



## Sistem manajemen asap di dalam mal, atrium dan ruangan bervolume besar



## Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata .....	ii
Pendahuluan .....	iv
1 Ruang lingkup .....	1
2 Acuan.....	1
3 Istilah dan definisi .....	1
4 Prinsip perancangan .....	4
4.1 Kebakaran pada ruangan bervolume besar, mal dan atrium.....	4
4.2 Kebakaran dalam ruangan yang berhubungan .....	4
4.3 Deteksi.....	5
4.4 Sistem pemadaman kebakaran .....	5
4.5 Kondisi pengoperasian .....	5
4.6 Analisis kondisi yang masih dapat dipertahankan ( <i>Tenability analysis</i> ) .....	5
4.7 Analisis jalan ke luar .....	6
5 Parameter perancangan .....	6
5.1 Umum .....	6
5.2 Luasan yang bocor .....	6
5.3 Data cuaca.....	6
5.4 Perbedaan tekanan .....	7
5.5 Kesimpulan .....	7
6 Pertimbangan perancangan .....	7
6.1 Pertimbangan dasar .....	7
6.2 Metodologi perancangan .....	7
6.3 Batasan rancangan.....	8
6.4 Pendekatan perancangan.....	11
6.5 Pengoperasian dan sistem manajemen asap.....	17
6.6 Keandalan sistem manajemen asap.....	18
7 Prosedur perhitungan .....	19
7.1 Pendahuluan.....	19
7.2 Kebakaran rancangan .....	23
7.3 Deteksi kebakaran dan penbgaktifan springkler.....	26
7.4 Stratifikasi asap .....	26
7.5 Sifat lapisan asap .....	28
7.6 Ketinggian dari indikasi pertama asap setiap saat.....	29
7.7 Posisi bidang pemisah lapisan asap dengan pengoperasian pembuangan asap ....	31
7.8 Laju produksi massa asap .....	32
7.9 Jumlah lubang pembuangan .....	38
7.10 Kedalaman minimum lapisan asap .....	39
7.11 Laju aliran volumetrik.....	39
7.12 Kecepatan maksimum pasokan udara .....	39
7.13 Persyaratan aliran udara berlawanan.....	39
8 Perlengkapan dan kontrol .....	40
8.1 Umum .....	40
8.2 Fan pembuangan.....	41
8.3 Sistem udara tambahan.....	41
8.4 Sistem-sistem kontrol .....	41
8.5 Layanan elektrik.....	42
8.6 Bahan .....	42
8.7 Sistem tata udara lainnya .....	43
9 Pengujian.....	43
9.1 Umum .....	43

**SNI 03-7012-2004**

9.2	Pengujian komponen sistem.....	43
9.3	Pengujian serah terima .....	44
9.4	Pengujian berkala .....	47
Lampiran A	.....	49
Lampiran B	.....	74
Lampiran C	Api t-kuadrat.....	90
Lampiran D	Rumus dalam pasal 7 dengan satuan SI .....	93
Lampiran E	Contoh soal untuk penggunaan rumus .....	97



## Prakata

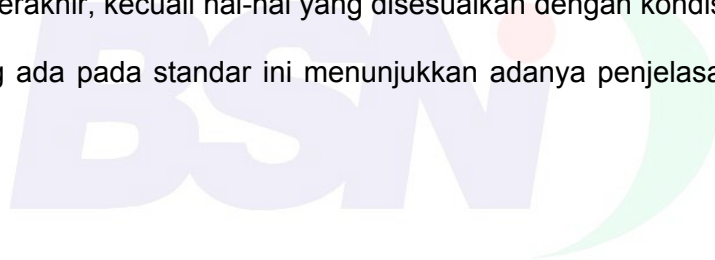
Standar Nasional Indonesia (SNI), Sistem manajemen asap di dalam mal, atrium dan ruangan bervolume besar, ini dirumuskan oleh Panitia Teknik 21S Konstruksi dan Bangunan. SNI ini mengambil acuan dari NFPA 92B, *Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas, 2000 Edition* yang dikeluarkan oleh *National Fire Protection Association*.

Dalam penyusunannya, SNI ini telah melalui beberapa rapat teknis, pra konsensus dan terakhir dibahas dalam konsensus pada tanggal 17 Juni 2003 yang dihadiri oleh wakil stakeholder.

Standar ini merupakan bentuk nyata aktualisasi dari Undang-Undang Republik Indonesia, Nomor 28, Tahun 2002, tentang Bangunan Gedung, khususnya yang menyangkut persyaratan keselamatan bangunan gedung.

Apabila dalam penerapan standar ini terdapat hal-hal yang meragukan, diharapkan dapat membandingkan secara langsung dengan substansi yang terdapat dalam acuan tersebut, atau dengan edisi yang terakhir, kecuali hal-hal yang disesuaikan dengan kondisi Indonesia.

Tanda \* pada butir yang ada pada standar ini menunjukkan adanya penjelasan yang lebih detail pada lampiran.



## Pendahuluan

Standar Nasional Indonesia (SNI), Sistem manajemen asap di dalam mal, atrium dan ruangan bervolume besar, disusun dalam rangka meningkatkan usaha pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung.

Pemerintah dan para *stakeholder* lain dari Asosiasi Profesi, Konsultan, Pemborong, Supplier, Pengelola Bangunan Gedung dan Perguruan Tinggi, telah bersepakat dalam konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 17 Juni 2003.

Diharapkan standar ini dapat dimanfaatkan oleh para perencana, pelaksana, pengawas dan pengelola bangunan gedung dalam menerapkan konsep-konsep sistem manajemen asap di dalam mal, atrium, dan ruangan bervolume besar, sehingga sasaran pencegahan bahaya kebakaran dapat tercapai.

Standar ini menyediakan (bagi pemilik, perancang, instansi pembuat ketentuan, dan instansi kebakaran), cara manajemen asap di dalam ruangan bervolume besar tanpa kompartemen. Standar ini membahas hal-hal berikut:

- (1) Masalah perpindahan asap di dalam ruangan.
- (2) Dasar perpindahan asap di dalam ruangan menurut ilmu fisika.
- (3) Metoda manajemen asap.
- (4) Data dan teknologi.
- (5) Peralatan dan kontrol dalam bangunan.
- (6) Metoda pengujian dan pemeliharaan.

Standar ini juga menyediakan petunjuk dalam mengimplementasikan sistem manajemen asap untuk mencapai satu atau lebih hal berikut:

- (a) Menjaga lingkungan yang aman pada sarana jalan ke luar dari ruangan bervolume besar dalam bangunan selama waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi.
- (b) Mengontrol dan mengurangi migrasi asap antara daerah kebakaran dan ruangan di sebelahnya.
- (c) Menyediakan kondisi di dalam dan di luar zona kebakaran untuk membantu petugas dalam keadaan darurat untuk mengadakan operasi pencarian dan penyelamatan dan dalam mencari dan mengontrol kebakaran.
- (d) Menambah proteksi terhadap jiwa dan mengurangi kerugian harta milik.
- (e) Membantu pembuangan asap pasca kebakaran.

Sasaran perancangan khusus, dapat ditentukan pada standar lain atau oleh instansi yang berwenang.

## Sistem manajemen asap di dalam mal, atrium dan ruangan bervolume besar

### 1\* Ruang lingkup

Standar ini menyediakan metodologi untuk memperkirakan lokasi asap di dalam ruangan bervolume besar, yang disebabkan oleh kebakaran dalam ruangan tersebut atau dalam suatu ruangan yang bersebelahan.

Metodologi ini meliputi dasar teknik untuk membantu perancangan, pemasangan, pengujian, pengoperasian, dan pemeliharaan dari sistem manajemen asap yang baru atau pembaharuan (*retrofit*) yang dipasang dalam bangunan yang mempunyai ruangan bervolume besar untuk manajemen asap di dalam ruangan yang terjadi kebakaran atau antara ruangan yang tidak dipisahkan oleh penghalang asap.

Bangunan yang termasuk di dalam lingkup standar ini adalah atrium, mal tertutup, dan ruangan bervolume besar yang sejenis (lihat SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap kebakaran pada bangunan gedung).

Standar ini tidak ditujukan untuk gudang, fasilitas manufaktur, atau ruangan serupa lainnya. Standar ini tidak menyediakan metodologi untuk menilai pengaruh asap terhadap orang, harta milik ataupun kelangsungan usaha atau proses.

Pendekatan aljabar untuk manajemen asap yang terkandung dalam standar ini semuanya mengasumsikan pembuangan asap akan dilakukan dengan sarana mekanik.

Dalam beberapa situasi, dimungkinkan untuk membuang asap dengan pelepasan alami. Kapasitas sistem pelepasan alami untuk membuang asap melalui sebuah lubang adalah fungsi dari kedalaman dan temperatur lapisan panas. Prosedur untuk menentukan kapabilitas dari pelepasan alami dapat dibaca pada standar lain yang diakui masyarakat profesi atau standar dari negara lain seperti misalnya *NFPA 204 Guide for Smoke and Heat Venting, for gravity venting*). Apabila dipertimbangkan akan dipergunakan sistem pelepasan alami sebaiknya dipakai prosedur dalam dokumen tersebut.

Umumnya, sistem pelepasan alami dan sistem pembuangan mekanik sebaiknya tidak digunakan dalam kombinasi untuk ruangan yang sama tanpa pemodelan yang komprehensif dari situasi tersebut untuk memastikan bahwa sistem pelepasan alami tidak akan kehilangan efisiensi atau bahkan dibalikkan oleh sistem pembuangan mekanik.

### 2 Acuan

NFPA 92B, *Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas*, 2000 edition, National Fire Protection Association.

### 3 Istilah dan definisi

Untuk tujuan standar ini, istilah dan definisi berikut mempunyai pengertian seperti dijelaskan pada pasal ini.

#### 3.1

##### atrium

ruangan bervolume besar yang terbentuk oleh satu bukaan lantai atau bukaan lantai yang berturutan menghubungkan dua atau lebih lantai yang tertutup pada puncak bukaan, dan bukan dipakai untuk ruang tangga yang tertutup, ruang luncur lif, bukaan eskalator, atau saf utilitas yang dipakai untuk plambing, listrik, pengkondisian udara atau fasilitas komunikasi

**3.2\***

**aliran asap langit-langit (*ceiling jet*)**

aliran asap di bawah langit-langit yang menyebar secara radial dari titik benturan cendawan kebakaran (*fire plume*) pada langit-langit

**3.3\***

**ruangan yang berhubungan**

ruangan di dalam bangunan yang mempunyai jalur lintasan terbuka ke sebuah ruangan bervolume besar sedemikian sehingga asap suatu kebakaran dapat berpindah dari satu ruang ke ruang lainnya tanpa hambatan

**3.4**

**mal tertutup**

daerah di dalam bangunan yang tertutup atau beratap dipakai sebagai jalur pejalan kaki dan dihubungkan ke sebuah bangunan atau lebih, atau bagian dari sebuah bangunan dengan satu atau lebih penghuni

**3.5**

**verifikasi menyeluruh**

metoda pengujian sendiri yang memberikan konfirmasi positif di mana hasil diinginkan telah tercapai (misalnya, aliran udara atau posisi damper) apabila alat yang dikontrol diaktifkan, seperti ketika operasi pengendalian asap, pengujian, atau mengalihkan kontrol ke manual (*manual override*). Kegagalan atau penghentian konfirmasi positif seperti itu memberikan indikasi di luar normal

**3.6\***

**indikasi pertama dari asap**

batas antara zona transisi dan udara bebas asap. Rumus (3) dan (4) dipakai untuk memprediksi ketinggian batas ini untuk pengisian asap tanpa beroperasinya alat pembuangan mekanik

**3.7**

**petunjuk**

suatu dokumen yang bersifat memberi saran atau informasi dan hanya berisi ketentuan yang tidak wajib. Suatu petunjuk mungkin saja berisi pernyataan yang bersifat wajib, seperti kapan petunjuk dapat dipakai, tetapi dokumen ini secara keseluruhan tidak sesuai untuk diadopsi kedalam ketentuan hukum

**3.8\***

**ruangan bervolume besar**

ruangan yang tidak terkompartemen, umumnya berketinggian dua lantai atau lebih, di dalam mana asap dari suatu kebakaran dalam ruangan atau ruangan yang berhubungan dapat bergerak dan menumpuk tanpa hambatan

**3.9**

**penyumbatan lubang buangan (*plugholing*)**

kondisi di mana udara dari bawah lapisan asap tertarik menembus lapisan asap akibat laju pembuangan yang tinggi, sehingga menghambat pembuangan asap

**3.10**

**ruangan terpisah**

ruangan di dalam bangunan yang terpisah oleh penghalang asap dari ruangan bervolume besar oleh penghalang asap, yang tidak bergantung pada aliran udara untuk membatasi perpidahan asap



**3.11****asap**

partikel padat atau cair yang melayang di udara dan gas yang ditimbulkan bila suatu bahan mengalami pirolisa atau pembakaran, bersama-sama dengan sejumlah udara yang terikutkan atau tercampur ke dalam massa tersebut

**3.12****penghalang asap**

membran menerus, vertikal atau horisontal, seperti dinding, lantai atau rakitan langit-langit, yang dirancang dan dibangun untuk menghalangi perpindahan asap. Penghalang asap mungkin mempunyai atau tidak mempunyai tingkat ketahanan api. Penghalang seperti itu mungkin mempunyai bukaan terproteksi

**3.13****damper asap**

suatu alat yang memenuhi persyaratan yang berlaku, dirancang untuk menahan aliran udara atau asap. Suatu damper kombinasi untuk kebakaran dan asap sebaiknya memenuhi persyaratan yang berlaku

**3.14****lapisan asap**

ketebalan asap yang terkumpul di bawah suatu penghalang fisik atau termal. Lapisan asap tidak mempunyai campuran yang homogen, dan juga tidak mempunyai temperatur yang merata. Metoda perhitungan dalam Standar ini mungkin mengasumsikan kondisi campuran yang homogen. Lapisan asap mencakup zona transisi yang tidak homogen dan memisahkan lapisan atas yang panas dari udara bebas asap

**3.15****bidang pemisah lapisan asap**

batas teoretik antara lapisan asap dan udara bebas asap, ditunjukkan dalam gambar A.1 Dalam kenyataannya, bidang pemisah lapisan asap tersebut adalah suatu batas efektif, di dalam zona penyangga transisi yang tebalnya dapat mencapai beberapa *feet*. Di bawah batas efektif ini, densitas asap dalam zona transisi berkurang sampai nol. Ketinggian ini digunakan dalam penerapan rumus (8), (9), (10) dan (15) pada standar ini

**3.16****sistem manajemen asap**

sistem keteknikan yang meliputi semua cara yang dapat dipakai secara sendiri-sendiri atau bersama untuk memodifikasi pergerakan asap

**3.17****efek cerobong**

aliran udara vertikal di dalam bangunan yang disebabkan oleh perbedaan densitas akibat temperatur antara bagian dalam bangunan dan bagian luar bangunan atau antara dua ruangan di bagian dalam

**3.18****lingkungan yang masih dapat dipertahankan (*tenable environment*)**

lingkungan di mana asap dan panas dibatasi atau dengan kata lain dihalangi untuk menjaga pengaruh terhadap penghuni pada suatu tingkatan yang tidak mengancam jiwa

**3.19\*****zona transisi**

lapisan antara bidang pemisah lapisan asap dan indikasi pertama asap di mana temperatur lapisan asap menurun sampai temperatur ambien

## 4 Prinsip perancangan

### 4.1 Kebakaran pada ruangan bervolume besar, mal dan atrium

4.1.1 Asap yang dihasilkan dari kebakaran dalam ruangan besar dan terbuka diasumsikan mengapung, naik seperti cendawan di atas api dan membentur langit-langit atau membentuk stratifikasi yang disebabkan inversi temperatur. Setelah asap membentur langit-langit atau membentuk stratifikasi, ruangan dapat diharapkan mulai terisi dengan asap dengan bidang pemisah lapisan asap bergerak turun. Laju menurunnya bidang pemisah lapisan asap tergantung pada laju pasokan asap dari cendawan asap ke lapisan asap. Pengisian asap seperti itu ditunjukkan oleh model dua-zona di dalam mana ada bidang pemisah yang jelas antara dasar dari lapisan asap dan udara ambien. Untuk tujuan perhitungan, laju pasokan asap dari cendawan asap dapat diperkirakan sama dengan laju udara terikutkan ke dalam cendawan asap di bawah bidang pemisah lapisan asap. Springkler dapat mengurangi laju pelepasan kalor dan laju udara ikutan ke dalam cendawan asap.

4.1.2 Pendekatan model zona mengasumsikan sifat asap yang seragam (konsentrasi dan temperatur asap) dari titik bidang permukaan sampai langit-langit dan dalam arah horisontal keseluruhan lapisan asap.

4.1.3 Suatu posisi keseimbangan untuk bidang pemisah lapisan asap dapat dicapai dengan laju pembuangan asap yang sama dengan yang dipasok ke lapisan asap. Pembuangan asap dapat juga memperlambat laju penurunan lapisan asap.

4.1.4 Apabila lapisan asap telah turun sampai ke ketinggian ruangan bersebelahan yang berpenghuni, pencegahan migrasi asap dari atrium atau mal ke ruangan sebelahnya dapat dicapai dengan penghalang fisik atau aliran udara berlawanan.

SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap kebakaran pada bangunan gedung, menyediakan standar penggunaan dinding untuk menahan migrasi asap. Aliran udara yang berlawanan dapat digunakan untuk menghalangi migrasi asap ke dalam ruangan bersebelahan yang terbuka, dengan pasokan udara dari dalam ruangan yang bersebelahan. Laju volumetrik pasokan udara yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan yang diperlukan dapat menjadi sangat besar.

4.1.5 Agar fan pembuang asap menjadi efektif, udara tambahan harus disediakan. Udara tambahan sebaiknya disediakan dengan kecepatan rendah. Untuk manajemen asap yang efektif, aliran udara tambahan harus cukup terbaur sehingga tidak mempengaruhi nyala api, cendawan asap, atau bidang pemisah asap. Titik pasokan untuk udara tambahan sebaiknya ditempatkan di bawah bidang pemisah asap. Laju aliran udara tambahan sebaiknya tidak melebihi laju pembuangan sedemikian hingga atrium atau mal mencapai tekanan positif relatif terhadap ruangan yang bersebelahan. Jika udara masuk lapisan asap di atas bidang pemisah, maka harus diperhitungkan untuk pembuangan.

### 4.2 Kebakaran dalam ruang yang berhubungan

Kebakaran dalam ruang yang berhubungan dapat menghasilkan gas-gas ringan yang meluap ke dalam ruangan besar. Perancangan untuk kasus ini analog dengan perancangan kebakaran untuk ruangan yang besar.

Namun demikian, perancangan harus mempertimbangkan perbedaan perilaku terikutnya udara, antara asap cendawan bebas (*free plume*) dan asap cendawan luapan (*spill plume*). Apabila ruangan yang berhubungan diproteksi dengan springkler otomatis, maka perhitungan dalam Standar ini mungkin memberikan indikasi bahwa tidak diperlukan pelepasan tambahan. Sebagai alternatif, tanpa memperhatikan apakah ruangan yang berhubungan diproteksi springkler atau tidak, asap dapat dicegah meluap ke dalam ruangan yang besar, kalau ruangan yang berhubungan diberi pembuangan dengan laju aliran yang

cukup agar menimbulkan aliran udara dengan kecepatan cukup ke dalam ruangan yang berhubungan, melalui bukaan yang menghubungkannya dengan ruangan besar.

### 4.3 Deteksi

Perancangan yang efektif untuk sistem manajemen asap mensyaratkan deteksi dini asap.

### 4.4 Sistem pemadaman kebakaran

**4.4.1\*** Sistem pemadaman kebakaran otomatis dirancang untuk membatasi laju pembakaran massa bahan bakar dan oleh karena itu akan membatasi laju pembentukan asap. Dengan membatasi laju pembakaran massa bahan bakar, pembentukan asap akan berkurang. Kebakaran dapat dikurangi secara efektif di dalam ruangan bersprinkler yang berdekatan dengan daerah pejalan kaki di dalam atrium dan mal tertutup, juga dapat secara efektif mengurangi pengaruhnya pada daerah pejalan kaki dari atrium dan di dalam mal tertutup dan dengan demikian meningkatkan *viability* sistem manajemen asap.

**4.4.2\*** Kemungkinan pengaktifan sprinkler bergantung pada banyak faktor, termasuk besarnya laju pelepasan kalor kebakaran dan ketinggian langit-langit. Jadi untuk ukuran kebakaran sedang, pengoperasian sprinkler kemungkinan besar akan terjadi dalam waktu yang wajar di dalam ruangan dengan langit-langit yang rendah, misalnya 2,4 m sampai 7,6 m. Pengaktifan sprinkler dekat kebakaran menyebabkan asap menjadi lebih dingin, mengakibatkan berkurangnya daya apungnya. Berkurangnya daya apung ini dapat menyebabkan asap turun dan mengurangi jarak pandang. Rumus di dalam pasal 3 yang menerangkan pengisian asap (Rumus 3 dan Rumus 4) dan pembentukan asap (Rumus 8, 9, 10, dan 15) tidak berlaku apabila terjadi kehilangan daya apung akibat beroperasinya sprinkler.

