS+Evac, STEPS dan Pathfinder untuk skenario evakuasi di *road tunnel*. Dari hasil studi dapat disimpulkan bahwa FDS+Evac memiliki kelebihan karena seluruh proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara otomatis oleh model, pengguna dapat mengatur parameter yang diperlukan (penggunaan pintu, pengaruh asap pada pra-evakuasi, dan lain-lain). Hal ini dikarenakan FDS+Evac menggabungkan *agent base model* dan FDS (*Fire Dynamic Simulator*) sehingga efek kebakaran dapat mempengaruhi perilaku penghuni. Pada STEPS dan Pathfinder, pengguna model harus sebelumnya melakukan analisis kebakaran untuk memilih input dari target pintu keluar, kecepatan berjalan, dan penggunaan pintu.

Tan (2011) melakukan perbandingan antara Simulex, FDS+Evac dan EvacuationNZ untuk skenario evakuasi di sebuah bioskop, perkantoran, restoran dan kompleks olahraga (Gambar II.19). Dari hasil studi dapat disimpulkan bahwa

FDS+Evac memiliki kelebihan, yaitu dapat digunakan pada situasi evakuasi yang kompleks dan area kritis dapat diamati dengan mudah. Namun terdapat kekurangan dalam FDS+Evac, yaitu model ini membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk satu kali simulasi sehingga memerlukan daya komputasi yang sangat baik.



Gambar II.19 Visualisasi evakuasi di bioskop dengan FDS+Evac
Sumber: Tan, 2011

Dalam mengukur ASET dan waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya, pemodelan yang digunakan adalah model kebakaran. Model kebakaran memprediksi efek dari kebakaran. Pemodelan kebakaran dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu model api probabilistik dan model api deterministik (Hadjisophocleous dan Benichou, 1997). Model api probabilistik melibatkan kemungkinan risiko kebakaran berdasarkan kemungkinan dari semua parameter yang mempengaruhi api. Probabilitas biasanya tergantung dari data eksperimental atau statistik kebakaran. Model api deterministik didasarkan pada faktor fisika, kimia, dan hubungan termodinamika serta korelasi empiris untuk menghitung dampak kebakaran. Model api deterministik dibagi menjadi *zone models* dan *fields model*.

Zone model adalah program komputer yang memprediksi efek perkembangan api dalam kompartemen atau beberapa kompartemen. *Zone model* membagi kompartemen menjadi dua zona untuk memecahkan persamaan konservasi, yaitu

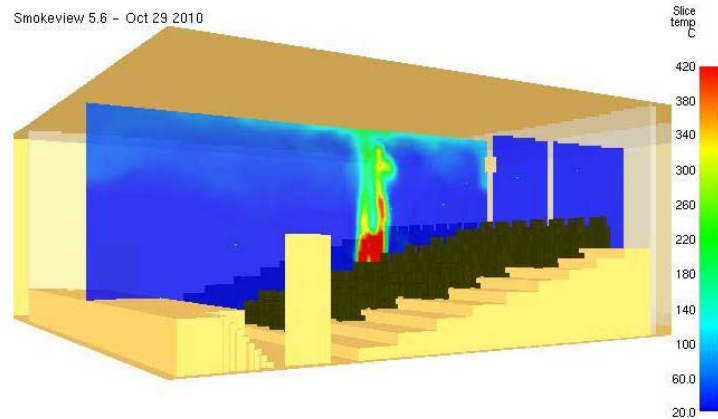
lapisan asap atas yang panas dan lapisan bawah yang lebih dingin (Olenick dan Carpenter, 2003). Pendekatan dua zona ini memungkinkan membuat perkiraan kebakaran kondisi umum. Namun *zone model* memiliki keterbatasan karena umumnya memiliki batas jumlah kompartemen dan tidak akurat untuk menggambarkan geometri yang kompleks. Beberapa *zone model* yang tersedia untuk publik antara lain ASET-B, BRANZFIRE, B-RISK, CFAST, DSLAYV, dan lain-lain.