**4.4.3\*** Pengaktifan sprinkler dalam ruang yang bersebelahan dengan suatu atrium mengakibatkan pendinginan asap. Pada kebakaran dengan laju pelepasan kalor rendah, temperatur asap yang keluar dari kompartemen hampir sama dengan temperatur udara ambien sehingga asap akan disebarkan ke dalam ruangan besar pada ketinggian bukaan. Pada kebakaran dengan laju pelepasan kalor tinggi, temperatur asap yang keluar dari kompartemen lebih tinggi dari temperatur udara ambien sehingga asap mengapung.

### 4.5 Kondisi pengoperasian

Komponen sistem manajemen asap sebaiknya mampu untuk digunakan secara terus menerus pada temperatur maksimum yang diperkirakan dengan menggunakan perhitungan pada standar ini.

### 4.6 Analisis kondisi yang masih dapat dipertahankan (*Tenability analysis*)

Apabila perancangan sistem manajemen asap ditujukan untuk menjaga kondisi yang masih dapat dipertahankan pada suatu bagian ruangan, dapat ditempuh salah satu pendekatan. Yang pertama, perancangan dapat dibuat untuk mencegah terbentuknya lapisan asap pada bagian ruangan tsb. Yang kedua, perancangan dapat dibuat dengan membandingkan kualitas lapisan asap yang terbentuk dengan nilai ambang bahaya. Analisa seperti ini perlu mengevaluasi pengaruh asap terhadap manusia. Faktor kondisi yang dapat dipertahankan yang perlu dipertimbangkan termasuk tetapi tidak terbatas pada:

- (1) ekspos terhadap panas (*heat exposure*)
- (2) sifat racun dari asap (*smoke toxicity*)
- (3) jarak pandang (*visibility*)

Analisis kondisi yang masih dapat dipertahankan tidak termasuk lingkup standar ini. Ada beberapa referensi yang menyajikan metoda analisis yang masih dapat dipertahankan.

### 4.7 Analisis jalan ke luar

Jika perancangan sistem manajemen asap didasarkan pada keluarnya penghuni dari ruangan sebelum terekspos kepada asap atau sebelum ambang batas yang dapat dipertahankan dilampaui, harus dilakukan analisa waktu jalan ke luar untuk ruangan tersebut. Analisis waktu jalan ke luar ruangan tidak termasuk lingkup standar ini. Beberapa referensi menyajikan metoda analitik untuk analisa jalan ke luar {Pauls (1995), Nelson dan MacLennan (1955)}.

## 5 Parameter perancangan

### 5.1 Umum

Kriteria perancangan sebaiknya mencakup kesepakatan dengan instansi yang berwenang tentang kinerja sistem yang diharapkan dan prosedur uji terima (*acceptance test*).

### 5.2 Luasan yang bocor

Kriteria perancangan dan uji terima dari sistem manajemen asap sebaiknya didasarkan pada pertimbangan berikut untuk zona yang berhubungan.

- (1) Bukaannya kecil pada penghalang asap, seperti sambungan konstruksi, retak, celah pada pintu yang tertutup, dan celah serupa, sebaiknya diperhatikan dalam hal mempertahankan perbedaan tekanan yang cukup diseberang penghalang asap, dengan tekanan positif di luar zona asap (lihat SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap kebakaran pada bangunan gedung).
- (2) Bukaannya besar pada penghalang asap, seperti pintu yang terbuka dan bukaan besar lainnya, sebaiknya diperhatikan dalam hal mempertahankan kecepatan udara yang cukup melalui bukaan, dengan arah aliran ke dalam zona asal kebakaran.

### 5.3 Data cuaca

Perbedaan temperatur antara bagian luar dan bagian dalam bangunan menyebabkan efek cerobong dan menentukan arah dan besarnya efek cerobong. Efek cerobong harus dipertimbangkan dalam memilih fan pembuangan. Pengaruh temperatur dan kecepatan angin bergantung pada ketinggian gedung, konfigurasi, kebocoran, dan bukaan pada dinding dan konstruksi lantai.

### 5.4 Perbedaan tekanan

Perbedaan tekanan maksimum dan minimum yang diijinkan diseberang batas zona pengendalian asap sebaiknya dipertimbangkan (lihat SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap kebakaran pada bangunan gedung). Gaya maksimum untuk membuka pintu tidak boleh melebihi persyaratan pada SNI 03-1746-2000, Tata cara perencanaan dan pemasangan sarana jalan ke luar untuk penyelamatan terhadap bahaya kebakaran pada bangunan gedung, atau persyaratan dan peraturan setempat.

Perbedaan tekanan minimum sebaiknya sedemikian sehingga tidak akan terjadi kebocoran asap yang berarti selama evakuasi. Kinerja dari sistem dipengaruhi gaya angin, efek cerobong, dan daya apung asap panas pada waktu kebakaran.

## 5.5 Kesimpulan

Sasaran perancangan yang dikandung dalam pasal 1 dapat dipenuhi oleh berbagai metodologi. Beberapa metoda tersebut dijelaskan pada pasal 6.

## 6 Pertimbangan perancangan

### 6.1 Pertimbangan dasar

Pemilihan berbagai tujuan dan metoda perancangan sistem manajemen asap bergantung pada sasaran proteksi, seperti misalnya melindungi jalur jalan keluar, menjaga kondisi daerah pengungsian, menyediakan akses bagi regu pemadam kebakaran, atau melindungi harta milik.

Hal berikut ini perlu dipertimbangkan:

- (1) Ketinggian, luas potongan melintang, dan luas dasar dari ruangan bervolume besar yang harus diproteksi.
- (2) Jenis dan lokasi hunian di dalam dan yang berhubungan dengan ruangan bervolume besar tersebut.
- (3) Penghalang, jika ada, yang memisahkan ruang yang berhubungan dengan ruang bervolume besar tersebut.
- (4) Jalur jalan keluar dari ruangan bervolume besar tersebut dan dari ruangan yang berhubungan dengannya.
- (5) Tempat berlindung
- (6) Besar api rancangan (*Design basis fire*) yang digunakan untuk menghitung laju pembentukan asap (lihat butir 7.2.5). (Analisis harus mencakup jenis, lokasi dan jumlah bahan bakar; sarana pemadaman otomatis; dan ventilasi ).

### 6.2 Metodologi perancangan

Pada umumnya, tujuan perancangan mencakup manajemen asap dalam ruang bervolume besar dan setiap ruangan yang berhubungan dengannya. Sumber asap dapat berasal dari kebakaran dalam ruangan bervolume besar tersebut atau dari dalam ruangan yang berhubungan dengannya. Berikut ini adalah contoh-contoh tujuan perancangan tersebut:

- (1) Menjaga kondisi lingkungan yang dapat dipertahankan dalam semua akses exit dan akses menuju tempat berlindung, selama waktu yang cukup agar penghuni dapat mencapai exit atau tempat berlindung .
- (2) Menjaga bidang pemisah lapisan asap pada suatu ketinggian yang ditentukan
- (3) Memberikan peluang petugas pemadam kebakaran untuk mendekati, menemukan dan memadamkan kebakaran.
- (4) Membatasi kenaikan temperatur dan konsentrasi gas beracun dalam lapisan asap, serta membatasi penurunan jarak pandang.

### 6.3 Batasan rancangan

#### 6.3.1 Kedalaman akumulasi asap

Laju penurunan lapisan asap dalam ruangan bervolume besar hanya sedikit berhubungan dengan laju pelepasan kalor kebakaran. Sebaliknya, penurunan lapisan asap erat kaitannya dengan ketinggian ruangan dan luas penampang lintang dari ruang bervolume besar yang dimaksud. Perhitungan yang cermat, dengan menggunakan rumus dan metodologi dalam standar ini, dibutuhkan dalam setiap situasi di mana tujuannya adalah untuk menyediakan sistem manajemen asap dengan menggunakan volume tidak terbang, misalnya ruangan pengumpulan asap.

Kedalaman asap rancangan minimum ditentukan baik melalui ketebalan dari aliran asap langit-langit (*ceiling jet*) dan kedalaman yang diperlukan untuk mencegah penyumbatan lubang buangan (*plugholing*). Untuk alasan-alasan ini, rancangan tidak boleh didasarkan pada tujuan menjaga ketinggian lapisan asap pada titik yang lebih tinggi dari aliran asap di bawah langit-langit (*ceiling jet*) atau lebih tinggi dari titik eliminasi penyumbatan lubang buangan (*plugholing*), tergantung mana yang lebih rendah.

Ketebalan aliran asap langit-langit (*ceiling jet*) dilaporkan dalam penelitian oleh Beyler (1986) antara 10% hingga 20% dari jarak antara sumber kebakaran dengan puncak ruangan.

Penyumbatan lubang buangan (*Plugholing*) adalah kondisi dimana udara di bawah bidang pemisah lapisan asap terhisap melalui suatu lapisan asap yang relatif tipis akibat suatu laju pembuangan yang besar pada titik tersebut. Dampak penyumbatan lubang buangan (*plugholing*) dapat dikendalikan (lihat butir 3.9)

### **6.3.2 Terganggunya bidang pemisah lapisan asap**

Setiap faktor yang menyebabkan meningkatnya turbulensi di dalam atau meningkatnya laju aliran massa ke dalam lapisan asap atau pada bidang pemisah lapisan asap dapat mempengaruhi lapisan asap. Faktor-faktor tersebut diantaranya adalah :

- (1) Pengoperasian sprinkler otomatis di atas bidang pemisah lapisan asap dapat menyeret asap ke bawah bidang pemisah lapisan asap
- (2) Arus udara kuat, yang berasal dari sistem tata udara atau elemen dari sistem manajemen asap, yang dikeluarkan dekat dengan lapisan asap dapat mengganggu bidang pemisah lapisan asap tersebut sehingga menyebabkan asap turun di bawah bidang pemisah lapisan asap.
- (3) Arus udara yang lebih besar dari 61 m/menit yang membentur cendawan asap di bawah bidang pemisah lapisan asap dapat menyebabkan cendawan asap tersebut belok dan meningkatkan laju ikutan udara, yang mengakibatkan asap turun di bawah ketinggian yang diperhitungkan melalui rumus-rumus dalam standar ini. Perlu dianalisa lokasi beban bahan bakar, potensi cendawan asap dari beban bahan bakar tersebut, penempatan titik-titik pasokan, dan kecepatan arus udara pada titik-titik pasokan relatif terhadap lokasi cendawan asap.
- (4) Aliran udara yang mendorong ke atas, yang berada di bawah bidang pemisah lapisan asap dan yang mempunyai cukup momentum untuk mencapai lapisan asap dapat menyebabkan pencampuran turbulen yang mengganggu bidang pemisah dan menambah massa ke dalam lapisan asap, akan menyebabkan lapisan turun di bawah bidang pemisah
- (5) Udara yang dialirkan paksa atau diinduksikan ke dalam lapisan asap selain oleh cendawan asap akan meningkatkan jumlah massa dalam lapisan atas, dan akan menyebabkan lapisan asap turun di bawah ketebalan rancangan kecuali jika dikompensasikan dalam rancangan sistem manajemen asap.

### **6.3.3 Pertimbangan khusus berkaitan dengan pelepasan alami**

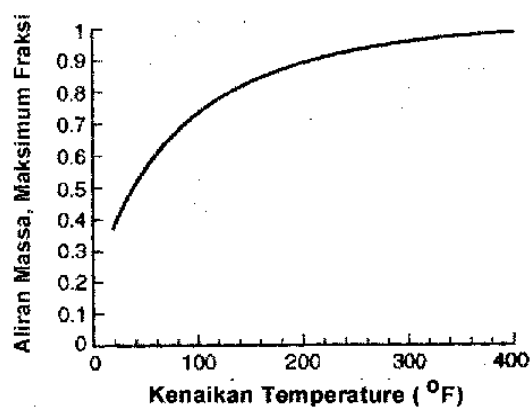
Kemampuan gaya apung (*buoyant forces*) untuk mendorong asap melewati sebuah lubang pelepasan alami merupakan fungsi dari kedalaman dan temperatur lapisan panas. Aliran massa yang disebabkan gaya gravitasi melalui lubang pelepasan meningkat sejalan dengan peningkatan kedalaman dan peningkatan temperatur. Metodologi penaksiran aliran massa melalui suatu lubang pelepasan dapat dibaca dalam dokumen *NFPA204 Guide for Smoke and Heat Venting* .

Pada umumnya, ventilasi alami dan mekanis tidak kompatibel satu dengan lainnya apabila digunakan untuk melayani volume udara yang sama. Terdapat potensi hubung singkat aliran udara yang signifikan dengan mana arah aliran udara melalui lubang pelepasan alami terbalik dan menjadi sumber udara untuk pembuangan mekanis. Setiap rancangan yang mempertimbangkan gabungan sistem pelepasan alami dan pembuangan mekanik tersebut

memerlukan analisis teknik atau pemodelan fisik (skala) yang seksama untuk memastikan rancangan akan berfungsi seperti yang dimaksudkan.

Pada rancangan yang bergantung pada pelepasan alami perlu dievaluasi potensi kondisi angin di lingkungan gedung, termasuk pertimbangan dampak bagian bangunan atau struktur lainnya berdekatan yang dapat menyebabkan tiupan ke bawah (*down drafts*).

Massa asap mempunyai hubungan yang lemah dengan laju pelepasan kalor dari kebakaran, sedang perubahan temperatur lapisan asap hampir berkaitan langsung dengan laju pelepasan kalor. Akibatnya, suatu kebakaran yang secara signifikan lebih kecil daripada kebakaran rancangan hanya akan menghasilkan lapisan asap bertemperatur rendah, dengan laju aliran massa yang lebih kecil dibanding yang dihasilkan oleh kebakaran rancangan. Namun, untuk kebakaran kecil diperlukan aliran pembuangan dengan pelepasan alami yang lebih kecil.



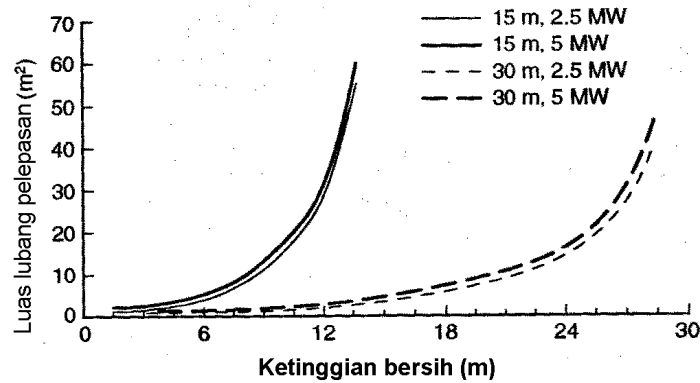
**Gambar 1(a) Efisiensi laju aliran masa melalui lubang pelepasan alami**

Gambar 1(a) merupakan suatu evaluasi dari efisiensi laju aliran massa melalui lubang pelepasan alami di mana temperatur ruangan sama dengan temperatur luar. Gambar tersebut diformulasikan dengan mempertahankan semua parameter konstan kecuali kenaikan temperatur lapisan asap.

Meskipun gambar 1(a) menunjukkan suatu pengurangan nyata dalam efisiensi pelepasan alami, dengan kebakaran kecil yang menimbulkan kenaikan yang tidak terlalu besar pada temperatur lapisan asap, suatu kebakaran kecil juga menghasilkan asap yang lebih sedikit, karenanya membutuhkan pelepasan alami yang lebih kecil.

Milke dan Klote [1998] mengevaluasi pengaruh berbagai output kalor kebakaran pada luas lubang pelepasan alami yang diperlukan untuk menjaga ketinggian bersih tertentu. Analisis ini mengindikasikan bahwa luas lubang pelepasan alami yang diperlukan secara relatif tidak sensitif terhadap output kalor kebakaran.

Gambar 1(b), dari analisis Milke dan Klote [1998] menggambarkan luas lubang pelepasan alami yang diperlukan untuk mempertahankan berbagai ketinggian bidang pemisah lapisan asap untuk besar kebakaran dan tinggi langit-langit yang ditentukan.

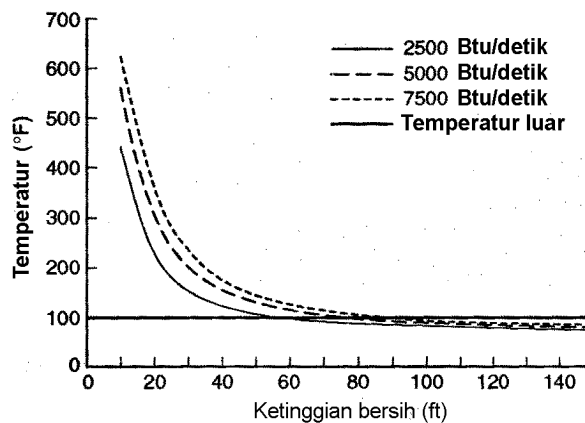


**Gambar 1(b) Luas lubang pelepasan yang diperlukan untuk menjaga tinggi bersih**

Efektifitas pelepasan alami dapat berkurang secara nyata atau bahkan lenyap jika temperatur udara luar tinggi. Sebuah skenario yang perlu perhatian khusus melibatkan suatu kebakaran yang terjadi dalam suatu ruangan dengan temperatur dalam ruangan lebih rendah daripada temperatur luar (sebagai contoh, kondisi musim panas untuk suatu atrium dengan pengkondisian udara).

Sementara asap mungkin lebih ringan relatif terhadap udara dalam ruangan dan mengapung menuju langit-langit, pada saat lubang pelepasan alami terbuka, udara luar akan memasuki bangunan apabila temperatur udara luar lebih tinggi daripada temperatur lapisan asap. Dalam keadaan seperti itu, tidak ada asap yang dibuang keluar dan bidang pemisah lapisan asap dapat turun.

Sebuah contoh keterbatasan pelepasan alami akibat temperatur udara luar diperlihatkan pada gambar 1(c). Dalam contoh ini, diasumsikan udara luar bertemperatur 38°C. Hubungan antara temperatur lapisan asap dengan tinggi bersih ditentukan oleh persamaan peningkatan temperatur ( $\Delta T$ ) dalam lapisan atas dari suatu kebakaran dengan pelepasan alami (lihat tabel 3) , untuk tiga kasus kebakaran dengan laju pelepasan kalor yang berbeda. Bila temperatur lapisan asap lebih rendah dari temperatur udara luar, tidak akan terjadi pengeluaran asap seperti yang diharapkan.



**Gambar 1(c) Keterbatasan lubang pelepasan alami akibat temperatur luar**



Pada situasi seperti itu, pelepasan alami bukan suatu metoda manajemen asap yang cocok untuk suatu kebakaran rancangan 2500 Btu/detik (78 kW) di mana rancangan tinggi bebas lebih dari 60 ft (18 meter). Demikian pula, tinggi bebas lebih dari 80 ft (24m) dan 90 ft (27 m) tidak dapat dipenuhi dengan pelepasan alami untuk kebakaran rancangan 5000 Btu/detik dan 7500 Btu/detik (155kW dan 233kW).

#### 6.4 Pendekatan perancangan

Pilihan rancangan yang tersedia untuk suatu rancangan sistem manajemen asap bergantung pada ruangan dalam mana akan diterapkan sistem manajemen asap dan ruangan di mana asap berasal, seperti yang dijelaskan dalam butir 6.4.1 dan 6.4.2. Metoda perancangan, jika ada, perlu dipertimbangkan untuk membuang asap dari suatu ruangan (pembuangan mekanik atau alami) atau untuk menampung asap dalam suatu ruangan (metoda aliran udara atau presurisasi udara).

##### 6.4.1 Pengelolaan asap dalam ruang bervolume besar

Terdapat sejumlah metoda yang layak digunakan untuk manajemen asap dari suatu sumber kebakaran dalam ruangan bervolume besar. Tabel 1 berisikan ringkasan pertimbangan dasar perancangan masing-masing metoda, yang meliputi:

- (1) Penggunaan ruang bervolume besar sebagai suatu penampungan asap dan pemodelan penurunan lapisan asap untuk menentukan apakah bidang pemisah lapisan asap mencapai suatu ketinggian di mana penghuni terekspos asap sebelum mereka dapat menyelamatkan diri ke luar dari ruangan.
- (2) Membuang asap dari ruang bervolume besar dengan menggunakan sistem pembuangan mekanik dengan kapasitas yang mencukupi untuk menjaga bidang pemisah lapisan asap dalam ruangan pada ketinggian yang telah ditentukan untuk waktu yang tidak terbatas.
- (3) Membuang asap dari ruangan bervolume besar dengan menggunakan sistem pembuangan mekanik dengan kapasitas yang mampu memperlambat laju penurunan lapisan asap selama waktu tertentu untuk memungkinkan penghuni ke luar dengan aman dari ruangan tersebut.

Tabel 1 Metoda pengendalian asap untuk ruang bervolume besar

Pendekatan	Kebakaran rancangan	Rumus aljabar untuk perhitungan transportasi asap	Perhitungan perpindahan penghuni
Analisa pengisian asap terhadap waktu jalan ke luar	<i>Steady</i> (mantap)	Rumus (3)	Diperlukan
	<i>Unsteady</i> (tidak mantap)	Rumus (4)	Diperlukan
Pembuangan asap mekanik untuk memperoleh ketinggian lapisan asap konstan	<i>Steady</i> (mantap)	Rumus (8), (9), (10) dan (15)	Tidak perlukan
Analisa pembuangan asap mekanik terhadap waktu jalan ke luar	<i>Steady</i> (mantap)	Rumus (8), (9), (10) dan (15)	Diperlukan
	<i>Unsteady</i> ( tidak mantap)	Rumus (8), (9), (10) dan (15)	Diperlukan
Pelepasan alami terhadap tinggi lapisan asap konstan (*)	<i>Steady</i> (mantap)	Lihat NFPA 204	Tidak perlu
Analisa pelepasan alami terhadap waktu jalan ke luar	<i>Steady</i> (mantap)	Lihat NFPA 204	Perlu
	<i>Unsteady</i> (tidak mantap)	Lihat NFPA 204	Perlu

(\*) Suatu kebakaran *unsteady* (tidak mantap) tidak berlaku untuk pendekatan ini karena hanya kebakaran *steady* (mantap) yang menghasilkan suatu tinggi lapisan asap konstan.

- (4) Menyediakan pelepasan alami yang cukup untuk mempertahankan bidang pemisah lapisan asap pada ketinggian yang telah ditentukan untuk waktu yang tidak terbatas.
- (5) Menyediakan pelepasan alami yang cukup untuk memperlambat laju penurunan ketinggian lapisan asap selama waktu tertentu untuk memungkinkan penghuni ke luar dengan aman dari ruangan tersebut.

Perhitungan aljabar hanya didiskusikan untuk masing-masing pendekatan perancangan yang terdapat dalam tabel 1. Pemodelan skala, pemodelan kompartemen (model zona), atau pemodelan komputasi dinamika fluida (CFD) dapat digunakan untuk mendemonstrasikan masing-masing metoda seperti yang ditunjukkan dalam bagian lain dari standar ini.

#### 6.4.1.1 Analisis pengisian asap terhadap waktu jalan ke luar

Suatu metoda untuk membuang asap dari suatu ruangan bervolume besar tidak diperlukan jika dapat didemonstrasikan bahwa penghuni mampu ke luar dengan aman sebelum lapisan asap turun ke suatu ketinggian di mana penghuni terekspos asap. Ekspos dapat diartikan persyaratan terdapatnya asap atau kondisi yang dipertahankan dari lingkungan terhadap mana penghuni terekspos.

Suatu perkiraan konservatif dari posisi lapisan asap adalah indikasi pertama dari asap, seperti yang diperlihatkan dalam gambar A.1, dan seperti yang dihitung dengan menggunakan rumus (3) dan (4) yang diturunkan dalam butir 3.6 secara empirik. Rumus (3) berlaku bagi kebakaran *steady* (mantap) dan rumus (4) bagi kebakaran *unsteady* (tidak mantap), seperti yang dijelaskan dalam butir 7.2. Rumus (3) dan (4) secara implisit memperhitungkan keterlambatan transportasi asap dikaitkan dengan pergerakan asap dari kebakaran ke dalam lapisan atas.

Rumus (3) tidak dapat dikombinasikan dengan rumus (4) untuk menghitung penurunan ketinggian lapisan asap pada kebakaran yang membesar dengan maksimum suatu keadaan *steady* (mantap). Masing-masing rumus ini diturunkan secara empirik dan tidak dapat digunakan secara kombinasi dengan lainnya. Perhitungan penurunan ketinggian lapisan

asap bagi kebakaran yang membesar dengan maksimum suatu keadaan *steady* (mantap) sebaiknya dilakukan dengan cara yang sama seperti dijelaskan dalam butir 6.4.1.3.

#### 6.4.1.2 Pembuangan asap untuk mendapatkan tinggi lapisan konstan

Suatu analisa waktu jalan ke luar tidak perlu dilakukan jika dapat ditunjukkan bahwa bidang pemisah lapisan asap dipertahankan pada suatu ketinggian sehingga memberikan penghuni terhadap asap untuk perioda waktu yang tidak terbatas. Tinggi lapisan konstan bisa diperoleh jika dapat disediakan suatu kapasitas pembuangan yang sama dengan volume produksi asap pada ketinggian rancangan bidang pemisah lapisan asap. Dalam kalimat lain, volume asap yang masuk kedalam lapisan asap sama dengan volume asap yang dikeluarkan dengan pembuangan mekanik. Secara umum, metode ini berlaku hanya untuk kebakaran yang *steady* (mantap), kecuali jika puncak volume produksi asap dari kebakaran *unsteady* (tidak mantap) dapat diketahui selama rancangan perioda operasi sistem manajemen asap. Laju volume produksi asap untuk suatu ketinggian bidang pemisah lapisan asap yang ditentukan dapat dihitung dengan menggunakan rumus (8), (9), (10), dan (15). Temperatur asap yang memasuki lapisan, yang dihitung dengan rumus dalam tabel 3.5, perlu diperhitungkan dalam perhitungan densitas asap yang digunakan dalam rumus (22). Karena rumus (8), (9), (10) dan (15) mengacu pada suatu ketinggian bidang pemisah lapisan asap yang berkaitan dengan puncak zona transisi seperti yang diperlihatkan dalam gambar A.1, suatu rancangan ketinggian bidang pemisah lapisan asap perlu dipilih agar menjamin para penghuni tidak terekspos asap. Dalam memilih ketinggian rancangan bidang pemisah lapisan asap, kedalaman zona transisi yang diharapkan perlu dipertimbangkan. Ekspos dapat diartikan persyaratan terdapatnya asap atau kondisi yang dipertahankan dari lingkungan terhadap mana penghuni terekspos.

#### 6.4.1.3\* Analisa pembuangan asap terhadap waktu jalan ke luar

Pembuangan asap dapat digunakan untuk memperlambat laju penurunan ketinggian asap untuk suatu perioda yang mengijinkan penghuni untuk ke luar secara aman dari ruangan. Pendekatan ini dapat digunakan apabila tidak mungkin menyediakan pembuangan asap dengan kapasitas yang cukup untuk mempertahankan asap pada ketinggian bidang pemisah lapisan asap selama periode tidak terbatas. Untuk menghitung posisi lapisan asap sepanjang waktu, suatu analisa transien perlu dilakukan dengan memperhitungkan perubahan dalam produksi asap sebagai fungsi dari posisi bidang pemisah lapisan asap dan pembuangan asap yang disediakan oleh sistem pembuangan asap mekanik. Pendekatan ini dibahas secara mendetil dalam A.6.4.1.3. Rumus (8), (9), (10), dan (15) digunakan untuk menentukan input volumetrik asap masuk ke dalam lapisan asap untuk suatu langkah waktu tertentu. Sejumlah tertentu asap kemudian dibuang secara mekanik dari asap selama langkah waktu yang sama. Selanjutnya dihitung posisi yang baru lapisan asap pada akhir dari langkah waktu. Temperatur asap yang memasuki lapisan, dihitung dengan rumus-rumus dalam tabel 3, harus diperhitungkan dalam perhitungan densitas asap yang digunakan dalam rumus (22). Keterlambatan transportasi dikaitkan dengan pergerakan asap dari kebakaran ke dalam lapisan atas boleh atau tidak boleh dimasukkan dalam analisis ini. Pengabaian keterlambatan transportasi asap menghasilkan suatu hasil perhitungan yang lebih konservatif karena asap dengan segera ditambahkan ke dalam lapisan atas, menghasilkan laju penurunan lapisan yang lebih cepat. Keterlambatan transportasi dapat cukup berarti dalam mempertimbangkan kebakaran pada beberapa ruangan dengan luas yang besar.

Karena rumus (8), (9), (10), dan (15) mengacu pada suatu ketinggian bidang pemisah lapisan asap yang berhubungan dengan puncak dari zona transisi seperti diperlihatkan dalam gambar A.1, suatu rancangan ketinggian bidang pemisah lapisan asap perlu dipilih untuk memastikan penghuni tidak terekspos asap. Dalam memilih rancangan ketinggian bidang pemisah lapisan asap ini, kedalaman zona transisi yang diharapkan perlu dipertimbangkan.

Ekspos dapat diartikan persyaratan terdapatnya asap atau kondisi yang dipertahankan dari lingkungan terhadap mana penghuni terekspos.

#### **6.4.1.4 Ventilasi alami untuk mencapai tinggi lapisan konstan**

Untuk beberapa aplikasi, pelepasan alami dapat digunakan untuk mempertahankan bidang pemisah lapisan asap pada ketinggian tertentu dalam waktu tak terbatas. Ini dapat dipenuhi bila jumlah asap yang dibuang sama dengan produksi volumetrik asap pada rancangan ketinggian bidang pemisah lapisan asap. Pilihan sistem pembuangan mekanik yang dibahas dalam butir 6.4.1.2 hanya berlaku untuk kebakaran yang *steady* (mantap), kecuali jika puncak volume produksi asap dari kebakaran *unsteady* (tidak mantap) dapat diketahui selama rancangan perioda operasi sistem manajemen asap. Pembuangan asap volumetrik oleh pelepasan alami dapat dihitung dengan metode yang dibaca dalam NFPA 204 *Guide for Smoke and Heat Venting*.

#### **6.4.1.5 Analisa pelepasan alami terhadap waktu jalan ke luar**

Pelepasan alami dapat digunakan untuk beberapa aplikasi dalam suatu cara yang serupa dengan yang dipersyaratkan pada butir 6.4.1.3 untuk memperlambat laju penurunan ketinggian lapisan asap untuk suatu perioda yang mengizinkan penghuni ke luar dengan aman dari suatu ruangan. Pendekatan ini dapat digunakan bila tidak mungkin menyediakan pembuangan mekanik atau pelepasan alami yang mempunyai kapasitas cukup untuk menjaga asap pada rancangan bidang pemisah lapisan asap untuk periode waktu yang tidak terbatas. Untuk menghitung posisi lapisan asap sepanjang waktu, suatu analisa transien perlu dilakukan dengan memperhitungkan perubahan dalam produksi asap sebagai fungsi dari posisi bidang pemisah lapisan asap dan pembuangan asap yang disediakan oleh sistem pembuangan asap alami.

Suatu pendekatan yang sama didiskusikan secara mendetil untuk pembuangan mekanis (lihat butir A.6.4.1.3). Pembuangan asap volumetrik oleh pelepasan alami dapat dihitung dengan metode yang dibaca dalam NFPA 204 *Guide for Smoke and Heat Venting*.

#### **6.4.1.6 Manajemen penyebaran asap ke ruang yang berhubungan**

Manajemen penyebaran asap ke ruang yang berhubungan dapat dipenuhi dengan salah satu dari metode berikut :

- (1). Mempertahankan bidang pemisah lapisan asap pada suatu ketinggian yang lebih tinggi daripada bukaan tertinggi ke ruangan yang berhubungan
- (2). Menyediakan penghalang asap untuk membatasi penyebaran asap ke dalam ruang yang berhubungan (suatu beda tekanan mungkin perlu diterapkan pada kedua sisi penghalang asap)
- (3). Menyediakan aliran udara berlawanan arah pada muka bukaan untuk menghalangi penyebaran asap ke dalam ruang yang berhubungan
- (4). Pemadaman api yang langsung dan segera untuk menghentikan perkembangan dari suatu cendawan asap yang panas.

**6.4.1.6.1** Pembuangan asap dapat disediakan dalam ruang bervolume besar untuk membatasi kedalaman penumpukan asap, atau meningkatkan waktu bagi asap untuk memenuhi ruangan, sedemikian sehingga batas lapisan asap tetap berada di atas bukaan tertinggi dari ruang yang berhubungan selama waktu yang diperlukan untuk mencapai sasaran perancangan.

**6.4.1.6.2** Penghalang asap dapat disediakan untuk membatasi penyebaran asap ke dalam ruangan yang berhubungan. Tergantung pada luas bukaan dari penghalang, suatu beda tekanan mungkin perlu diterapkan antara ke dua sisi penghalang. Metoda ini diuraikan dalam SNI 03-6571-2002, Sistem pengendalian asap pada bangunan gedung. Suatu beda tekanan

dapat dicapai dengan membuang asap dari dalam ruangan bervolume besar sedemikian sehingga tekanannya negatif terhadap ruangan yang berhubungan. Metode ini, dengan beberapa keterbatasan pemakaian dalam ruangan bervolume besar, diuraikan dalam SNI 03-6571-2002, Sistem pengendalian asap pada bangunan gedung. Suatu beda tekanan dapat pula dicapai dengan memasok udara ke dalam ruangan yang berhubungan.

**6.4.1.6.3** Metoda aliran udara dapat digunakan untuk mencegah pergerakan asap dari ruangan bervolume besar ke dalam ruangan yang berhubungan untuk bukaan besar di mana metoda penekanan udara tidak praktis. Metoda aliran udara menggunakan suatu kecepatan permukaan pada keseluruhan bidang bukaan. Butir 7.13 menyediakan metoda perhitungan untuk menentukan kecepatan permukaan minimum yang harus disediakan. Metoda ini juga dapat diterapkan untuk ruangan bersebelahan (ruangan besar) di bawah bidang pemisah lapisan asap, untuk membatasi penyebaran asap ke ruangan tersebut karena penyebaran asap secara lateral yang berasal dari cendawan asap yang bersilangan. Dalam menggunakan metode aliran udara, aliran udara harus mendekati tegak lurus terhadap bidang bukaan.

## **6.4.2 Manajemen asap dalam ruangan yang berhubungan**

### **6.4.2.1 Kebakaran dalam ruangan yang mengelilingi suatu ruangan bervolume besar oleh ruangan bervolume besar**

Konfigurasi yang mungkin untuk hubungan antara ruangan bervolume besar dengan ruangan di sekelilingnya meliputi:

- (1) ruangan terpisah
- (2) ruangan yang berhubungan

### **6.4.2.2 Kebakaran dalam ruangan terpisah**

Bila konstruksi yang memisahkan ruangan bervolume besar dari daerah-daerah di sekelilingnya cukup rapat sehingga beda tekanan antara zona kebakaran dan zona tidak terbakar dapat dikendalikan, ruang yang berukuran besar tersebut dapat diperlakukan sebagai salah satu dari zona-zona dalam sistem pengendalian asap terzona (pengendalian asap terzona diuraikan dalam SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap pada bangunan gedung).

### **6.4.2.3 Kebakaran dalam ruangan yang berhubungan**

Ruangan yang berhubungan dapat dirancang untuk membolehkan asap meluap ke dalam ruangan yang berukuran besar. Dalam contoh ini, meluapnya asap ke dalam ruangan bervolume besar harus dikelola dengan sistem manajemen asap, yang disediakan untuk mempertahankan tinggi rancangan bidang pemisah lapisan asap. Ruangan yang berhubungan juga dapat dirancang untuk mencegah perpindahan asap ke dalam ruangan bervolume besar. Rancangan seperti itu akan memerlukan pembuangan yang memadai dari ruangan yang berhubungan untuk menetapkan aliran minimum di antara ruangan yang berhubungan dan ruang bervolume besar.

#### **6.4.2.3.1 Pembuangan asap melalui ruangan bervolume besar**

Untuk kebakaran dalam ruangan yang tidak bersprinkler, laju pembuangan dari ruangan bervolume besar perlu dievaluasi tidak hanya untuk cendawan asap bebas dari suatu kebakaran dalam ruangan bervolume besar tetapi juga untuk cendawan asap yang berasal dari ruangan yang berhubungan. Sistem manajemen asap harus dapat mengelola kedua kondisi tersebut, tetapi keduanya tidak secara bersamaan. Metoda perhitungan volume produksi asap untuk cendawan asap yang meluap dan cendawan asap di jendela masing-

masing dibahas dalam butir 7.8.2 dan 7.8.3. Rumus dalam butir 7.8.2 dan 7.8.3 hanya berlaku untuk kebakaran dalam ruangan tidak bersprinkler, karena rumus-rumus tersebut diturunkan secara empirik dari data-data pengujian. Pada saat asap memasuki ruangan bervolume besar, ada dan harus dipertimbangkan asap yang berbelok ke lantai-lantai atas atau membentur langit-langit yang menonjol dari lantai-lantai atas. Terdapat kemungkinan asap ini akan memasuki lantai atas ruangan yang berhubungan, dan bahaya dari asap ini sebaiknya dievaluasi

#### **6.4.2.3.2 Pencegahan penyebaran asap ke dalam ruangan yang berhubungan**

Ruangan yang berhubungan dapat juga dirancang untuk mencegah perpindahan asap ke dalam ruang bervolume besar. Rancangan seperti itu akan memerlukan pembuangan yang memadai dari ruangan yang berhubungan untuk menetapkan aliran minimum di antara ruangan yang berhubungan dan ruang bervolume besar.

Kecepatan permukaan pada bidang bukaan yang memenuhi ini dijelaskan dalam butir 6.4.1.6.3, dan pasal 3 menyediakan metoda perhitungan untuk terbentuknya asap dalam ruangan yang berhubungan. Jumlah pembuangan yang diperlukan untuk situasi ini dapat jauh melampaui kemampuan sistem tata udara yang biasa dan mungkin memerlukan pemasangan sistem manajemen asap terdedikasi untuk ruangan yang berhubungan.

Penempatan bukaan pembuangan harus dievaluasi dengan hati-hati. Bukaan hisap dan bukaan buang harus ditempatkan sedemikian sehingga perpindahan asap tidak akan mengganggu eksit. Lokasi bukaan buang ke luar harus diletakkan jauh dari bukaan hisap untuk memperkecil kemungkinan asap tersirkulasi ulang. Penghalang asap dapat disediakan di antara ruangan bervolume besar dengan ruangan yang berhubungan. Jika konstruksi yang memisahkan ruangan bervolume besar dengan ruangan disekelilingnya cukup ketat sehingga beda tekanan antara zona kebakaran dan zona yang tidak terbakar bisa dikendalikan, ruangan yang bervolume besar dapat diperlakukan sebagai salah satu zona dalam sistem pengendalian asap terzona. Pengendalian asap terzona dijelaskan dalam SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap pada bangunan gedung.

#### **6.4.3 Pertimbangan kondisi yang dapat dipertahankan dalam rancangan sistem manajemen asap**

Pilihan rancangan sistem manajemen asap yang diuraikan dalam butir 6.4.1 dan 6.4.2 didasarkan pada tujuan mempertahankan lapisan asap pada ketinggian yang cukup untuk suatu perioda waktu guna mencegah tereksposnya penghuni terhadap pengaruh asap. Sistem manajemen asap dalam beberapa kasus dapat dirancang untuk mengantisipasi kontak para penghuni dengan asap, sepanjang kondisi dasar yang dapat dipertahankan terjamin. Kondisi yang dapat dipertahankan yang dipertimbangan di dalam analisa meliputi :

- (1) jarak pandang
- (2) sifat racun dari asap
- (3) temperatur asap

Penentuan sifat racun asap biasanya meliputi analisa zat karbon monoksida (CO). Ekspos gas beracun lainnya, tergantung pada jenis bahan yang terbakar, juga dapat dipertimbangkan. Batasan kondisi yang dipertahankan untuk sifat racun asap dan temperatur asap biasanya mempertimbangkan waktu ekspos asap.

Perhitungan yang berkaitan dengan penentuan jarak pandang diuraikan dalam butir A.7.5. Suatu evaluasi dari pengaruh asap terhadap manusia karena sifat racun asap dan temperatur asap adalah diluar lingkup standar ini. Namun, sebagaimana disebutkan dalam butir 4.6, terdapat bahan referensi lainnya yang menyediakan metoda analitis untuk analisa kondisi yang dapat dipertahankan (Purser D.A, 1988).

## 6.5 Pengoperasian sistem manajemen asap

### 6.5.1 Umum

Sistem manajemen asap untuk ruangan bervolume besar ditujukan untuk menahan lapisan asap pada bagian atas dari ruangan bervolume besar atau membatasi jumlah asap yang menyebar ke daerah-daerah di luar ruangan bervolume besar tersebut. Untuk mencapai tujuan tersebut, hal berikut ini perlu terjadi:

- (1) Kebakaran perlu dideteksi secara dini (sebelum ketinggian asap atau laju penurunan asap melampaui tujuan perancangan). Bila manajemen asap disediakan untuk membantu evakuasi yang aman, sebaiknya dipertimbangkan waktu reaksi penghuni terhadap waktu kondisi darurat dan waktu evakuasi.
- (2) Sistem pengkondisian udara yang melayani ruangan bervolume besar dan ruangan yang berhubungan perlu dimatikan apabila pengoperasian sistem tersebut akan berpengaruh buruk terhadap sistem manajemen asap.
- (3) Asap harus dibuang dari ruangan bervolume besar di atas bidang pemisah asap yang diinginkan.
- (4) Sebaiknya udara tambahan yang memadai menggantikan udara yang terbang. Lubang pemasukan udara tambahan dan lubang pembuangan harus terpisah sedemikian sehingga udara yang terkontaminasi tidak terhisap masuk ke dalam bangunan.