Field model sesuai digunakan untuk menggambarkan kebakaran pada geometri yang kompleks. *Field model* membagi kompartemen menjadi banyak bagian (ribuan) dan memecahkan persamaan konservasi pada masing-masing bagian sehingga dapat memberikan solusi yang lebih rinci. Untuk mendapatkan solusi yang lebih rinci, *field model* membutuhkan input data yang detail dan lebih banyak daya komputasi. Hal tersebut menyebabkan *field model* membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *zone model* (Olenick dan Carpenter, 2003). Beberapa *field model* yang tersedia untuk publik antara lain FDS, ALOFT-FT, CFX, FIRE, PHOENICS, SMARTFIRE, dan lain-lain. Data mengenai ketersediaan model kebakaran secara lengkap dapat dilihat di www.firemodelsurvey.com.

Salah satu model kebakaran yang tersedia untuk publik dan telah banyak digunakan adalah FDS (Fire Dynamics Simulator). FDS merupakan salah satu *field model* yang dapat memodelkan arus panas kecepatan rendah, pembakaran produk, *pyrolysis*, penyebaran asap, aktivasi sprinkler, dan lain-lain. Pertumbuhan api, asap dan berbagai produk kebakaran dapat divisualisasikan dalam 3D dengan bantuan perangkat lunak Smokeview. Namun input data geometri dalam simulasi FDS rumit dan memakan waktu terutama untuk model yang kompleks. Saat ini tersedia *graphical user interface* (GUI) untuk memfasilitasi input data FDS.

PyroSim adalah salah satu *graphical user interface* untuk FDS. PyroSim berfungsi untuk membuat file input yang akurat untuk FDS, terutama untuk geometri yang kompleks seperti dinding diagonal, repetisi objek, tangga, dan lain-

lain. Tampilan PyroSim dapat 2D atau 3D untuk memastikan input data dimasukkan dengan benar. Selain itu PyroSim dapat mengimport data DXF dan DWG dari AutoCAD atau Revit untuk memudahkan pengguna. Valasek (2013) melakukan studi tentang kebakaran pada bioskop dengan menggunakan PyroSim. Peneliti membuat model menggunakan PyroSim dengan mengimpor gambar denah, membuat dinding, lantai miring bioskop dan kursi-kursi, panggung, pintu dan langit-langit (Gambar II.20). Setelah itu dimasukkan input data material dan input data kebakaran. Hasil simulasi dapat melihat pergerakan asap, temperatur dan HRR sehingga dapat diketahui bagian kursi mana yang memiliki risiko paling tinggi.



Gambar II.20 Visualisasi kebakaran di bioskop dengan PyroSim
Sumber: Valasek, 2013

Dari studi yang telah dilakukan, PyroSim bermanfaat dalam membuat objek yang berulang-ulang dan menempatkannya dalam posisi yang tepat. Tanpa PyroSim, perlu dilakukan perhitungan manual untuk masing-masing simpul koordinat dari *obstructions*, ventilasi, dan lubang yang ada di bioskop. Penelitian dilakukan dengan satu *mesh* yang memiliki kepadatan 10 cm dan jumlah sel 976.680. Waktu yang dibutuhkan untuk komputasi simulasi kebakaran satu menit menggunakan Core i7 990-X 2.46 GHz 24 GB adalah sekitar 2,94 jam. Hal tersebut menunjukkan waktu komputasi simulasi FDS membutuhkan waktu yang cukup lama.

II.7 Signifikansi Budaya Bangunan cagar budaya

Bangunan cagar budaya merupakan bangunan yang memiliki signifikansi budaya yang harus dilestarikan untuk generasi kini dan masa datang. Signifikansi budaya adalah nilai-nilai estetis, historis, ilmiah, sosial atau spriritual untuk generasi dahulu, kini, dan masa depan. Signifikansi budaya dapat tersirat dalam tempat itu sendiri, bahan-bahannya, tata letaknya, fungsinya, asosiasinya, maknanya, rekamannya, tempat-tempat terkait, dan objek-objek terkait. Untuk mempertahankan signifikansi budaya dari bangunan cagar budaya, perlu dilakukan konservasi. Konservasi adalah seluruh proses pemeliharaan sebuah tempat untuk mempertahankan signifikansi sejarah.