### 6.5.2 Pengaktifan otomatis

Konfigurasi ruangan bervolume besar sebaiknya dipertimbangkan dalam memilih jenis detektor yang digunakan untuk mengaktifkan sistem manajemen asap. Ukuran, bentuk dan ketinggian ruangan perlu dievaluasi. Faktor-faktor ini sangat bervariasi di berbagai rancangan atrium dan perlu dipertimbangkan dengan hati-hati dalam pemilihan detektor untuk suatu ruangan bervolume besar. Sebagai tambahan, selubung ruangan bervolume besar perlu dievaluasi untuk menentukan kontribusinya terhadap stratifikasi temperatur. Ketinggian ruangan bervolume besar dan segi arsitektur, seperti bukaan *skylight* merupakan faktor dominan dalam menentukan stratifikasi.

#### 6.5.2.1 Faktor lingkungan

Seperti arus konveksi dan perpindahan udara mekanik, perlu dipertimbangkan dalam memilih jenis detektor dan penempatannya (lihat SNI 03-3986-2000, Tata cara perencanaan dan pemasangan sistem deteksi dan alarm kebakaran untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung). Pengaktifan otomatis sistem manajemen asap dapat diawali melalui sarana berikut :

- (1) detektor asap jenis *spot*,
- (2) detektor asap jenis berkas cahaya (*beam*),
- (3) aliran air sistem springkler otomatis,
- (4) detektor jenis lain yang sesuai,
- (5) kombinasi di atas.

**6.5.2.2** Biasanya, semua alat deteksi otomatis di dalam ruangan bervolume besar dan ruangan yang berhubungan sebaiknya mengaktifkan sistem manajemen asap. Detektor untuk tujuan khusus, seperti untuk panggilan balik lif dan untuk melepas (*release*) pintu, dan untuk bahaya khusus seperti untuk sistem pemadam api khusus, dapat dikecualikan. Untuk menghindari pengoperasian sistem yang tidak perlu dari pengaktifan detektor asap, perlu dipertimbangkan pengaktifan sistem oleh dua atau lebih detektor asap atau berdasarkan verifikasi alarm.

Alat deteksi otomatis tidak boleh dihubungkan langsung dengan sistem manajemen asap tanpa mempertimbangkan lebih jauh integritas sistem deteksi. Integritas sistem deteksi

dimuat dalam SNI 03-3985-2000, Tata cara perencanaan dan pemasangan sistem deteksi dan alarm kebakaran untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung.

**6.5.2.3** Detektor asap jenis spot dapat digunakan pada atau dekat langit-langit yang rendah dari ruangan bervolume besar, apabila pemasangan detektor tersebut memudahkan untuk pemeliharaan dan penempatannya berdasarkan pertimbangan efek stratifikasi dan arus udara yang disebabkan oleh gaya alami dan mekanik.

**6.5.2.4** Detektor asap jenis berkas cahaya (*beam*) yang diproyeksikan, dapat digunakan pada atau di dekat langit-langit yang tinggi dari ruangan bervolume besar dan ditempatkan untuk mengarahkan berkas secara horizontal atau dalam orientasi lainnya yang diperbolehkan. Stratifikasi dan arus udara alami maupun mekanik dapat mensyaratkan penggunaan tambahan detektor asap jenis berkas cahaya yang diproyeksikan pada ketinggian antara dari ruangan bervolume besar di mana ketinggian langit-langit akan memberikan kelambatan dalam pengawalan operasi manajemen asap.

**6.5.2.5** Aliran air springkler otomatis sebaiknya juga digunakan untuk mengaktifkan sistem manajemen asap. Penting sistem springkler, terzona dengan sistem deteksi asap di dalam ruangan bervolume besar, sehingga respon manajemen asap yang benar dapat ditingkatkan. Ketinggian ruangan bervolume besar dan penempatan springkler sebaiknya dianalisa untuk memperkirakan waktu respon pengaktifan springkler.

Waktu pengaktifan springkler dapat terlalu lambat untuk secara efektif mengawali manajemen asap bila springkler ditempatkan beberapa tingkat lantai di atas lantai ruangan bervolume besar. Rumus dalam pasal 7 sebaiknya digunakan dalam menganalisa masing-masing kasus. Aliran air sistem springkler sebaiknya menjadi satu dari cara untuk mengawali sistem manajemen asap, meskipun hanya sebagai sistem pendukung. Pengaktifan springkler dapat menjadi sarana pengawalan utama yang efektif apabila springkler ditempatkan pada langit-langit yang rendah.

### **6.5.3 Kontrol manual**

Suatu sarana untuk menghidupkan dan mematikan sistem manajemen asap secara manual sebaiknya disediakan di lokasi yang mudah dicapai oleh petugas pemadam kebakaran.

## **6.6 Kehandalan sistem manajemen asap**

### **6.6.1 Analisa kegagalan**

Setiap sistem manajemen asap sebaiknya dianalisa untuk menentukan dampak dari kegagalan operasi, pengoperasian yang tidak benar, atau pengoperasian parsial dari setiap komponen sistem utama pada pengoperasian sistem yang diinginkan.

Sebagai perhatian khusus pada sistem yang dimaksudkan untuk mempertahankan suatu keseimbangan tekanan atau aliran antara ruangan yang bersebelahan untuk mengendalikan perpindahan asap. Jika ditemukan bahwa kegagalan pengoperasian suatu komponen akan menyebabkan pembalikan arah aliran asap atau menurunkan lapisan pemisah asap hingga ketinggian yang membahayakan, sebaiknya dapat ditentukan sampai tingkat mana operasi dapat berkurang dan probabilitas kejadian semacam itu.

### **6.6.2 Kehandalan**

Kehandalan sistem manajemen asap bergantung pada kehandalan spesifik dari masing-masing komponen, ketergantungan fungsional komponen satu terhadap lainnya, dan tingkat redundansi. Kehandalan masing-masing komponen (misal perangkat keras, perangkat lunak, dan *interface* dengan sistem lainnya) meliputi baik kinerjanya selama kondisi operasi normal seperti yang dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan sepanjang umur dari sistem, dan



kemampuannya untuk menahan tekanan yang dialami selama kebakaran. Umumnya peninjauan ulang komponen seperti tersebut di atas dilakukan dalam evaluasi terhadap komponen tersebut oleh laboratorium uji yang independen. Komponen yang teruji atau terklasifikasi masih belum cukup untuk memastikan kehandalannya. Demikian pula dampak ketergantungan fungsional komponen satu dengan lainnya tidak dapat segera diperiksa melalui evaluasi dari komponen individunya. Diperlukan suatu analisa kehandalan sistem secara menyeluruh. Pemeliharaan dan pengujian yang teratur juga diperlukan untuk menetapkan kehandalan sistem sepanjang umur pakai sistem. Supervisi komponen-komponen sistem meningkatkan kehandalan sistem dengan menyediakan indikasi visual atau audio berkala dari kerusakan komponen dan memfasilitasi perbaikan segera.

### 6.6.3 Pengujian periodik

Pengujian secara periodik sangat penting untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi dan bekerja dengan handal saat diperlukan. Sebaiknya disediakan sarana untuk melakukan pengujian secara periodik terhadap sistem manajemen asap untuk memeriksa kinerja sistem. Sistem harus dirancang untuk membolehkan pengujian tanpa peralatan khusus lainnya kecuali yang disediakan oleh sistem. Karena akses untuk verifikasi pengukuran kinerja sering sulit diperoleh, sangat diinginkan bila memungkinkan instrumentasi yang seluruhnya atau sebagian terpadu dan yang tersedia sebagai peralatan *monitor portabel* (jinjing).

## 7 Prosedur perhitungan

### 7.1 Pendahuluan

#### 7.1.1 Pendekatan perancangan

Tiga macam pendekatan untuk merancang sistem manajemen asap diuraikan sebagai berikut :

- (1) pemodelan skala, dengan menggunakan model fisik berskala lebih kecil dengan mematuhi hukum pemodelan skala, di mana pengujian berskala kecil dilakukan untuk menentukan dan persyaratan dan kemampuan dari sistem manajemen asap yang dibuat model.
- (2) dengan rumus aljabar, yang diturunkan dari korelasi hasil percobaan berskala besar dan kecil
- (3) dengan model kompartemen kebakaran, menggunakan nilai yang diperoleh dari teori dan empirik untuk estimasi kondisi di dalam sebuah ruang.

Setiap pendekatan memiliki nilai dan keterbatasan. Tidak ada satupun yang memuaskan. Walaupun hasil yang diperoleh dari ketiga pendekatan tsb umumnya mirip tetapi biasanya tidak identik. Perkembangan mutakhir prosedur perhitungan walaupun telah maju, tetap dasarnya empirik, dan suatu teori akhir yang dapat dibuktikan dengan fisika dasar masih belum dapat dirumuskan. Inti dari tiap metoda perhitungan didasarkan kepada (*entrainment*) keikutan udara atau gas-gas lain disekelilingnya ke dalam cendawan asap yang membubung yang digerakkan kebakaran (*fire-driven plume*). Hasil perhitungan keikutan udara (*entrainment*) antara yang menggunakan rumus empirik yang umum digunakan, dengan yang menggunakan model kebakaran zona kompartemen, akan menimbulkan perbedaan kira-kira 20%. Dianjurkan untuk menambahkan faktor keamanan yang tepat terhadap kapasitas pembuangan (*exhaust*) untuk menampung ketidak pastian ini. Berikut ini pembahasan singkat nilai dari beberapa pendekatan perancangan tersebut.

#### 7.1.1.1 Pemodelan skala

Pemodelan skala lebih disukai untuk ruangan yang mempunyai tonjolan (*projections*) atau bentuk lain yang mencegah cendawan asap (*plume*) membubung bebas ke atas. Pada model skala, biasanya model tersebut dibuat secara proporsional dengan bangunan sesungguhnya. Namun demikian ukuran besarnya kebakaran (*fire size*) dan interpretasi hasilnya diatur oleh Hukum pemodelan skala (*scaling laws*) yang diuraikan pada butir 7.1.2. Walaupun meyakinkan, pendekatan ini mahal, membutuhkan waktu lama, dan berlaku hanya dalam rentang percobaan yang dilakukan. Karena pendekatan ini biasanya diterapkan pada bangunan yang kompleks, adalah penting untuk memperhatikan bahwa rangkaian percobaan akan mencakup semua variasi berbagai faktor seperti posisi dan ukuran besarnya kebakaran, lokasi dan kapasitas aliran buangan dan aliran masukan, variasi temperatur ruangan (stratifikasi atau gradien temperatur dari lantai ke langit-langit), dan variabel lainnya. Dapat dipastikan bahwa pendeteksian tidak dapat dinilai dengan model berskala.

#### 7.1.1.2 Rumus aljabar

Rumus aljabar yang dimuat dalam standar ini disediakan untuk digunakan pada komputer untuk menghitung faktor individual yang secara kolektif dapat digunakan untuk menetapkan persyaratan rancangan dari suatu sistem manajemen asap. Rumus yang dimuat di sini dapat dianggap sebagai rumus aljabar yang paling akurat dan sederhana, yang tersedia saat ini. Secara umum, rumus tsb terbatas untuk kasus yang melibatkan kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan (*steady fire* sebagaimana diuraikan dalam butir 7.2.2) atau yang pelepasan kalornya bertambah dengan fungsi kuadrat terhadap waktu (*unsteady fire* sebagaimana diuraikan dalam butir 7.2.3). Rumus ini tidak tepat untuk kondisi kebakaran lainnya, atau untuk kebakaran yang awalnya berkembang dengan waktu namun setelah mencapai laju pelepasan kalor maksimum berlangsung dengan laju pelepasan kalor konstan. Pada banyak kasus, penerapan rumus secara berhati-hati dapat mengatasi keterbatasan ini. Setiap rumus telah diturunkan dari data percobaan. Dalam beberapa kasus, data pengujian telah dikumpulkan dalam jumlah terbatas dari ukuran besarnya kebakaran, ukuran ruangan, atau titik pengukuran. Apabila mungkin, komentar telah diberikan pada rentang data yang digunakan untuk menurunkan rumus tersebut. Sangat penting untuk mempertimbangkan batasan ini.

Perlu berhati-hati menggunakan rumus tsb untuk menghitung variabel selain yang dinyatakan di sebelah kiri tanda sama dengan, kecuali diketahui jelas seberapa sensitif hasilnya akibat perubahan kecil dari setiap variable yang terlibat. Apabila pembatasan ini menimbulkan hambatan bagi kebutuhan pengguna (*user's needs*) sebaiknya dipertimbangkan untuk mengkombinasikan penggunaan rumus ini bersama dengan pemodelan skala atau pemodelan kompartemen kebakaran. Para pengguna rumus ini perlu memahami sensitifitas perubahan pada variabel yang dihitung.

#### 7.1.1.3\* Pemodelan kompartemen kebakaran

Pada waktu ini dapat diperoleh komputer dengan kemampuan untuk menyelesaikan beberapa pemodelan kompartemen kebakaran. Semua model kompartemen kebakaran menyelesaikan rumus konservasi untuk daerah yang jelas (*volume* atur). Pemodelan kompartemen kebakaran secara umum dapat diklasifikasikan sebagai pemodelan zona atau pemodelan CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

##### 7.1.1.3.1 Pemodelan zona

Pemodelan zona adalah pemodelan yang lebih sederhana dan biasanya dapat diproses pada komputer pribadi (PC). Pemodelan zona membagi ruang dalam dua zona, yaitu zona atas yang berisi asap dan gas panas yang dihasilkan oleh kebakaran, dan zona bawah yang

menjadi sumber dari udara yang terikut (*entrainment air*). Ukuran kedua zona tersebut berubah selama kebakaran, bergantung pada laju aliran dari zona bawah ke zona atas, bergantung pada laju pembuangan dari zona atas, dan bergantung pada temperatur asap dan gas dalam zona atas. Karena jumlah zona yang kecil, pemodelan zona menggunakan rumus teknik pemindahan kalor dan massa, untuk mengevaluasi pemindahan massa dan energi dari zona bawah ke zona atas, kehilangan kalor dan massa dari zona atas, dan aspek lainnya. Pada umumnya rumus tsb menganggap kondisi seragam dalam setiap zona yang bersangkutan.

Dalam pemodelan zona, sumber aliran ke zona atas adalah cendawan asap. Semua pemodelan zona mempunyai rumus cendawan asap. Beberapa pemodelan memberikan peluang kepada pengguna untuk memilih di antara beberapa rumus cendawan asap. Sebagian besar pemodelan zona terbaru didasarkan kepada cendawan aksis simetrik.

Karena pemodelan zona pada saat ini menganggap tidak ada variasi temperatur yang sudah ada di dalam ruangan, pemodelan ini tidak dapat langsung menangani masalah stratifikasi. Pemodelan zona juga menggunakan asumsi bahwa lapisan asap pada langit-langit terbentuk segera dan tersebar merata dari dinding ke dinding. Asumsi ini tidak memperhitungkan awal aliran lateral pada langit-langit. Kesalahan akibat perbedaan ini dapat menjadi cukup signifikan untuk ruangan dengan langit-langit yang luas.

Namun demikian, pemodelan zona dapat menghitung sejumlah faktor penting dalam urutan kejadian (misalnya, ketinggian asap, temperatur, komposisi, dan laju penurunan) dari semua jenis kebakaran yang dapat dirumuskan oleh pengguna. Sebagian besar pemodelan zona akan menghitung besarnya kehilangan kalor ke batas ruangan. Beberapa pemodelan menghitung dampak lubang pembuangan alami atau pembuangan mekanikal, dan beberapa model menghitung respon dari sistem deteksi panas atau asap.

#### 7.1.1.3.2 Pemodelan CFD

Pemodelan CFD, atau disebut juga pemodelan lapangan, biasanya membutuhkan komputer dengan kapasitas besar atau komputer *mainframe* dan keahlian yang tinggi untuk mengoperasikan dan menginterpretasikan hasil perhitungannya. Namun pemodelan CFD berpotensi mengatasi keterbatasan pemodelan zona dan melengkapi atau menggantikan pemodelan skala.

Seperti halnya pemodelan zona, pemodelan CFD menyelesaikan rumus dasar konservasi. Dalam pemodelan CFD, ruangan dipecah menjadi banyak sel (atau zona) dan menggunakan rumus konservasi untuk menyelesaikan perpindahan kalor dan massa antar zona. Karena menggunakan jumlah besar zona maka model CFD menghindari rumus teknik sederhana yang digunakan dalam pemodelan zona. Dengan menggunakan sel yang kecil, pemodelan CFD dapat memeriksa masalah dengan lebih rinci serta memasukkan dampak bentuk ruangan yang tidak teratur dan aliran udara yang tidak umum, yang semuanya itu tidak dapat diselesaikan dengan pemodelan zona ataupun rumus aljabar. Tingkat ketelitian pemodelan CFD melebihi yang biasa diperoleh dari pemodelan skala.

### 7.1.2 Hukum skala

**7.1.2.1\*** Dalam standar ini, penekanan aktifitas pemodelan skala ditujukan kepada pemodelan perpindahan gas panas di dalam bangunan akibat kebakaran. Fenomena radiasi pembakaran dan radiasi nyala api diabaikan. Pertumbuhan kebakaran tidak dimodelkan. Jenis kebakaran harus dispesifikasikan dari segi laju pelepasan kalor konstan atau berubah terhadap waktu.

**7.1.2.2\*** Berdasarkan rumus dalam tabel 2, sebuah pemodelan skala dapat dikembangkan. Modelnya harus dibuat cukup besar agar terbentuk aliran turbulen seperti pada sistem sesungguhnya. Rumus skala yang membandingkan kondisi pada skala sesungguhnya ( $F$ ) dengan kondisi pada model skala ( $m$ ) dicantumkan dalam Tabel 2 dengan asumsi kondisi ambien sama.

Tabel 2 Rumus skala

Posisi geometric	$X_m = X_F (l_m/l_F)$
Temperatur	$T_m = T_F$
Perbedaan tekanan	$\Delta p_m = \Delta p_F (l_m/l_F)$
Kecepatan	$v_m = v_F (l_m/l_F)^{1/2}$
Laju pelepasan kalor total	$Q_m = Q_F (l_m/l_F)^{5/2}$
Laju pelepasan kalor konveksi	$Q_{c,m} = Q_{c,F} (l_m/l_F)^{5/2}$
Laju pembuangan volumetrik	$V_{fan,m} = V_{fan,F} (l_m/l_F)^{5/2}$
Sifat termal selubung ruangan	$(k\rho c)_{w,m} = (k\rho c)_{w,F} (l_m/l_F)^{0,9}$

Dengan penjelasan:

$c$	=	kalor spesifik material selubung (dinding atau langit-langit)
$k$	=	konduktivitas termal material selubung (dinding atau langit-langit)
$l$	=	panjang
$\Delta p$	=	perbedaan tekanan
$Q$	=	laju pelepasan kalor
$t$	=	waktu
$T$	=	temperatur (asap atau ambien)
$v$	=	kecepatan
$V$	=	laju pembuangan volumetrik
$x$	=	posisi (koordinat)
$\rho$	=	densitas
$c$	=	konveksi
$F$	=	skala penuh ( <i>full scale</i> )
$m$	=	model skala kecil
$w$	=	dinding

### 7.1.3 Perhitungan berdasarkan rumus aljabar

Bagian selanjutnya dari pasal ini akan menguraikan prosedur perhitungan dengan dasar rumus aljabar untuk berbagai parameter rancangan, yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya. Prosedur perhitungan ini mewakili suatu set rumus aljabar yang telah diterima dan informasi relevan lain yang tersedia untuk edisi standar ini.

### 7.1.4 Penetapan lingkungan dua-lapisan

Suatu keterlambatan (*delay*) saat pengaktifan fan pembuangan dapat menyebabkan lapisan asap turun di bawah tinggi rancangan bidang bidang pemisah lapisan asap. Akumulasi awal asap pada ketinggian rendah dapat diperburuk (*aggravated*) oleh awal stratifikasi temperatur vertikal, yang memperlambat perpindahan asap ke bagian atas dalam ruangan bervolume besar. Namun demikian, dengan diaktifkannya sistem pembuangan dan tambahan udara, suatu lapisan jernih di bagian bawah dapat diharapkan terbentuk sesuai dengan asumsi rancangan.

### 7.1.5 Satuan SI

Rumus dalam satuan SI yang digunakan dalam pasal ini diberikan dalam lampiran D.

## 7.2 Kebakaran rancangan

### 7.2.1\* Umum

Semua perhitungan rancangan dalam standar ini bergantung pada laju pelepasan kalor dari kebakarannya. Oleh karena itu sebagai langkah pertama perlu diidentifikasi ukuran besarnya kebakaran rancangan. Ukuran besarnya kebakaran rancangan ini ditetapkan berdasarkan analisis teknik dari karakteristik bahan bakarnya, efek yang disebabkan oleh kebakaran, atau keduanya. Selain itu, kebakaran dapat ditetapkan sebagai kebakaran *steady* atau kebakaran *unsteady*.

### 7.2.2 Kebakaran *steady*

Kebakaran *steady*, didefinisikan sebagai suatu kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan. Kebakaran jenis ini dianggap berkembang dengan cepat sampai suatu batas. Pertumbuhan selanjutnya akan terbatas dengan diaktifkannya pengendalian kebakaran (baik manual atau otomatis), atau adanya jarak pemisah yang cukup jauh dengan bahan mudah terbakar yang berdekatan.

#### 7.2.2.1 Pengaruh springkler pada ukuran besarnya kebakaran

Kecuali apabila ada alasan untuk menduga bahwa kebakaran akan terus menyebar setelah diaktifkannya springkler, efek springkler terhadap ukuran besarnya kebakaran dapat dipertanggung jawabkan dengan menganggap bahwa kebakaran akan berhenti tumbuh setelah springkler diaktifkan. Dengan lain perkataan, ukuran besarnya kebakaran rancangan adalah ukuran besarnya kebakaran yang diperkirakan pada saat springkler diaktifkan. Diasumsikan bahwa kebakaran akan berlangsung terus sampai bahan yang terbakar habis, tanpa ada efek selanjutnya terhadap proses pembakaran akibat bekerjanya springkler. Alternatif lainnya, apabila uji pembakaran menunjukkan bahwa kebakaran akan terkendali tetapi tidak langsung padam oleh springkler, maka dapat diasumsikan suatu pengurangan laju pelepasan kalor secara eksponensial. Namun demikian, apabila pengujian untuk ketinggian langit-langit ruangan bervolume besar tersebut menunjukkan bahwa kebakaran akan cepat padam oleh springkler, maka pembakaran dapat diasumsikan padam setelah springkler beroperasi.

#### 7.2.2.2 Jarak pemisahan

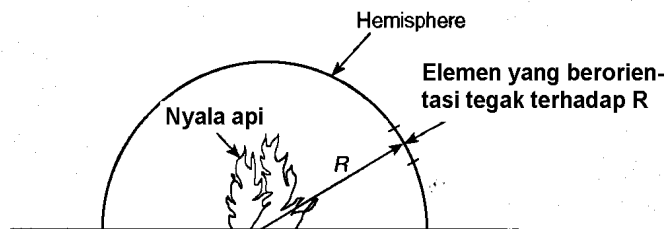
Ukuran besarnya kebakaran rancangan perlu ditetapkan dengan mempertimbangkan jenis bahan bakar, jarak antar bahan bakar, dan konfigurasi. Pemilihan ukuran besarnya kebakaran rancangan perlu dimulai dengan penentuan paket dasar bahan bakar, yaitu ukuran maksimum paket bahan bakar yang mungkin terbakar. Ukuran besarnya kebakaran rancangan sebaiknya diperbesar bila ada bahan mudah terbakar dalam jarak pemisahan,  $R$ , yang ditunjukkan dalam gambar 2(a) dan ditentukan dengan rumus (1). Perlu diperhatikan bahwa kalau paket dasar bahan bakar tidak berbentuk lingkaran, suatu radius ekuivalen perlu dihitung dengan menganggap suatu lingkaran yang luasnya ekuivalen dengan luas lantai yang tertutup oleh paket bahan bakar tersebut. Seluruh luas lantai yang tertutup oleh paket bahan bakar atau berada diantara paket bahan bakar perlu dipertimbangkan dalam perhitungan. Misalnya, kalau paket bahan bakar terdiri atas perabot (*furnitures*) yang ditunjukkan dalam gambar 2(b), maka luas yang dihitung mencakup luas yang tertutup oleh perabot tersebut dan luas lantai diantaranya.

Rumus (1) sbb:

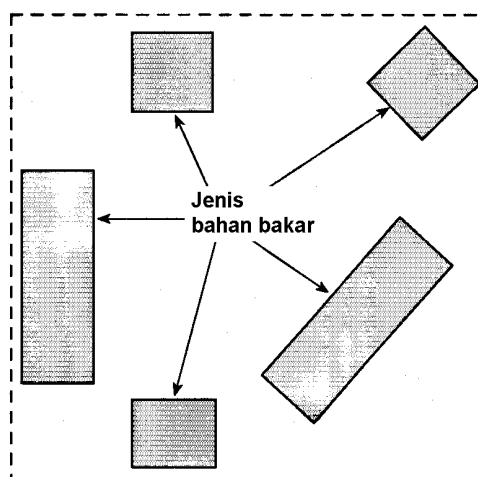
$$R = \left( \frac{Q}{12 \cdot \pi \cdot q''} \right)^{1/2} \quad (1)$$

di mana:

- $R$  = jarak pemisah antara sasaran ke pusat paket bahan bakar [ft]
- $Q$  = laju pelepasan kalor [Btu/detik]
- $q''$  = fluks kalor radiasi yang diterima untuk penyalaaan tanpa disulut [Btu/ft<sup>2</sup>.detik]



Gambar 2(a) Jarak pemisahan, R



Gambar 2(b) Jenis bahan bakar

### 7.2.2.3 Ukuran besarnya kebakaran rancangan

Ukuran besarnya kebakaran rancangan yang tetap untuk diterapkan pada semua situasi adalah tidak realistis. Jenis dan jumlah bahan bakar perlu dipertimbangkan pada waktu menentukan ukuran besarnya kebakaran rancangan. Selanjutnya, suatu standar ukuran besarnya kebakaran rancangan tidak dapat direkomendasikan karena kurangnya data tersedia di Amerika Utara untuk menunjukkan bahwa ukuran besarnya kebakaran rancangan hanya dilampaui dalam beberapa kasus terbatas termasuk untuk atrium atau mal tertutup.

### 7.2.3 Kebakaran *unsteady*

Kebakaran *unsteady* adalah yang berubah terhadap waktu. Laju pelepasan kalor dinyatakan dengan rumus (2) sebagai berikut :

$$Q = 1000 \left( \frac{t}{t_g} \right)^2 \quad (2)$$

di mana:

- $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran [Btu/detik]  
 $t$  = waktu setelah penyalaan efektif [detik]  
 $t_g$  = waktu pertumbuhan kebakaran [detik]

Waktu pertumbuhan adalah interval waktu antara saat penyalaan efektif sampai kebakaran melampaui 1000 Btu/detik. Lihat apendik C untuk informasi lebih lanjut tentang profil kebakaran "t-kuadrat".

Karena dinamika penyalaan sekunder, suatu profil t-kuadrat dapat digunakan untuk tujuan keteknikan sampai kebakaran mencapai luas yang besar. Jadi profil t-kuadrat cukup beralasan sampai pertumbuhan kebakaran terbatas oleh bekerjanya pengendalian kebakaran atau adanya jarak cukup yang memisahkan bahan mudah terbakar terdekat untuk mencegah penyalaan lebih lanjut. Setelah saat itu, diasumsikan kebakaran tidak bertambah besar.

## 7.2.4 Sumber data laju pelepasan kalor

**7.2.4.1** Baru-baru ini sejumlah data terbatas laju pelepasan kalor untuk beberapa jenis bahan bakar telah dilaporkan dalam NFPA 204, *Guide for Smoke and Heat Venting*, dan oleh Babrauskas dan Krasny (1985). Lihat apendiks B. Namun demikian, rincian konstruksi dan bahan perabot telah diketahui sangat berpengaruh terhadap laju pelepasan kalor maksimum, sehingga data laju pelepasan kalor tidak tersedia untuk setiap jenis perabot.

## 7.2.5 Perhatian untuk ukuran besarnya kebakaran rancangan minimum

**7.2.5.1** Ukuran besarnya kebakaran rancangan yang dipilih sebaiknya mewakili suatu skenario terburuk yang dapat dipertanggung jawabkan. Para perancang dan analis diminta sangat berhati-hati jangan memilih ukuran besarnya kebakaran rancangan yang kecil semata-mata didasarkan kepada jenis atau jumlah terbatas bahan mudah terbakar yang ada atau diperkirakan akan ada dalam ruangan.

**7.2.5.2** Di dalam ruangan dengan langit-langit rendah (ketinggian langit-langit kurang dari 7,6 m) di mana terpasang springkler, ukuran besarnya kebakaran rancangan terdiri dari kebakaran *steady* atau kebakaran yang tumbuh sampai suatu ukuran terbatas konstan misalnya oleh beroperasinya sistem pemadaman otomatis.

**7.2.5.3** Di dalam ruangan dengan langit-langit tinggi (ketinggian langit-langit sekurang-kurangnya 7,6 m) di mana tidak terpasang springkler atau yang operasinya diduga akan sangat terlambat, ukuran besarnya kebakaran rancangan dapat terdiri dari kebakaran *steady* atau kebakaran yang tumbuh sampai suatu ukuran terbatas konstan. Laju pelepasan kalor untuk fase *steady* dari kebakaran rancangan sebaiknya sekurang-kurangnya 2000 Btu/detik (2110 kW). Ukuran besarnya kebakaran rancangan dengan laju pelepasan kalor yang lebih rendah mengandalkan pada pengendalian ketat terhadap bahan bakar, menjaga jarak pemisahan dan mengabaikan penggunaan atau modifikasi sementara terhadap ruangan yang dapat terjadi harian atau musiman.

### 7.3 Deteksi kebakaran dan pengaktifan springkler

Respon dari springkler dan detektor yang dipasang di bawah langit-langit dapat diperkirakan dari kenaikan temperatur yang ditimbulkan oleh kebakaran pada lokasi tsb. Kenaikan temperatur bergantung kepada jarak vertikal di atas dasar kebakaran dan radius dari sumbu pusat kebakaran. SNI 03-3986-2000, Tata cara perencanaan, pemasangan dan pengujian sistem deteksi dan alarm kebakaran untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung, menguraikan suatu prosedur untuk menentukan jarak antara detektor panas (untuk ketinggian langit-langit kurang dari 9 m) berdasarkan ukuran dan laju pertumbuhan kebakaran yang akan dideteksi, berbagai ketinggian langit-langit, dan temperatur ambien. Teori yang mendasarinya, asumsi, batasan, dan sumber kesalahan potensial dan yang diketahui, untuk memperkirakan respon detektor panas dan detektor asap diidentifikasi dan dibahas dalam buku Schifiliti dan Pucci (1996). Suatu analisis teknik diperlukan untuk langit-langit yang lebih tinggi dari 9 m.

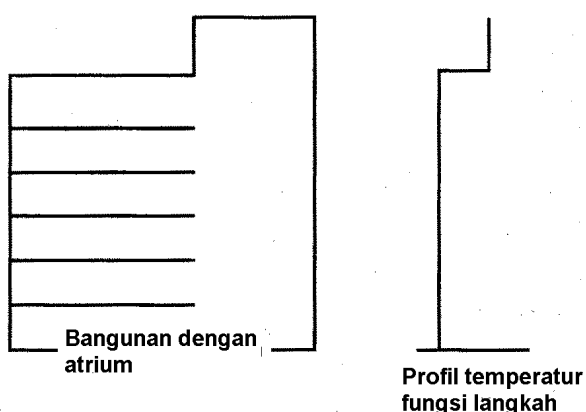
### 7.4\* Stratifikasi asap

#### 7.4.1 Umum

Potensi untuk terjadinya stratifikasi pada ketinggian manapun berhubungan dengan perbedaan temperatur antara asap dan sekelilingnya (Morton et al. 1956). Ketinggian maksimum membubungnya asap, khususnya pada saat-saat awal setelah penyalaan, bergantung kepada laju pelepasan kalor konveksi dan variasi temperatur ambien di ruangan terbuka.

Sangat menarik situasi kalau temperatur udara pada bagian atas ruangan besar terbuka lebih tinggi dari bagian di bawahnya sebelum terjadi kebakaran. Ini dapat terjadi sebagai akibat beban panas matahari kalau langit-langit mengandung bahan tembus cahaya. Metoda perhitungan dengan komputer pada waktu ini sudah ada untuk mengevaluasi potensi terjadinya stratifikasi sebelum lapisan asap mencapai langit-langit.

Salah satu kasus yang menarik digambarkan pada gambar 3. Pada kasus ini temperatur udara ambien relatif konstan sampai suatu ketinggian, di mana di atasnya ada lapisan udara hangat dengan temperatur yang merata (*uniform*). Situasi semacam ini dapat terjadi kalau bagian atas dari sebuah mal, atrium, atau ruangan bervolume besar lainnya, tidak dihuni dan dibiarkan tanpa pengondisian udara.



Gambar 3 Profil temperatur udara pra-kebakaran



#### 7.4.2 Temperatur fungsi tangga

Kalau udara dalam ruangan mempunyai perubahan temperatur yang berlainan pada suatu ketinggian di atas lantai dasar, potensi terjadinya stratifikasi dapat dievaluasi dengan menerapkan korelasi temperatur garis tengah cendawan asap. Kalau temperatur garis tengah cendawan asap sama dengan temperatur ambien, maka cendawan asap tidak lagi lebih ringan dari udara sekelilingnya, kehilangan kemampuan untuk membubung, dan terstratifikasi pada ketinggian tersebut.

#### 7.4.3 Dampak stratifikasi asap pada desain sistem manajemen asap

Pada saat sistem evakuasi asap mulai dijalankan dalam sebuah atrium atau ruang besar, kondisi stratifikasi akan dieliminasi dengan pembuangan lapisan udara panas yang di atas. Masalah yang dihadapi perancang adalah bagaimana memastikan bahwa kehadiran asap dapat segera dideteksi dalam semua profil temperatur pra-kebakaran potensial. Pada kondisi tertentu, misalnya pada malam hari atau siang hari yang sejuk, ada kemungkinan tidak akan terjadi stratifikasi dan setiap cendawan asap akan segera membubung ke atas sampai ke atap atau langit-langit, sehingga deteksi asap pada atau dekat puncak ruangan dapat responsif. Pada kasus yang lain, misalnya hari yang panas atau siang hari dengan beban matahari yang besar, maka cendawan asap mungkin tidak akan mencapai puncak ruangan dan akibatnya asap dapat menyebar pada ketinggian lebih rendah dari yang direncanakan, sehingga detektor asap dekat puncak ruangan tidak akan merespon dan sistem manajemen asap tidak diaktifkan. Tidak ada suatu cara yang pasti untuk mengidentifikasi kondisi apa yang terjadi pada awal kebakaran. Salah satu skema deteksi berikut ini dapat memberikan deteksi cepat tanpa tergantung kondisi yang ada pada awal kebakaran:

- (a) Berkas sinar ke atas untuk mendeteksi lapisan asap.  
Maksud cara ini adalah untuk dengan cepat mendeteksi terbentuknya lapisan asap pada kondisi temperatur apapun. Satu atau lebih berkas sinar diarahkan ke atas agar memotong lapisan asap tanpa tergantung ketinggian stratifikasi asap. Untuk kehandalan bila menerapkan cara ini sebaiknya dipasang lebih dari satu detektor asap jenis berkas sinar.
- (b) Berkas sinar horisontal untuk mendeteksi lapisan asap pada berbagai ketinggian.  
Maksud cara ini adalah untuk dengan cepat mendeteksi terbentuknya lapisan asap pada kondisi temperatur apapun. Satu atau lebih detektor berkas sinar dipasang di langit-langit. Detektor tambahan dipasang pada beberapa ketinggian yang lebih rendah dalam ruangan. Posisi yang tepat dari detektor ditentukan oleh rancangan spesifik tetapi perlu mencakup detektor pada dasar ruangan yang tidak dikondisikan dan pada atau dekat ketinggian rancangan lapisan asap dengan beberapa posisi berkas sinar dipasang pada beberapa ketinggian antara.
- (c) Berkas sinar horisontal untuk mendeteksi lapisan asap pada berbagai ketinggian.  
Maksud cara ini adalah untuk mendeteksi cendawan asap yang membubung dan bukan mendeteksi lapisan asap. Untuk maksud ini, suatu susunan detektor berkas sinar dipasang cukup berdekatan satu sama lain untuk menjamin berkas sinar akan memotong cendawan asap, dipasang pada ketinggian di bawah lapisan stratifikasi terendah yang diperkirakan. Jarak antara berkas sinar didasarkan kepada lebar cendawan asap yang potensial paling sempit pada ketinggian deteksi tersebut.

#### 7.5\* Sifat lapisan asap

Rumus untuk menghitung ketebalan lapisan asap, kenaikan temperatur rata-rata, densitas optik, dan konsentrasi komponen asap, pada tahap pengisian asap dan tahap pengeluaran asap yang seolah-olah konstan (*quasi-steady vented stage*) dimuat pada tabel 3. Rumus ini berlaku untuk kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan dan kebakaran  $t$ -kuadrat. Rumus ini dapat juga digunakan untuk menghitung kondisi di dalam lapisan asap pada saat pengeluaran asap telah terjadi.

Tabel 3 Rumus-rumus untuk menghitung *properties* lapisan asap

Parameter	Steady fires	Unsteady fires	Vented fires
$\Delta T$	$T_o \{[\exp (Q_r/Q_o)] - 1\}$	$T_o \{[\exp (Q_r/Q_o)] - 1\}$	$[60(1-\chi_1)Q_c]/(\rho_o c_p V)$
$D$	$(D_m Q t)/[\chi_\alpha \Delta H_c A (H-z)]$	$(D_m \alpha t^3)/[3\chi_\alpha \Delta H_c A (H-z)]$	$(60 D_m Q)/(\chi_\alpha \Delta H_c V)$
$Y_i$	$(f_i Q t)/[\rho_o \chi_\alpha \Delta H_c A (H-z)]$	$(f_i \alpha t^3)/[3\rho_o \chi_\alpha \Delta H_c A (H-z)]$	$(60 f_i Q)/(\rho_o \chi_\alpha \Delta H_c V)$

di mana:

- $A$  = luas penampang horisontal ruangan [ft<sup>2</sup>]  
 $c_p$  = kalor spesifik udara ambien [Btu/lb.°F]  
 $D$  =  $L^{-1} \log (I_o/I)$  = densitas optik  
 $D_m$  =  $D/m_f$   
 = densitas optik massa, diukur pada suatu pancaran uji yang berisi semua asap dari suatu contoh bahan uji.  
 $F_i$  = *yield factor of species i* [lb species i / lb bahan bakar]  
 $H$  = ketinggian langit-langit [ft]  
 $\Delta H_c$  = kalor pembakaran sempurna [Btu/lb]  
 $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran [Btu/detik]  
 $Q_c$  = bagian konvektif dari laju pelepasan kalor [Btu/detik]  
 $Q_n$  =  $\int (1-\chi_1) Q dt$   
 Untuk *steady fires* :  $Q_n = (1-\chi_1) Q t$  [Btu]  
 Untuk *t<sup>2</sup>-fires* :  $Q_n = (1-\chi_1) \alpha t^3 / 3$  [Btu]  
 $Q_o$  =  $\rho_o c_p T_o A (H-z)$  [Btu]  
 $t$  = jangka waktu sejak penyalaan [detik]  
 $T_o$  = temperatur udara ambien, absolut [°R]  
 $\Delta T$  = kenaikan temperatur dalam lapisan asap [°F]  
 $V$  = laju volumetrik pelepasan tekanan  
 $Y_i$  = fraksi massa *species i* [lb species i / lb asap]  
 $z$  = ketinggian dari puncak bahan bakar ke bidang pemisah lapisan asap [ft]  
 $\alpha$  = koefisien pertumbuhan *t<sup>2</sup>-fires* [Btu/detik<sup>2</sup>]  
 $\rho_o$  = densitas udara ambien [lb/ft<sup>3</sup>]  
 $\chi_\alpha$  = faktor efisiensi pembakaran, nilai maximum 1 (Tewarson 1988)  
 $\chi_1$  = faktor kehilangan kalor total dari lapisan asap ke batas atrium, nilai maximum 1, kenaikan temperatur maximum terjadi kalau  $\chi_1 = 0$ .

## 7.6\* Ketinggian dari indikasi pertama asap setiap saat

### 7.6.1 Umum

Posisi dari indikasi pertama asap setiap saat dapat ditentukan dalam butir 7.7 dan dengan rumus dalam butir 7.6.2. Hubungan ini membahas tiga situasi berikut:

- (1) Pembuangan asap tidak diaktifkan (lihat butir 7.6.2).
- (2) Laju aliran massa pembuangan asap sama dengan laju aliran massa yang dipasok cendawan asap ke lapisan asap (lihat butir 7.7.1).
- (3) Laju aliran massa pembuangan asap kurang dari laju aliran massa yang dipasok cendawan asap ke lapisan asap (lihat butir 7.7.2).

### 7.6.2 Ketinggian dari indikasi asap pertama tanpa pembuangan asap diaktifkan

#### 7.6.2.1 Kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan (*steady fires*)

Untuk jenis kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan, ketinggian awal indikasi asap di atas permukaan kebakaran,  $z$ , dapat diperkirakan pada setiap saat,  $t$ , dengan rumus (3), di mana kalau perhitungan menghasilkan  $z/H > 1,0$  berarti lapisan asap belum mulai turun.

$$\frac{z}{H} = 0,67 - 0,28 \ln \left( \frac{tQ^{1/3} / H^{4/3}}{A / H^2} \right) \quad (3)$$

di mana:

- $z$  = ketinggian indikasi awal asap di atas permukaan kebakaran [ft]  
 $H$  = tinggi langit-langit di atas permukaan kebakaran [ft]  
 $t$  = waktu [detik]  
 $Q$  = laju pelepasan kalor [Btu/detik]  
 $A$  = luas penampang ruang yang sedang diisi asap [ft<sup>2</sup>]

Rumus (3) didasarkan pada data experimental dari penelitian yang menggunakan luas penampang seragam terhadap ketinggian, dengan rasio  $A/H^2$  dalam rentang antara 0,9 sampai 14 dan untuk nilai  $z/H$  lebih besar atau sama dengan 0,2 [referensi Hekestad & Delichatsious (1977), Nowler (1987), Mulholland et al (1981), Cooper et al (1981), Hagglud et al (1985)]. Rumus ini diterapkan untuk kondisi terburuk, di mana kebakaran jauh dari dinding manapun. Rumus ini menghasilkan perkiraan konservatif karena  $z$  dikaitkan dengan tinggi indikasi awal asap, bukan kepada posisi bidang pemisah lapisan asap.