Dalam tujuan konservasi untuk mempertahankan signifikansi budaya bangunan cagar budaya, perlu dilakukan sebuah intervensi. Intervensi adalah aktivitas apapun yang menyebabkan gangguan atau perubahan terhadap bangunan cagar budaya. Intervensi pada bangunan cagar budaya harus dilakukan seminimal mungkin dan tidak boleh menimbulkan distorsi fisik atau bukti lain yang ada. Sebelum dilakukan intervensi terhadap bangunan, bahan, fungsi, asosiasi dan makna yang ada harus didokumentasikan secara memadai. Dampak dari intervensi yang dilakukan harus dianalisis sebelumnya terhadap signifikansi budaya. Menurut ICOMOS New Zealand Charter for the Conservation of Places of Cultural Heritage Value (2010), tingkatan intervensi dalam tujuan konservasi terdiri dari:

- a. Preservasi, proses mempertahankan tempat dengan intervensi sesedikit mungkin untuk memastikan pelestarian nilai signifikansi budaya. Preservasi diantaranya dilakukan melalui stabilisasi, perawatan, atau perbaikan. Stabilisasi dilakukan untuk memperlambat pembusukan dengan memberikan *treatment* yang tepat. Pemeliharaan dilakukan pada bangunan cagar budaya dengan membuat rencana program pemeliharaan. Perbaikan dalam bangunan cagar budaya sebaiknya menggunakan material yang serupa. Penggunaan material yang terpaksa baru atau berbeda harus didokumentasikan sebelumnya.

- b. Restorasi, proses mengembalikan bangunan ke bentuk sebelumnya, melalui proses *reassembly*, pemulihan (*reinstatement*), atau penghapusan (*removal*) elemen yang mengurangi nilai signifikansi budaya. Proses *reassembly* menggunakan material yang ada dan melalui proses pemulihan dikembalikan ke posisi semula. Proses penghapusan terkadang perlu dilakukan karena alasan kehilangan integritas struktural atau telah diidentifikasi mengurangi nilai signifikansi budaya. Bagian yang dihapus harus didokumentasikan sebelum dan selama proses penghapusan sebagai bukti sejarah.
- c. Rekonstruksi, proses membangun ulang semirip mungkin dengan bentuk yang didokumentasikan sebelumnya, dengan menggunakan bahan-bahan baru. Proses rekonstruksi penting bagi fungsi, integritas, nilai *intangible* atau pemahaman terhadap suatu tempat sehingga sebaiknya dilengkapi dengan bukti fisik dan dokumen yang cukup agar meminimalkan dugaan.
- d. Adaptasi, proses memodifikasi tempat untuk penggunaan yang lebih kompatibel dengan tetap mempertahankan signifikansi budaya. Proses adaptasi mencakup perubahan (*alteration*) dan penambahan (*addition*). Perubahan dan penambahan harus dilakukan seminimal mungkin, dapat dikembalikan seperti semula (*reversible*) dan tidak memberikan efek buruk pada signifikansi budaya bangunan. Setiap perubahan dan penambahan harus kompatibel dengan bentuk dan struktur dari bangunan serta menghindari kontras yang tidak kompatibel terhadap bentuk, skala, massa, warna, dan material bangunan.

Kebijakan dalam mengelola sebuah bangunan harus berdasar pada pemahaman akan signifikansi budaya. Dalam Burra Charter (2013), terdapat urutan langkah-langkah yang harus dilakukan dalam menyusun kebijakan, yaitu memahami signifikansi budaya dari sebuah bangunan dan mengidentifikasi faktor yang berpengaruh pada masa depan tempat tersebut.

Kebijakan konservasi didasarkan pemahaman akan signifikansi budaya sebuah bangunan. Dalam Burra Charter, kebijakan harus diarahkan untuk mempertahankan aspek signifikansi dengan menerapkan prinsip-prinsip, proses

dan praktik konservasi. Aspek signifikansi yang dimaksud dapat dibedakan menjadi aspek yang *intangible* dan aspek *tangible*. Aspek yang *intangible* antara lain arti, kenangan, memori atau ritual. Sedangkan aspek yang *tangible* antara lain elemen, bentuk, fungsi, lokasi, pengaturan, penggunaan, dan kualitas spasial tempat.