#### 7.6.2.2\* Kebakaran dengan laju aliran kalor tidak konstan (*unsteady fires*)

Turunnya ketinggian indikasi awal asap juga dapat diperkirakan untuk kebakaran pelepasan kalor tidak konstan jenis tertentu, misalnya untuk kebakaran  $t$ -kuadrat. Dari teori dasar dan bukti experimental yang terbatas, ketinggian indikasi awal asap di atas permukaan kebakaran,  $z$ , dapat diperkirakan untuk waktu tertentu dengan rumus berikut, di mana perhitungan yang menghasilkan  $z/H > 1,0$  berarti lapisan asap belum mulai turun.

$$\frac{z}{H} = 0,23 \left( \frac{t}{t_g^{2/5} H^{4/5} (A/H^2)^{3/5}} \right)^{-1.45} \quad (4)$$

di mana:

- $z$  = ketinggian indikasi awal asap di atas permukaan kebakaran [ft]  
 $H$  = tinggi langit-langit di atas permukaan kebakaran [ft]  
 $t$  = waktu [detik]  
 $t_g$  = waktu pertumbuhan [detik]

Rumus (4) didasarkan kepada data experimental dari penelitian yang menggunakan rasio  $A/H^2$  dalam rentang 1,0 sampai 23 dan untuk nilai  $z/H \geq 0,2$  [Nowler (1987)]. Rumus (4) juga didasarkan kepada luas penampang seragam terhadap ketinggian. Rumus ini diterapkan untuk kondisi terburuk, di mana kebakaran jauh dari dinding manapun. Rumus ini menghasilkan perkiraan konservatif karena  $z$  dikaitkan dengan tinggi indikasi awal asap, bukan kepada posisi bidang pemisah lapisan asap.

#### 7.6.2.3 Massa yang terbakar

Rumus yang diberikan pada butir 7.6.2.1 dan 7.6.2.2 berguna untuk mengevaluasi posisi lapisan asap setiap saat setelah penyalaan. Untuk kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan, massa total terbakar yang diperlukan untuk mendukung laju pelepasan kalor konstan dalam suatu jangka waktu dapat ditentukan dengan rumus (5).

$$m = \frac{Q\Delta t}{H_c} \quad (5)$$

di mana:

- $m$  = massa total terbakar [lb]  
 $Q$  = laju pelepasan kalor [Btu/detik]

$\Delta t$  = jangka waktu kebakaran [detik]  
 $H_c$  = kalor pembakaran bahan bakar [Btu/lb]

Untuk kebakaran jenis  $t$ -kuadrat, massa total terbakar yang diperlukan dalam suatu jangka waktu dapat ditentukan dengan rumus (6).

$$m = \frac{333\Delta t^3}{H_c t_g^2} \quad (6)$$

di mana :

$m$  = massa total terbakar [lb]  
 $\Delta t$  = jangka waktu kebakaran [detik]  
 $H_c$  = kalor pembakaran bahan bakar [Btu/lb]  
 $t_g$  = waktu pertumbuhan [detik]

#### 7.6.2.4 Geometri penampang berubah dan geometri kompleks

Rumus (3) dan (4) didasarkan pada percobaan yang dilakukan pada luas penampang yang seragam. Dalam kenyataannya, ruang besar yang perlu dievaluasi tidak selalu mempunyai geometri seragam yang sederhana. Turunnya indikasi awal lapisan asap pada ruang dengan penampang berubah atau ruang dengan geometri kompleks dapat dipengaruhi oleh kondisi seperti langit-langit miring, variasi penampang ruang, dan tonjolan ke cendawan asap. Dalam hal adanya ketidak teraturan tersebut maka metoda analisis yang lain perlu digunakan. Metoda analisis lain yang berbeda dalam kompleksitasnya tetapi berguna untuk menghadapi ruang yang kompleks dan geometri tidak seragam, sebagai berikut :

- (1) Pemodelan skala (lihat butir 7.1.1.1. dan 7.1.2)
- (2) Pemodelan CFD (lihat butir 7.1.1.3.2)
- (3)\* Adaptasi pemodelan zona
- (4)\* Analisis batas (*Bounding analysis*)

### 7.7 Posisi bidang pemisah lapisan asap dengan pengoperasian pembuangan asap

#### 7.7.1 Laju aliran massa pembuangan asap sama dengan laju aliran massa pasokan asap

Setelah sistem pembuangan asap bekerja untuk jangka waktu yang cukup, akan tercapai suatu keseimbangan posisi bidang pemisah lapisan asap apabila laju aliran massa pembuangan asap sama dengan masukan laju aliran massa dari cendawan asap ke dasar lapisan asap. Setelah tercapai keseimbangan, maka posisi ini akan bertahan selama kedua laju aliran massa tersebut tetap sama. Lihat butir 7.8 untuk laju aliran massa yang dipasok ke dasar lapisan asap untuk berbagai konfigurasi cendawan asap.

#### 7.7.2 Laju aliran massa asap tidak sama dengan laju aliran massa pasokan asap

Dalam hal pasokan laju aliran massa asap ke lapisan asap lebih besar dari pada laju aliran massa pembuangannya, tidak akan tercapai suatu keseimbangan bidang pemisah lapisan asap. Dapat diduga bidang pemisah lapisan asap akan turun, tetapi dengan kecepatan turun yang lebih lambat dibanding kalau tidak ada sistem pembuangan asap (lihat butir 7.6.2). Tabel 4 memberikan informasi tentang posisi lapisan asap sebagai fungsi waktu untuk cendawan asap aksis-simetrik (*axisymmetric*) dari kebakaran laju pelepasan kalor konstan, pada beberapa rasio laju aliran massa ( $m/m_e$ ). Untuk konfigurasi cendawan asap lainnya perlu dilakukan analisa dengan komputer.

**Tabel 4 Waktu yang diperlukan untuk bidang pemisah lapisan asap mencapai suatu ketinggian**

$m/m_c$	0,25	0,35	0,5	0,7	0,85	0,95
	$t/t_o$					
$z/H$						
0,2	1,12	1,19	1,3	1,55	1,89	2,49
0,3	1,14	1,21	1,35	1,63	2,05	2,78
0,4	1,16	1,24	1,4	1,72	2,24	3,15
0,5	1,17	1,28	1,45	1,84	2,48	3,57
0,6	1,20	1,32	1,52	2,00	2,78	4,11
0,7	1,23	1,36	1,61	2,20	3,17	4,98
0,8	1,26	1,41	1,71	2,46	3,71	6,25

di mana:

- $z$  = ketinggian desain bidang pemisah lapisan asap di atas sumber kebakaran.  
 $H$  = tinggi langit-langit dari sumber kebakaran.  
 $t$  = jangka waktu bidang pemisah lapisan asap menurun sampai  $z$ .  
 $t_o$  = nilai  $t$  bila tidak ada pembuangan asap [lihat rumus (3)]  
 $m$  = laju aliran massa pembuangan asap (dikurangi laju aliran massa dari sumber lainnya selain *plume*)  
 $m_c$  = nilai  $m$  yang diperlukan untuk menjaga bidang pemisah lapisan asap tetap pada  $z$  [lihat Rumus (8)]

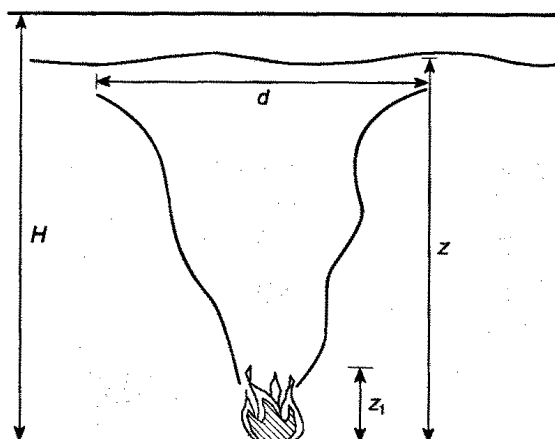
## 7.8 Laju produksi massa asap

Ketinggian bidang pemisah lapisan asap dapat dipertahankan konstan dengan laju pembuangan aliran massa dari lapisan asap yang sama dengan yang dipasok oleh cendawan asap. Laju aliran massa pasokan dari cendawan asap bergantung pada konfigurasi cendawan asap. Standar ini akan membahas tiga macam konfigurasi cendawan asap. Lubang masuk fan pembuangan harus dibuat dengan ukuran dan distribusi sedemikian sehingga memperkecil kemungkinan udara di bawah lapisan asap terhisap langsung menembus lapisan asap, suatu fenomena yang kadang-kadang disebut *plugholing*. Untuk mencapai tujuan ini, kecepatan aliran melalui lubang masuk tersebut tidak boleh lebih besar dari batas kecepatan yang menyebabkan udara terhisap langsung menembus lapisan asap.

### 7.8.1 Cendawan asap aksis-simetrik

Suatu cendawan asap aksis-simetrik (lihat gambar 4) diharapkan timbul pada kebakaran yang berasal dari lantai atrium, jauh dari dinding manapun. Dalam kasus ini, udara terikut dari semua sisi cendawan asap dan keseluruhan tinggi cendawan asap tersebut sampai cendawan asap terbenam di dalam lapisan asap.

**7.8.1.1** Laju aliran massa pembangkitan asap dapat diperkirakan, didasarkan pada udara yang terperangkap, karena laju aliran massa gas produk reaksi pembakaran yang dihasilkan oleh kebakaran biasanya jauh lebih kecil dari laju aliran massa udara yang terikut ke dalam cendawan asap.



**Gambar 4 Cendawan asap aksis-simetrik**

**7.8.1.2\*** Beberapa rumus untuk ikutan udara (*entrainment relations*) cendawan asap jenis aksis-simetrik sudah pernah diusulkan. Rumus yang direkomendasikan dalam Standar ini adalah yang pertama kali diturunkan dalam hubungan dengan NFPA 204 *Guide for Smoke and Heat Venting* edisi 1982. Rumus tsb kemudian sedikit disempurnakan dengan memasukkan sumber virtual dan juga dibandingkan dengan rumus ikutan udara lainnya (lihat juga NFPA 204 *Guide for Smoke and Heat Venting* edisi 1982 dan buku Heskestad). Rumus ikutan udara berikut ini pada dasarnya yang disajikan di dalam NFPA 204 *Guide for Smoke and Heat Venting*. Efek sumber virtual diabaikan, karena hal itu umumnya akan kecil untuk aplikasi ini dan sejauh ini hanya dapat diperkirakan dengan baik untuk genangan kebakaran (*pool fires*). Definisi dari elevasi batas (*limiting elevation*), sebanding (*corresponding*) kira-kira dengan ketinggian nyala api yang bercahaya, dinyatakan sebagai berikut:

$$z_l = 0,533Q_c^{2/5} \quad (7)$$

di mana:

- $z_l$  = batas elevasi [ft]  
 $Q_c$  = bagian konveksi dari laju pelepasan kalor [Btu/detik]

Laju aliran massa cendawan asap,  $m$ , di atas elevasi batas diperkirakan dari rumus (8):

$$m = [0,022Q_c^{1/3} z^{5/3}] + 0,0042Q_c \quad (z > z_l) \quad (8)$$

di mana:

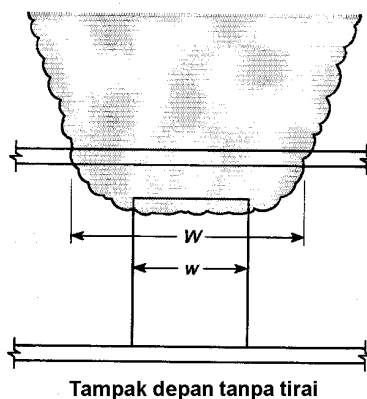
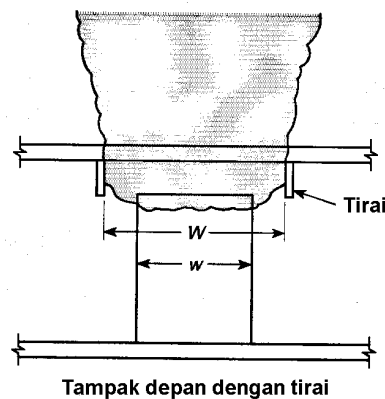
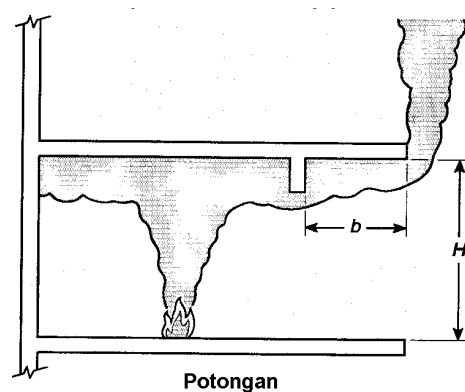
- $m$  = laju aliran massa dalam cendawan asap pada ketinggian  $z$  [lb/detik]  
 $z$  = ketinggian di atas bahan bakar [ft]

Laju aliran massa di bawah puncak nyala api dihitung dengan:

$$m = 0,0208Q_c^{3/5} z \quad (z \leq z_l)$$

**7.8.1.3** Laju aliran massa yang dipasok oleh cendawan asap ke dalam lapisan asap diperoleh dari rumus (9) untuk ketinggian jernih (*clear height*) lebih rendah dari puncak nyala api [lihat rumus (7)], dan rumus (8) kalau ketinggiannya lebih dari puncak nyala api. Ketinggian yang dimaksud itu dipilih sebagai ketinggian rancangan (*design height*) bidang pemisah lapisan asap di atas sumber kebakaran.

**7.8.1.4** Perlu diperhatikan bahwa rumus (8) dan (9) tidak secara eksplisit membicarakan jenis bahan yang terbakar, hanya menyatakan laju pelepasan kalor saja. Hal ini karena laju aliran massa udara ikutan jauh lebih besar dari pada laju massa produk pembakaran, dan kepada jumlah udara ikutan yang hanya merupakan fungsi dari laju pelepasan kalor kebakaran.



**Gambar 5** Luapan cendawan asap di balkon

**7.8.1.5** Kebakaran dapat terjadi di sudut atau dekat pinggir ruangan terbuka. Dalam kasus ini, ikutan udara mungkin tidak berasal dari semua sisi cendawan asap, sehingga laju produksi asap lebih kecil dari pada kalau udara ikutan dari semua sisi cendawan asap. Jadi perhitungan rancangan konservatif sebaiknya dilakukan berdasar asumsi bahwa udara ikutan terjadi pada semua sisi.

### 7.8.2 Cendawan asap luapan balkon (*Balcony spill plumes*)

**7.8.2.1\*** Suatu cendawan asap luapan balkon adalah yang mengalir di bawah dan sekeliling balkon sebelum membubung, yang memberikan kesan seakan meluap dari bawah balkon, kalau dilihat dari bawah. (lihat gambar 5). Skenario dengan cendawan asap luapan balkon mencakup asap yang membubung di atas kebakaran, mencapai langit-langit, balkon, atau tonjolan penting horisontal lainnya, kemudian mengalir dalam arah horisontal menuju pinggir balkon. Karakteristik dari cendawan asap luapan balkon yang ditimbulkan bergantung pada karakteristik kebakaran, lebar dari cendawan asap, dan ketinggian langit-langit di atas kebakaran. Selain itu, pengaruh jalur aliran horisontal dari garis tengah cendawan asap ke pinggir balkon menjadi signifikan.

Untuk situasi yang menyangkut kebakaran dalam ruang penghubung yang langsung di sebelah atrium, udara ikutan ke dalam luapan balkon dapat dihitung dengan rumus (10):

$$m = 0,12(QW^2)^{1/3}(z_b + 0,25H) \quad (10)$$

di mana:

$m$	=	laju aliran massa dalam cendawan asap [lb/detik]
$Q$	=	laju aliran kalor kebakaran [Btu/detik]
$W$	=	lebar cendawan asap pada waktu meluap di bawah balkon [ft]
$z_b$	=	ketinggian di atas balkon [ft]
$H$	=	ketinggian balkon di atas bahan bakar [ft]

Rumus (10) didasarkan kepada interpretasi oleh Law [1986] dari eksperimen berskala kecil oleh Morgan dan Marshall [1979]. Rumus (10) sebaiknya dipandang sebagai suatu aproksimasi terhadap suatu masalah yang sulit.

**7.8.2.2** Bila  $z_b$  kira-kira 13 kali lebarnya, cendawan asap luapan balkon diperkirakan mempunyai laju produksi yang sama dengan suatu cendawan asap aksis-simetrik. Sebagai konsekuensinya, untuk  $z_b > 13 W$  maka laju produksi asap dari cendawan asap luapan balkon harus diperkirakan dengan Rumus (8).

**7.8.2.3** Lebar cendawan asap,  $W$ , dapat diperkirakan dengan mempertimbangkan adanya penghalang fisik yang menonjol di bawah balkon yang akan menghambat migrasi horisontal asap di bawah balkon. Dalam hal tidak ada penghalang fisik, observasi visual dari lebar cendawan asap luapan balkon pada pinggir balkon telah dilakukan oleh Morgan dan Marshall [1979] dalam satu set eksperimen skala kecil dan dianalisa oleh Law [1986]. Dalam eksperimen ini, kebakaran dibuat dalam ruangan berhubungan, langsung di sebelah atrium. Suatu lebar ekuivalen dapat didefinisikan dengan menyamakan udara ikutan dari suatu cendawan asap luapan balkon tak terbatas dengan lebar dari cendawan asap luapan balkon terbatas. Lebar ekuivalen tsb dievaluasi dengan rumus (11).

$$W = w + b \quad (11)$$

di mana:

$W$	=	lebar plume [ft]
$w$	=	lebar bukaan dari daerah sumber kebakaran [ft]
$b$	=	jarak dari bukaan ke pinggir balkon [ft]



### 7.8.3 Cendawan asap jendela

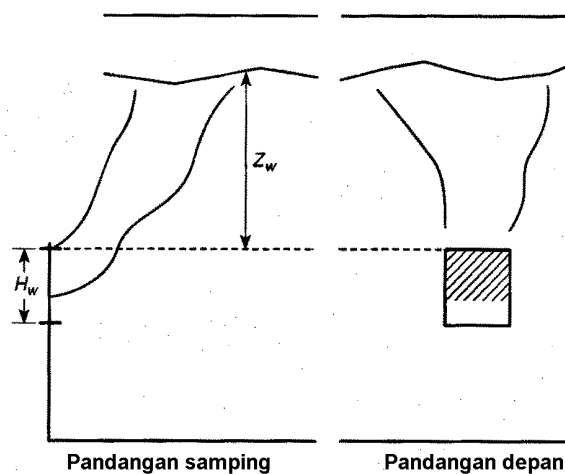
**7.8.3.1** Cendawan asap yang keluar dari bukaan dinding, seperti pintu dan jendela, ke dalam ruangan bervolume besar terbuka disebut sebagai cendawan asap jendela. Lihat gambar 6. Setelah terjadi penyalaan serentak (*flashover*) dalam ruangan, laju pelepasan kalor total dapat diharapkan akan dikendalikan oleh laju aliran udara melalui bukaan dinding dari ruangan terbuka; artinya kebakaran “dikontrol oleh ventilasi”. Laju pelepasan kalor dapat merupakan fungsi karakteristik bukaan ventilasi. Berdasarkan data experimental dari kayu dan poliuretan, laju pelepasan kalor rata-rata dapat dihitung dengan rumus berikut (Modak dan Alpert, 1978, dan Tewarson, 1988).

$$Q = 61,2A_w H_w^{1/2} \quad (12)$$

di mana:

- $Q$  = laju pelepasan kalor [Btu/detik]  
 $A_w$  = luas bukaan ventilasi [ft<sup>2</sup>]  
 $H_w$  = tinggi bukaan ventilasi [ft]

Rumus ini disusun dengan asumsi bahwa laju pelepasan kalor dibatasi oleh laju aliran udara ke dalam kompartemen, pembangkitan bahan bakar dibatasi oleh pasokan udara, dan kelebihan bahan bakar akan terbakar di luar kompartemen menggunakan udara ikutan. Metoda dalam bagian ini berlaku hanya untuk kompartemen dengan bukaan ventilasi tunggal.