Secara umum, faktor-faktor yang berpengaruh pada masa depan sebuah bangunan terdiri dari (1) kebutuhan pemilik, (2) sumber daya, (3) keterbatasan eksternal dan (4) kondisi fisik tempat tersebut (Burra Charter Pasal 6.3, 2013). Identifikasi faktor-faktor di atas dapat memunculkan kendala dan peluang yang mungkin terjadi. Berikut ini adalah beberapa kendala dan peluang yang harus diidentifikasi:

- a. Kebutuhan pemilik bangunan, aspirasi dan kebutuhan dari pemilik bangunan harus dipertimbangkan.
- b. Kewajiban hukum dan perundang-undangan
- c. Ketersediaan sumber daya (ahli, keuangan, dan sumber daya lain)
- d. Persyaratan operasional dan manajemen
- e. Kondisi fisik dari tempat dan elemen-elemennya
- f. Penggunaan, aktivitas yang penting untuk signifikansi
- g. Kendala eksternal (isu yang ada di lokasi, kondisi lingkungan, politik, dan keadaan sosial)
- h. Ancaman dari usulan perubahan
- i. Masalah dari pihak lain seperti *stakeholder* atau orang-orang yang berhubungan dengan bangunan
- j. Faktor-faktor lain atau kebutuhan masa depan

Hal-hal tersebut (pemahaman akan signifikansi budaya dan identifikasi faktor yang berpengaruh pada masa depan tempat tersebut) mempengaruhi kebijakan yang diambil dalam kasus penanggulangan kebakaran pada bangunan cagar budaya. Dalam membuat manajemen keselamatan kebakaran, kebijakan yang dibuat harus memikirkan ketersediaan sumber daya, keterbatasan eksternal dan kondisi fisik tempat tersebut. Dalam pemasangan sistem proteksi kebakaran pada bangunan cagar budaya, hal-hal yang harus dijadikan pertimbangan diantaranya

adalah signifikansi budaya bangunan tersebut, apakah pemasangan sistem proteksi dapat merusak integritas struktural atau merusak estetika bangunan. Selain itu pemasangan sistem proteksi kebakaran harus memikirkan sumber daya yang dimiliki pengelola, sebagai contoh, pemasangan sistem proteksi harus disesuaikan dengan sumber daya keuangan yang dimiliki oleh pengelola.

II.8 Kesimpulan

Risiko adalah potensi konsekuensi yang merugikan untuk kehidupan manusia, kesehatan, properti, atau lingkungan. Pada bangunan cagar budaya, kebakaran memberikan risiko yang dapat menimbulkan kerusakan atau kemusnahan bagi nilai atau keutuhan aspek warisan sejarah bangunan tersebut. Di samping itu, fungsi bangunan sebagai bangunan publik yang menampung banyak orang juga memberikan risiko bagi keselamatan jiwa.

Untuk melindungi bangunan cagar budaya dari bahaya kebakaran, diperlukan sistem proteksi kebakaran. Sistem proteksi kebakaran pada bangunan dibagi menjadi sistem proteksi aktif dan pasif. Dalam kasus bangunan cagar budaya, sistem proteksi rentan untuk merusak bangunan itu sendiri, maka diperlukan penyesuaian dalam pemasangannya. Sistem deteksi dan alarm pada bangunan sejarah dapat diposisikan dengan pendekatan yang lebih fleksibel dengan harapan dapat memberikan tingkat cakupan yang masih dapat diterima. Sistem pemadam otomatis harus dirancang terintegrasi, tidak merusak bangunan, dan bersifat *reversible*. Sistem pemadam otomatis dapat dipasang dengan pendekatan ekspos, kamufase atau *concealed*. Dalam memasang sistem tanda keluar, dibutuhkan penilaian apakah suatu bangunan cagar budaya benar-benar membutuhkan tanda keluar apabila terjadi kebakaran. Apabila tanda keluar permanen terlalu memberi dampak pada signifikansi bangunan, dimungkinkan melakukan pendekatan alternatif, misalnya penggunaan tanda keluar yang tidak permanen atau *free standing sign*. Selain sistem proteksi, perlindungan terhadap bangunan cagar budaya dari bahaya kebakaran dapat dilakukan dengan manajemen keselamatan kebakaran. Manajemen keselamatan kebakaran dapat dibagi tahap pra kebakaran, saat kebakaran dan setelah kebakaran.