**Gambar 6 Cendawan asap jendela**

**7.8.3.2** Udara ikutan ke dalam cendawan asap jendela dapat ditentukan secara analogi dengan cendawan asap aksis-simetrik. Ini dapat diperoleh dengan menentukan laju udara ikutan pada puncak nyala api keluar dari jendela dan menentukan ketinggian dalam cendawan asap aksis-simetrik yang akan menimbulkan jumlah udara ikutan yang sama. Sebagai hasil analogi ini, suatu faktor koreksi untuk mengatasi perbedaan antara ketinggian api sesungguhnya dengan ketinggian api ekuivalen untuk cendawan asap aksis-simetrik, dapat diaplikasikan ke rumus cendawan asap aksis-simetrik dengan rumus berikut.

$$a = [2,40A_w^{2/5} H_w^{1/5}] - 2,1H_w \quad (13)$$

di mana:

$a$  = tinggi efektif [ft]  
 $A_w$  = luas bukaan ventilasi [ft<sup>2</sup>]  
 $H_w$  = tinggi bukaan ventilasi [ft]

Sehingga laju aliran udara ikutan untuk cendawan asap jendela dihitung dengan rumus berikut.

$$m = [0,022Q_c^{1/3} (z_w + a)^{5/3}] + 0,0042Q_c \quad (14)$$

Di mana  $z_w$  adalah tinggi di atas puncak jendela [ft].

Dengan mengganti  $Q_c$  dari Rumus (12) maka diperoleh rumus berikut.

$$m = [0,077(A_w H_w^{1/2})^{1/3} (z_w + a)^{5/3}] + 0,18A_w H_w^{1/2} \quad (15)$$

Ketinggian sumber virtual dinyatakan sebagai ketinggian sumber kebakaran di tempat terbuka yang menimbulkan udara ikutan yang sama dengan cendawan asap jendela pada ujung nyala api cendawan asap jendela. Udara ikutan selanjutnya di atas ujung nyala api diasumsikan seperti yang ditimbulkan oleh kebakaran di tempat terbuka. Walaupun pengembangan ini adalah suatu model yang dirumuskan dengan cukup beralasan untuk udara ikutan cendawan asap jendela, tidak ada data yang tersedia untuk validasi penggunaannya. Oleh karena itu ketepatan model ini tidak diketahui.

#### 7.8.4 Lebar cendawan asap

Pada waktu cendawan asap membubung, udara terikuk dan cendawan asap melebar. Secara umum diameter total cendawan asap dapat diperkirakan sebagai berikut :

$$d = K_d z \quad (16)$$

di mana:

$d$  = diameter cendawan asap [ft]  
 $z$  = tinggi [ft]  
 $K_d$  = konstanta diameter

Konstanta diameter dapat bernilai antara 0,25 sampai 0,5. Direkomendasikan agar nilai  $K_d$  dipilih yang memberikan hasil perhitungan konservatif:

- (1)  $K_d = 0,5$  memberikan perkiraan konservatif untuk cendawan asap menempel dinding
- (2)  $K_d = 0,25$  memberikan perkiraan konservatif pada waktu mempertimbangkan penggunaan berkas sinar untuk deteksi cendawan asap.

#### 7.8.5 Temperatur cendawan asap

##### 7.8.5.1 Temperatur rata-rata

Berdasarkan hukum pertama termodinamika, temperatur rata-rata dari cendawan asap adalah:

$$T_p = T_0 + \frac{Q_c}{mC_p} \quad (17)$$

di mana:

- $T_p$  = temperatur rata-rata cendawan asap pada ketinggian  $z$  [°F]  
 $T_o$  = temperatur ambien [°F]  
 $Q_c$  = bagian konveksi dari laju pelepasan kalor [Btu/detik]  
 $C_p$  = kalor spesifik gas cendawan asap = 0,24 [Btu/lb-°F]  
 $m$  = laju aliran massa cendawan asap [lb/detik]

Laju aliran massa dari cendawan asap dapat dihitung dengan Rumus (8) atau (9). Rumus (8) dikembangkan untuk cendawan asap dengan daya apung yang kuat; untuk perbedaan kecil antara temperatur cendawan asap dan temperatur ambien maka kesalahan akibat daya apung rendah dapat menjadi signifikan. Topik ini memerlukan studi lebih lanjut; dalam hal tidak diperoleh data yang lebih baik, direkomendasikan agar rumus tsb tidak digunakan bila perbedaan temperatur tsb kecil ( $< 4$  °F).

### 7.8.5.2 Temperatur garis sumbu

Temperatur yang dihitung dengan rumus (17) adalah dengan rata-rata laju aliran massa, tetapi temperatur bervariasi pada seluruh penampang cendawan asap. Temperatur cendawan asap paling besar pada pusatnya; temperatur pada pusat cendawan asap menjadi perhatian bila atrium diuji dengan kebakaran sesungguhnya, yang akan dibahas pada bagian lain.

Temperatur pada pusat cendawan asap dapat diperkirakan dengan rumus (18).

$$T_{cp} = T_a + 0,0067 \left( \frac{T_a}{g C_p^2 \rho_a^2} \right)^{1/3} \frac{Q^{2/3}}{z^{5/3}} \quad (18)$$

di mana:

- $T_{cp}$  = temperatur absolut pusat *plume* pada ketinggian  $z$  [°R]  
 $T_a$  = temperatur absolut ambien [°R]  
 $\rho_a$  = densitas udara ambien [lb/ft<sup>3</sup>]  
 $g$  = percepatan gravitasi [= 32,2 ft/detik<sup>2</sup>]  
 $z$  = ketinggian di atas puncak bahan bakar [ft]  
 $C_p$  = kalor spesifik udara [= 0,241 Btu/lb-°F]  
 $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran [Btu/detik]

### 7.9\* Jumlah lubang pembuangan

Bila kedalaman lapisan asap di bawah suatu lubang keluaran relatif dangkal, suatu laju aliran keluaran yang besar dapat menyebabkan udara ikutan udara dingin dari lapisan jernih. Fenomena ini disebut *plugholing*. Jumlah lubang pembuangan perlu dipilih sehingga laju aliran buangan maximum tanpa terjadi fenomena *plugholing* tidak dilampaui. Oleh karena itu mungkin diperlukan lebih dari satu lubang keluaran. Laju aliran massa maximum, yang dapat dibuang secara efisien melalui satu lubang pembuangan, dapat dihitung dengan rumus (19) berikut ini [CIBSE, 1995].

$$m_{max} = 0,35 \beta d^{5/2} \left[ \frac{T_s - T_o}{T_s} \right]^{1/2} \left[ \frac{T_o}{T_s} \right]^{1/2} \quad (19)$$

di mana:

- $m_{max}$  = laju aliran massa pembuangan tanpa *plugholing* [lb/detik]  
 $T_s$  = temperatur absolut lapisan asap [°R]  
 $T_o$  = temperatur absolut ambien [°R]

## SNI 03-7012-2004

- $d$  = kedalaman lapisan asap di bawah lubang pembuangan [ft]  
 $\beta$  = faktor lokasi pembuangan (tanpa satuan)

Berdasarkan informasi yang terbatas, nilai  $\beta$  yang dianjurkan adalah :  
2,0 untuk lubang pembuangan di langit-langit dekat dinding,  
2,0 untuk lubang pembuangan di dinding dekat langit-langit,  
2,8 untuk lubang pembuangan di langit-langit jauh dari dinding manapun.

Dianjurkan agar rasio  $d/D$  sebaiknya lebih dari 2, di mana  $D$  adalah diameter lubang pembuangan. Untuk lubang pembuangan persegi panjang,  $D = 2ab/(a+b)$ , di mana  $a$  dan  $b$  adalah panjang dan lebar lubang pembuangan.

Laju aliran volumetrik maximum yang dapat dibuang melalui satu lubang pembuangan dapat dihitung dengan rumus (20).

$$V_{\max} = 0,537 \beta d^{5/2} [T_0 (T_s - T_0)]^{1/2} \quad (20)$$

di mana  $V_{\max}$  = laju aliran volumetrik maximum pada temperatur  $T_s$  [ft<sup>3</sup>/menit]

Bila pembuangan melalui suatu lubang pembuangan mendekati nilai maximum ini, perlu dipertahankan jarak pemisah antar lubang pembuangan agar memperkecil interaksi aliran dekat lubang pembuangan tsb. Satu kriteria untuk pemisahan antar lubang pembuangan adalah sekurang-kurangnya jarak dari lubang pembuangan tunggal yang akan menimbulkan kecepatan kecil sebarang berdasarkan *sink flow*. Dengan menggunakan nilai kecepatan 40 ft/menit, maka jarak pemisah minimum antar lubang pembuangan yang dipasang pada dinding dekat langit-langit (atau pada langit-langit dekat dinding) adalah:

$$S_{\min} = 0,023 \beta V_e^{1/2} \quad (21)$$

di mana:

- $S_{\min}$  = jarak pemisah minimum dari pinggir ke pinggir lubang pembuangan [ft]  
 $V_e$  = laju aliran volumetrik [ft<sup>3</sup>/menit]  
 $\beta$  = faktor lokasi lubang pembuangan (tanpa satuan)

### 7.10 Kedalaman minimum lapisan asap

Lapisan asap harus cukup dalam (tebal) agar mencakup aliran asap di bawah langit-langit yang diuraikan dalam butir 6.3.1.

### 7.11\* Laju aliran volumetrik

Untuk alasan praktis, menyatakan laju pembentukan asap dengan laju aliran volumetrik (ft<sup>3</sup>/menit) mungkin lebih disukai dibandingkan dengan laju aliran massa. Preferensi ini dapat diakomodir dengan membagi laju aliran massa dengan densitas asap:

$$V = 60m / \rho \quad (22)$$

di mana  $\rho$  = densitas asap [lb/ft<sup>3</sup>]

Laju aliran volumetrik yang dihitung dengan rumus (22) adalah pada temperatur lapisan asap. Untuk suatu sistem manajemen asap yang dirancang untuk beroperasi pada temperatur keseimbangan (lihat butir 7.7.1), maka sistem pengeluaran asap harus dirancang

dapat memberikan kapasitas volumetrik pembuangan yang cukup, pada temperatur lapisan asap.

### 7.12 Kecepatan maksimum pasokan udara

Kecepatan udara pasokan untuk tambahan (*make up*) pada keliling ruang yang besar dan terbuka, perlu dibatasi pada kecepatan yang cukup rendah agar tidak membelokkan cendawan asap, karena akan menambah laju keikutan udara (*air entrainment rate*), atau mengganggu bidang pemisah lapisan asap. Direkomendasikan kecepatan maximum ini 200 ft/menit, berdasarkan data defleksi api (Mudan dan Croce, 1988). Kalau mempertahankan ketinggian lapisan asap bukan menjadi sasaran rancangan, maka tidak menjadi masalah gangguan terhadap cendawan asap (*plume*) akibat kecepatan udara masukan.

### 7.13 Persyaratan aliran udara berlawanan

**7.13.1** Untuk mencegah asap yang berasal dari ruang yang berhubungan dengan ruang besar tidak merambat ke ruang besar, ruang yang berhubungan dengan ruang besar tersebut harus dikeluarkan asapnya dengan laju aliran yang cukup agar kecepatan udara dari ruang besar melalui bukaan yang berhubungan dengan ruang besar akan melampaui batas minimum. Batas kecepatan rata-rata,  $v$ , dapat dihitung dengan rumus (23) dari Heskestad (1989).

$$v = 38 \cdot [gH(T_f - T_o)/(T_f + 460)]^{1/2} \quad (23)$$

di mana:

$v$	=	kecepatan udara [ft/menit]
$g$	=	akselerasi gravitasi [= 32,3 ft/detik <sup>2</sup> ]
$H$	=	ketinggian bukaan [ft]
$T_f$	=	temperatur asap yang dipanaskan [°F]
$T_o$	=	temperatur udara ambien [°F]

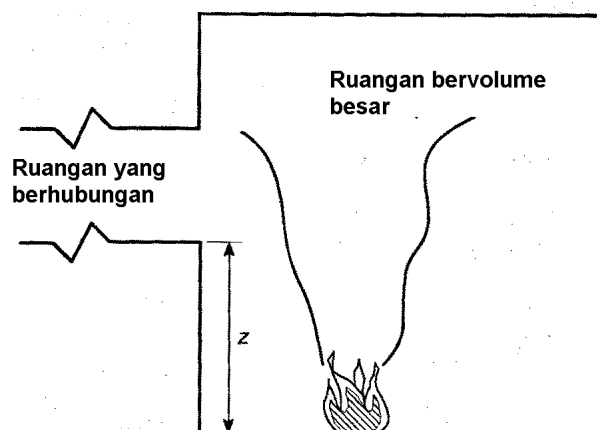
Sebagai contoh, dengan  $H = 10$  ft,  $T_f = 165$  °F (dianggap cukup realistis untuk ruang bersprinkler), dan  $T_o = 70$  °F, maka kecepatan batas adalah 270 ft/menit. Dengan kondisi yang sama tetapi  $T_f = 1640$  °F (dianggap realistis untuk ruang tanpa sprinkler), maka kecepatan batas menjadi 594 ft/menit.

**7.13.2** Untuk mencegah asap dari ruang besar tidak merambat masuk ke ruang yang berhubungan dengan ruang besar, udara harus dimasukkan dari ruang yang berhubungan dengan ruang besar tsb dengan laju aliran yang cukup agar kecepatan udara rata-rata pada bukaan ke ruang besar tsb melampaui suatu batas minimum [artinya, batas kecepatan rata-rata,  $v_e$ , yang dihitung dengan rumus (24)]. Dua kasus dapat dibedakan. Pada kasus pertama, bukaan ke ruang yang berhubungan dengan ruang besar berada di bawah posisi bidang pemisah lapisan asap, dan ruang yang berhubungan terekspos (*is exposed*) asap dari sebuah cendawan asap (*plume*) dekat dengan batas keliling ruang besar; dalam kasus ini batas kecepatan rata-rata,  $v_e$ , dapat dihitung dengan rumus (24).

$$v_e = 17[Q/z]^{1/3} \quad (24)$$

di mana:

$v_e$	=	batas kecepatan rata-rata [ft/menit]
$Q$	=	laju pelepasan kalor dari api [Btu/detik]
$Z$	=	jarak dari dasar api ke bagian bawah bukaan [ft] (Lihat gambar 7)



**Gambar 7 Pengukuran jarak di atas dasar kebakaran ke bagian bawah bukaan**

## 8 Perlengkapan dan kontrol

### 8.1 Umum

**8.1.1** Dinamika, daya apung, cendawan asap, dan stratifikasi kebakaran yang mungkin terjadi, bersama-sama dengan lebar dan tinggi ruangan yang bervolume besar, kesemuanya harus dipertimbangkan dalam memilih sistem manajemen asap.

Pada umumnya, sistem tata udara yang dirancang untuk ruangan tersebut tidak mempunyai kapasitas untuk digunakan sebagai sistem manajemen asap. Demikian juga lubang pasokan dan pembuangan yang tidak ditempatkan secara tepat untuk keperluan sistem manajemen asap.

Karena itu, dalam banyak sistem manajemen asap yang khusus untuk maksud itu patut dipertimbangkan.

**8.1.2** Beberapa ruangan bervolume besar yang sudah ada, yang mempunyai dinding atau atap kaca, pernah dilaporkan mencapai temperatur  $200^{\circ}\text{F}$  ( $93^{\circ}\text{C}$ ) di dalamnya karena adanya beban dari sinar matahari. Karena itu semua bahan bangunan yang dipakai di ruangan semacam itu harus mampu berfungsi di lingkungan yang panas tersebut.

### 8.2 Fan pembuangan

Fan pembuangan harus dipilih untuk dapat dioperasikan pada kondisi rancangan asap dan kebakaran. Meski pengenceran dengan udara ambien mungkin mendinginkan temperatur kebakaran secara signifikan, tetapi dalam beberapa kejadian pengaruh kebakaran akan langsung kepada peralatan.

### 8.3 Sistem udara tambahan

Cara paling sederhana untuk memasukkan udara tambahan ke dalam ruangan adalah melalui bukaan langsung keluar seperti pintu dan kisi-kisi, yang dapat dibuka bila sistem diaktifkan. Bukaan yang demikian dapat dikoordinasikan dengan rancangan arsitektural dan diletakkan di bawah lapisan asap rancangan. Untuk lokasi di mana bukaan semacam itu tidak praktis, suatu sistem pasokan udara mekanik dapat dipertimbangkan.

Sistem ini mungkin dapat merupakan adaptasi sistem tata udara gedung bila kapasitas, lokasi lubang pembuangan dan kecepatan alirannya cocok dengan kebutuhan. Dengan

sistem ini, perlu disediakan sarana untuk mencegah beroperasinya sistem pasokan udara sampai terjadinya aliran pembuangan untuk menghindari presurisasi daerah yang terbakar. Untuk lokasi di mana iklim dapat menyebabkan kerusakan yang sangat besar bagi ruangan atau isinya selama pengujian atau seringnya terjadi pengoperasian sistem secara tidak sengaja, pemanasan udara tambahan sebaiknya dipertimbangkan.

## 8.4 Sistem-sistem kontrol

### 8.4.1 Kesederhanaan

Kesederhanaan harus menjadi sasaran utama untuk setiap sistem kontrol manajemen asap. Sistem yang rumit harus dihindari. Sebab sistem yang demikian cenderung membingungkan, mungkin tidak terpasang dengan benar, mungkin tidak diuji dengan tepat, mungkin mempunyai tingkat kehandalan yang rendah, atau mungkin tidak pernah dipelihara.

### 8.4.2 Koordinasi

Sistem kontrol sebaiknya mengkoordinasi secara penuh interlok dan *interface* sistem manajemen asap dengan sistem deteksi dan alarm kebakaran, sistem springkler, sistem tata udara, dan sistem lain yang terkait.

### 8.4.3 Sistem kontrol tata udara

Kontrol pengoperasian sistem tata udara sebaiknya menampung moda manajemen asap, yang harus mempunyai prioritas tertinggi di atas moda kontrol yang lain.

### 8.4.4 Waktu respon

Pengaktifan sistem manajemen asap sebaiknya dimulai segera setelah sistem menerima perintah pengaktifan yang tepat. Sistem manajemen asap sebaiknya menggerakkan komponen individual, seperti damper udara dan fan, dalam urutan yang diperlukan untuk menghindari kerusakan fisik peralatan tersebut.

Sebaiknya dipertimbangkan dengan hati-hati untuk menghentikan peralatan dalam urutan yang tepat, karena beberapa fan memerlukan waktu yang lama untuk berhenti dan penutupan damper melawan aliran udara dapat menyebabkan kerusakan yang serius.

Total waktu respon, termasuk waktu yang diperlukan untuk deteksi, penghentian peralatan yang sedang beroperasi, dan urutan pengaktifan sistem manajemen asap, sebaiknya menjamin moda operasi penuh dicapai sebelum kondisi di dalam ruangan melebihi kondisi rancangan asap.

### 8.4.5\* Verifikasi dan instrumentasi sistem kontrol

Tiap sistem secara sebaiknya mempunyai sarana untuk menjamin bahwa sistem akan beroperasi bila diaktifkan. Sarana atau berapa seringnya verifikasi sistem bergantung pada tingkat kerumitan dan pentingnya sistem.

### 8.4.6 Kontrol secara manual

Kontrol secara manual atas seluruh sistem sebaiknya disediakan di suatu tempat terpusat. Kontrol yang demikian sebaiknya dapat membatalkan (*override*) setiap fasilitas (*features*) interlok yang terpasang dalam sistem operasi otomatis. (Untuk peralatan yang tidak boleh dibatalkan fasilitas interloknya, lihat SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap kebakaran pada bangunan gedung.

## 8.5 Layanan elektrik

## **SNI 03-7012-2004**

**8.5.1** Instalasi elektrikal harus memenuhi persyaratan SNI 04-0225-2000, Persyaratan umum instalasi listrik (PUIL – 2000).

**8.5.2** Daya listrik normal yang melayani sistem tata udara pada umumnya mempunyai kehandalan yang mencukupi untuk melayani sistem kontrol asap terzona yang tidak secara khusus dipasang untuk hal itu.

**8.5.3** Daya siaga sebaiknya dipertimbangkan untuk sistem manajemen asap dan sistem kontrolnya.

### **8.6 Bahan**

**8.6.1** Bahan yang dipergunakan untuk sistem kontrol asap sebaiknya mematuhi NFPA 90A, *Standard for the Installation of Air-Conditioning and Ventilating System*, dan dokumen lain yang terkait.

**8.6.2** Bahan-bahan dakting sebaiknya dipilih dan dirancang untuk mengalirkan asap, mampu menahan perubahan tekanan (baik positif maupun negatif) akibat fan pasok dan fan pembuangan ketika beroperasi dalam moda kontrol asap, dan mampu mempertahankan integritas strukturalnya selama sistem kontrol asap seharusnya beroperasi.

**8.6.3** Peralatan, termasuk tetapi tidak terbatas pada, fan, dakting, dan damper penyeimbang, sebaiknya sesuai untuk penggunaan yang dimaksudkan dan temperatur yang mungkin tercapai di mana peralatan akan terekspos.

### **8.7 Sistem tata udara lainnya**

Jika sistem lain di dalam gedung dipergunakan sebagai bagian dari sistem manajemen asap yang melayani ruangan bervolume besar sebaiknya menggunakan SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap pada bangunan gedung, sebagai referensi.