Dalam rangka membuat desain yang lebih fleksibel dengan biaya yang lebih efektif, terdapat pendekatan baru selain pendekatan preskriptif, yaitu pendekatan berbasis kinerja. Terdapat lima elemen utama dalam pendekatan berbasis kinerja yaitu tujuan (*goals*), sasaran (*objectives*), kriteria kinerja (*performance criteria*), skenario kebakaran, dan evaluasi. Kriteria kinerja disusun berdasarkan tujuan dan sasaran yang ingin dicapai dan dinyatakan dalam nilai yang dapat dikuantifikasi. Dalam kasus bangunan cagar budaya, terdapat dua kriteria kinerja yang diturunkan dari tujuan, yaitu kriteria kinerja keselamatan jiwa dan kriteria kinerja keselamatan bangunan.

Dalam kriteria kinerja keselamatan jiwa, prinsip utama adalah bahwa setiap penghuni memiliki cukup waktu untuk keluar dari bangunan ke tempat yang aman sebelum tercapainya kondisi tak tertahankan dari kebakaran. Dengan kata lain, dalam tujuan keselamatan jiwa konsep RSET lebih kecil dari ASET harus tercapai. RSET dapat dipengaruhi oleh jumlah penghuni, tingkat mobilitas penghuni, posisi awal, dan kondisi jalur evakuasi. Sedangkan ASET dipengaruhi oleh geometri ruang, sumber bahan bakar dan lokasi sumber penyalaan. Kondisi berbahaya bagi penghuni tercapai apabila temperatur udara di dalam ruangan mencapai 120 °C dan lapisan asap dan gas beracun sampai pada level 1,8 m dari atas lantai.

Bangunan cagar budaya dikatakan dalam kondisi berbahaya apabila efek dari kebakaran dapat menimbulkan kerusakan permanen. Waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya dapat ditentukan dengan menentukan batas efek termal yang menyebabkan perubahan pada material bangunan. Jika dilihat dari perubahan sifat material, kayu merupakan material yang paling cepat mengalami perubahan karena efek termal kebakaran. Pada bangunan kasus studi dengan material struktur utama kayu, waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya tercapai apabila temperatur mencapai 100 °C. Pada saat mencapai temperatur ini, material kayu akan mengalami potensi kerugian permanen dalam sifat mekanik akibat degradasi termal.

Metode pengukuran risiko dapat dilakukan dengan pemodelan. Pemodelan dapat dibagi menjadi beberapa macam antara lain model kebakaran (*fire model*), model evakuasi (*evacuation model*) dan model ketahanan (*tenability model*). Dalam mengukur RSET, pemodelan yang digunakan adalah model evakuasi. Salah satu model evakuasi yang tersedia untuk publik dan telah banyak digunakan adalah FDS+Evac. Model evakuasi FDS+Evac memiliki kelebihan karena seluruh proses pengambilan keputusan dilakukan secara otomatis oleh model. Dalam mengukur ASET dan waktu kondisi berbahaya bangunan cagar budaya, pemodelan yang digunakan adalah model kebakaran. Salah satu model kebakaran yang dapat digunakan adalah FDS dengan PyroSim sebagai *graphical user interface*.

Bangunan cagar budaya merupakan bangunan yang memiliki signifikansi budaya yang harus dilestarikan untuk generasi kini dan masa datang. Signifikansi budaya adalah nilai-nilai estetis, historis, ilmiah, sosial atau spriritual untuk generasi dahulu, kini, dan masa depan. Dalam mempertahankan signifikansi budaya bangunan cagar budaya, mungkin diperlukan sebuah perubahan. Perubahan yang mengurangi signifikansi budaya harus bersifat sementara dan dapat dikembalikan seperti semula apabila keadaan memungkinkan. Kebijakan dalam mengelola sebuah bangunan cagar budaya harus berdasar pada pemahaman akan signifikansi budaya. Terdapat urutan langkah-langkah yang harus dilakukan dalam menyusun kebijakan yaitu memahami signifikansi budaya dari sebuah bangunan dan mengidentifikasi faktor yang berpengaruh pada masa depan tempat tersebut.