## **9 Pengujian**

### **9.1 Umum**

**9.1.1** Pasal ini memuat rekomendasi untuk pengujian dari sistem manajemen asap. Setiap sistem sebaiknya diuji sesuai terhadap kriteria rancangan spesifiknya. Prosedur pengujian yang diuraikan dibagi dalam tiga kategori sebagai berikut:

- (1) pengujian komponen sistem
- (2) pengujian serah terima
- (3) pengujian dan pemeliharaan berkala

**9.1.2** Direkomendasikan agar pemilik bangunan gedung, perencana dan instansi yang berwenang bertemu selama tahap perencanaan proyek untuk berbagi pemikiran dan sasaran dari sistem manajemen asap dimaksud, dan bersepakat tentang kriteria perencanaan dan kriteria kelulusan pengujian kinerja sistem. Kesepakatan seperti itu akan menolong mengatasi banyak permasalahan yang timbul selama pengujian serah terima akhir dan mempermudah diperolehnya ijin penggunaan bangunan.

**9.1.3** Dokumen kontrak sebaiknya mencakup semua prosedur pengujian serah terima sistem sehingga semua pihak mempunyai pengertian yang jelas dari sasaran sistem, prosedur pengujian, dan kriteria kelulusan.

### **9.2 Pengujian komponen sistem**



**9.2.1** Maksud dari pengujian komponen sistem adalah untuk menetapkan bahwa instalasi akhir memenuhi spesifikasi perancangan, berfungsi dengan baik, and siap untuk pengujian serah terima. Pihak yang bertanggung jawab atas pengujian sebaiknya ditentukan dengan jelas sebelum pengujian komponen sistem.

**9.2.2** Sebelum pengujian, pihak yang bertanggung jawab mengenai pengujian tersebut sebaiknya memeriksa kelengkapan konstruksi bangunan, termasuk ciri penting arsitektural sebagai berikut:

- (1) Integritas dari setiap partisi, lantai, atau bagian lain yang dimaksudkan untuk menahan lewatnya asap
- (2) Penyetop api (*firestopping*)
- (3) Pintu dan alat penutup yang berhubungan dengan kontrol asap
- (4) Dinding kaca yang menyelubungi sebuah ruangan bervolume besar

**9.2.3** Pengujian operasional setiap komponen sistem individual sebaiknya dilakukan selama masa konstruksi. Pengujian operasional ini umumnya dilaksanakan oleh berbagai bidang keahlian (*trades*) sebelum dilakukan interkoneksi untuk menyatukan seluruh sistem manajemen asap. Hal tersebut sebaiknya terdokumentasi dalam bentuk tertulis di mana tiap pemasangan komponen individual telah lengkap dan komponen berfungsi dengan baik. Pengujian tiap komponen sebaiknya terdokumentasi secara individual, meliputi unsur kecepatan, volume, kalibrasi sensitivitas, tegangan dan arus listrik.

**9.2.4** Pengujian sebaiknya meliputi sub-sistem seperti berikut untuk mengetahui sejauh mana sub-sistem mempengaruhi atau dipengaruhi oleh operasi dari sistem manajemen asap:

- (1) Sistem alarm kebakaran (lihat SNI 03-3986-2000, Tata cara perencanaan, pemasangan dan pengujian sistem deteksi dan alarm kebakaran untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung).
- (2) Sistem manajemen energi
- (3) Sistem manajemen bangunan gedung
- (4) Peralatan ventilasi dan tata udara
- (5) Peralatan listrik
- (6) Sistem kontrol temperatur
- (7) Sumber daya
- (8) Daya siaga
- (9) Sistem pemadaman kebakaran otomatis
- (10) Sistem pengoperasian otomatis pintu dan alat penutupnya
- (11) Sistem kontrol asap lainnya
- (12) Pengoperasian elevator darurat

## **9.3 Pengujian serah terima**

### **9.3.1 Umum**

Maksud dari pengujian serah terima adalah untuk mendemonstrasikan bahwa instalasi akhir sistem yang terintegrasi memenuhi perancangan spesifik dan berfungsi dengan baik. Wakil-wakil dari satu atau lebih pihak berikut harus hadir untuk memberikan persetujuan serah terima:

- (1) Instansi yang berwenang
- (2) Pemilik
- (3) Perancang

Seluruh dokumentasi dari hasil pengujian sistem komponen sebaiknya tersedia untuk pemeriksaan.

### **9.3.2 Parameter pengujian**

Parameter berikut perlu diukur selama pengujian serah terima:

- (1) Laju aliran volumetrik total
- (2) Kecepatan aliran udara
- (3) Arah aliran udara
- (4) Gaya membuka pintu
- (5) Beda tekanan
- (6) Temperatur ambien

### **9.3.3 Peralatan pengujian**

Peralatan terkalibrasi berikut mungkin diperlukan untuk melakukan pengujian serah terima:

- (1) Pengukur perbedaan tekanan, manometer air terinklinasi, atau manometer elektronik [rentang pengukuran 0 ~ 0,25 in.w.g. (0 ~ 62,5 Pa) dan 0 ~ 0,50 in.w.g. (0 ~ 125 Pa) dengan panjang pipa 50 ft (15,2 m)]
- (2) Alat ukur gaya membuka pintu
- (3) Anemometer, termasuk peralatan untuk mengukur pada seluruh penampang
- (4) Pengukur arus listrik
- (5) Penganjal daun pintu
- (6) Kertas tissue atau alat lain yang dapat dipakai untuk indikasi arah aliran udara
- (7) Tanda yang menunjukkan bahwa pengujian sistem manajemen asap sedang berlangsung dan bahwa pintu tidak boleh dibuka
- (8) Beberapa radio komunikasi (berguna untuk koordinasi pengoperasian peralatan dan pencatatan data)

### **9.3.4 Prosedur pengujian**

Pengujian serah terima sebaiknya mempertimbangkan untuk mengikuti prosedur sebagaimana dijelaskan pada butir 9.3.4.1 sampai 9.3.4.6.

**9.3.4.1** Sebelum memulai pengujian serah terima, semua peralatan bangunan gedung sebaiknya diposisikan pada moda operasi normal, termasuk peralatan yang tidak digunakan dalam implementasi manajemen asap, seperti pembuangan udara di toilet, lubang buang saf elevator, fan ruang mesin elevator, dan sistem sejenis.

**9.3.4.2** Arah dan kecepatan angin, dan temperatur udara luar sebaiknya dicatat untuk setiap hari pengujian. Bila terjadi perubahan kondisi besar selama pengujian, kondisi baru harus dicatat.

**9.3.4.3** Jika tersedia daya listrik siaga untuk mengoperasikan sistem manajemen asap, maka pengujian serah terima sebaiknya dilaksanakan dengan menggunakan kedua daya listrik yang ada baik daya listrik normal dan daya listrik siaga. Putuskan daya listrik normal bangunan gedung normal pada pemutus layanan utama (*main service disconnect*) untuk mensimulasi kondisi operasi yang sebenarnya dalam moda ini.

**9.3.4.4** Pengujian serah terima sebaiknya mencakup peragaan mengenai dihasilkannya output yang benar untuk input yang diberikan pada tiap urutan kontrol yang dispesifikasikan. Urutan kontrol berikut sebaiknya dipertimbangkan sehingga urutan manajemen asap yang lengkap dapat diperagakan :

- (1) Moda normal
- (2) Moda manajemen asap otomatis untuk alarm pertama
- (3) Pembatalan (*manual override*) secara manual dari moda manajemen asap normal dan otomatis

(4) Kembali ke normal

**9.3.4.5** Pengujian serah terima untuk sistem sinyal proteksi kebakaran dikaitkan dengan sistem manajemen asap boleh dilakukan. Satu atau lebih sirkit alat pada sistem sinyal proteksi kebakaran dapat mengawali sinyal input tunggal ke sistem manajemen asap. Oleh karena itu, perlu dipertimbangkan untuk menetapkan jumlah alat dan sirkit inisiasi yang tepat yang dioperasikan untuk memperagakan operasi sistem manajemen asap.

**9.3.4.6** Banyak cara yang dapat dilakukan untuk memperagakan operasi sistem manajemen asap tanpa harus menggunakan asap atau produk yang mensimulasikan asap.

### **9.3.5 Sistem manajemen asap untuk ruangan bervolume yang besar**

**9.3.5.1** Ruangan dengan bervolume besar dapat berupa banyak konfigurasi, masing-masing dengan kekhususannya. Ruangan dapat tinggi dan tipis atau pendek dan lebar; mempunyai balkon dan lantai-lantai yang saling berhubungan; terbuka atau tertutup terhadap lantai-lantai yang berbatasan; mempunyai koridor dan tangga untuk evakuasi atau hanya mempunyai dinding dan jendela terekspos ( tabung steril/*sterile tube*); dan merupakan bagian dari sebuah hotel, rumah sakit, pertokoan, atau gelanggang pertandingan. Sistem manajemen asap spesifik harus dikembangkan untuk setiap situasi yang unik.

**9.3.5.2** Periksa lokasi yang tepat dari perimeter ruangan bervolume besar yang menggunakan sistem manajemen asap, identifikasi setiap bukaan pintu kedalam ruangan tersebut, dan identifikasi semua daerah berbatasan yang tetap terbuka dan yang diproteksi hanya oleh aliran udara saja. Untuk bukaan yang besar, kecepatan harus diukur pada seluruh penampang bukaan (*traverse*).

**9.3.5.3** Dengan sistem ventilasi dan tata udara bekerja pada moda normal, ukurlah perbedaan tekanan di kedua sisi semua pintu, dan kecepatan aliran udara pada bidang pembatas dengan daerah terbuka. Ukur gaya yang diperlukan untuk membuka setiap pintu.

**9.3.5.4** Aktifkan sistem manajemen asap. Periksa dan catat operasi dari semua fan, damper, pintu, dan peralatan yang terkait. Ukur kapasitas fan pembuangan dan kecepatan udara yang melalui doors dan kisi-kisi atau pada kisi-kisi pasokan kalau terdapat sebuah sistem udara tambahan mekanik. Ukur gaya yang diperlukan untuk membuka setiap pintu.

**9.3.5.5** Ukur dan catat perbedaan tekanan di kedua sisi semua pintu yang memisahkan daerah sistem manajemen asap dengan daerah yang berbatasan, dan kecepatan udara pada bidang pembatas dengan daerah terbuka.

### **9.3.6 Metoda pengujian lain**

**9.3.6.1** Metoda yang sebelumnya dijelaskan dapat menyediakan cara-cara memadai untuk evaluasi kinerja sistem manajemen asap. Metoda pengujian lainnya secara historis telah digunakan pada beberapa kejadian di mana instansi berwenang mempersyaratkan pengujian tambahan. Metoda pengujian ini mempunyai nilai terbatas dalam evaluasi kinerja sistem tertentu, dan validitasnya sebagai sebuah metoda untuk pengujian sebuah sistem manajemen asap telah dipertanyakan.

**9.3.6.2\*** Seperti dibahas pada pasal-pasal sebelumnya, dinamika dari cendawan asap kebakaran, daya apung, dan stratifikasi adalah elemen kritis utama dalam perancangan dari sistem manajemen asap. Oleh karena itu, untuk menguji sistem secara benar, suatu kondisi dengan kebakaran yang nyata akan menjadi cara pengujian yang paling tepat. Tetapi terdapat banyak sebab yang sah mengapa kebakaran seperti itu tidak praktis dicoba di dalam bangunan gedung yang telah selesai dibangun. Nyala api terbuka / pengujian dengan

menggunakan api yang sebenarnya dapat berbahaya dan umumnya sebaiknya tidak dilakukan. Pengujian dengan cara lain adalah sebuah kompromi. Jika suatu pengujian dari sistem manajemen asap untuk serah terima bangunan diwajibkan oleh instansi berwenang, kondisi pengujian seperti itu akan menjadi rancangan dasar dan mungkin tidak akan mensimulasikan suatu kondisi kebakaran yang nyata. Yang lebih penting, hal tersebut dapat menjadi suatu pembohongan dan memberikan suatu perasaan aman yang semu bahwa sistem manajemen asap akan berfungsi memadai dalam sebuah darurat kebakaran yang sebenarnya.

Pengujian bom asap *tidak* memberikan kalor, daya apung dan peristiwa keikutan udara dari sebuah kebakaran yang nyata, dan tidak berguna dalam evaluasi kinerja yang nyata dari sistem. Sebuah sistem yang dirancang mengikuti dokumen ini dan mampu memberikan manajemen asap sebagaimana dimaksud, mungkin tidak akan lulus pengujian bom asap. Sebaliknya, sebuah sistem yang tidak mampu memberikan manajemen asap sebagaimana dimaksud mungkin justru akan lulus pengujian bom asap. Karena ketidakpraktisan dari pengujian dengan menggunakan kebakaran nyata, pengujian serah terima seperti dijelaskan dalam dokumen ini ditujukan kepada aspek dari sistem manajemen asap yang dapat diverifikasi.

### **9.3.7 Dokumentasi pengujian**

Pada penyelesaian dari pengujian serah terima, satu salinan dari seluruh dokumentasi pengujian operasional sebaiknya diserahkan ke pemilik. Dokumentasi ini sebaiknya tersedia untuk pengujian dan pemeliharaan berkala.

### **9.3.8 Buku manual dan instruksi pemilik**

Informasi yang mendefinisikan pengoperasian dan perawatan sistem sebaiknya diserahkan kepada pemilik atau wakilnya. Instruksi dasar pengoperasian sistem sebaiknya diserahkan kepada wakil pemilik atau wakilnya. Karena pemilik mungkin akan menggunakan sistem kapan saja setelah pengujian serah terima, instruksi dasar tersebut sebaiknya diselesaikan sebelum pengujian serah tarima.

### **9.3.9 Penggunaan partial**

Pengujian serah terima sebaiknya dilaksanakan sekaligus ketika mengurus ijin penggunaan bangunan gedung. Tetapi kalau bangunan diselesaikan atau dihuni secara bertahap, pengujian serah terima dari seluruh sistem sebaiknya dilaksanakan untuk memperoleh izin penggunaan bangunan sementara.

### **9.3.10 Modifikasi**

Bilamana ada perubahan sistem dan modifikasi, semua pengoperasian dan pengujian serah terima sebaiknya dilaksanakan pada bagian yang terkait. Dokumentasi sebaiknya diperbaharui untuk mencerminkan perubahan atau modifikasi.

## **9.4 Pengujian berkala**

**9.4.1** Selama umur bangunan gedung, pemeliharaan sangat diperlukan untuk memastikan bahwa sistem manajemen asap akan berfungsi sebagaimana dimaksud dalam kondisi kebakaran. Pemeliharaan yang benar dari sistem sebaiknya minimal meliputi pengujian berkala dari semua peralatan, seperti alat inisiasi, fan, damper, alat pengendalian, pintu-pintu dan jendela. Peralatan tersebut sebaiknya dipelihara sesuai dengan rekomendasi manufaktur (lihat SNI 03-6571-2001, Sistem pengendalian asap kebakaran pada bangunan gedung, untuk petunjuk praktek pemeliharaan).

**9.4.2** Pengujian berkala sebaiknya memastikan bahwa sistem yang terpasang akan terus beroperasi sesuai dengan rancangan yang disetujui. Lebih disukai untuk memasukkan dalam pengujian pengukuran dari jumlah aliran udara dan perbedaan tekanan pada lokasi berikut :

- (1) di kedua sisi penghalang asap
- (2) pada pasokan udara tambahan
- (3) pada peralatan pembuangan asap

Untuk mendapatkan perbandingan pengukuran, semua lokasi titik data sebaiknya sama dengan lokasi pengujian serah terima.

**9.4.3** Sistem sebaiknya diuji sekurang-kurangnya dua kali setahun oleh personil yang betul-betul mengetahui pengoperasian, pengujian, dan pemeliharaan dari sistem. Hasil pengujian sebaiknya didokumentasikan dalam buku catatan pengoperasian dan pemeliharaan, dan tersedia untuk inspeksi.

Sistem manajemen asap sebaiknya dioperasikan sesuai urutan dalam kriteria rancangan. Sebaiknya diamati output yang benar untuk setiap input yang diberikan. Pengujian, bila memungkinkan, sebaiknya juga dilaksanakan dengan menggunakan daya listrik siaga.

**9.4.4** Pengaturan khusus mungkin diperlukan untuk pemasukan jumlah besar udara luar ke dalam daerah yang dihuni, atau pusat komputer, ketika temperatur dan humiditas udara luar kondisinya ekstrim, dan bilamana udara yang tidak terkondisikan seperti itu mungkin merusak isi bangunan. Karena sistem manajemen asap dapat mengesampingkan alat pengendali batas seperti thermostat anti beku, pengujian sebaiknya dilaksanakan ketika kondisi udara luar tidak akan menyebabkan kerusakan pada peralatan dan sistem.

## Lampiran A

**A.1** Standar ini tidak membedakan pendekatan teknis untuk manajemen asap dalam atrium dan dalam mal tertutup.

### A.3.2 Aliran asap langit-langit

Pada umumnya, temperatur aliran langit-langit lebih besar daripada temperatur lapisan asap.

### A.3.3 Ruang yang berhubungan

Ruangan yang berhubungan dapat terbuka langsung ke dalam ruangan bervolume besar atau dapat berhubungan melalui jalur terusan terbuka.

### A.3.6 Indikasi awal dari asap

Lihat gambar A.1.

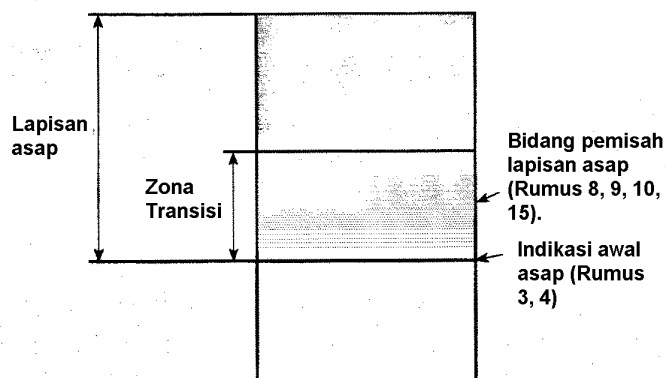
Untuk evaluasi rancangan secara fisik atau pemodelan *CFD (Computational Fluid Dynamic)*, dibutuhkan suatu metoda untuk menentukan ketinggian bidang pemisah dan indikasi awal dari asap dengan menggunakan sejumlah terbatas titik-titik ukur di atas ketinggian atrium. Suatu pendekatan [Copper et al (1981), Madrzykowski (1992)] menggunakan interpolasi linier dari titik-titik ukur.

Dengan menggunakan data temperatur, bidang pemisah berada pada ketinggian dimana temperaturnya sebagai berikut :

$$T_n = C_n \cdot (T_{\max} - T_b) + T_b .$$

di mana :

- $T_n$  = temperatur pada ketinggian bidang pemisah.
- $T_{\max}$  = temperatur pada lapisan asap.
- $T_b$  = temperatur dalam lapisan bawah yang dingin.
- $C_n$  = menunjukkan konstanta interpolasi dengan nilai 0,1 ~ 0,2 untuk indikasi awal dari asap dan 0,8 ~ 0,9 untuk bidang pemisah lapisan asap.



**Gambar A.1** Bidang pemisah lapisan asap

### A.3.8 Ruangannya bervolume besar

Atrium dan mal tertutup adalah contoh dari ruangan bervolume besar.

### A.3.19 Zona transisi

Lihat butir A.7.8.1.2. untuk detail selanjutnya.

**A.4.4.1** Sasaran kinerja dari springkler otomatis yang dipasang sesuai SNI 03-3989-2000, "Tata cara perencanaan dan pemasangan sistem springkler otomatis untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung, untuk mengendalikan kebakaran, yang didefinisikan sebagai berikut :

Membatasi besarnya kebakaran dengan mendistribusikan air sehingga mengurangi laju pelepasan kalor dan membasahi awal bahan yang mudah terbakar disebelahnya, sambil mengendalikan temperatur gas pada langit-langit untuk mencegah kerusakan struktural.

Sejumlah terbatas penyelidikan telah dilakukan dengan pengujian kebakaran berskala penuh di mana sistem springkler diuji diragukan tetapi telah membuktikan tingkat kinerja yang diharapkan.

Penyelidikan ini menunjukkan bahwa, untuk situasi kebakaran terkendali, laju pelepasan kalor terbatas tetapi asap dapat terus menerus dihasilkan. Namun demikian, temperatur asap berkurang.

Pengujian kebakaran berskala penuh dengan springkler telah dilakukan pada kantor tanpa partisi [Madrzykowski (1992), Loughheed (1997) ]. Pengujian ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan laju pelepasan kalor secara eksponensial setelah springkler diaktifkan dan sampai kebakaran terkendali.

Hasil pengujian ini juga menunjukkan bahwa besar api rancangan dalam keadaan *steady* memberikan perkiraan konservatif laju pelepasan kalor sebesar 500 kW untuk kantor tanpa partisi dengan proteksi springkler.

Hanya sedikit data pengujian berskala penuh tersedia untuk dipakai dalam menentukan perancangan besarnya api rancangan untuk hunian lain yang diproteksi dengan springkler.

Hansel dan Morgan ( 1994) memberikan perkiraan konservatif untuk laju pelepasan kalor konvektif berdasarkan statistik kebakaran di Inggris : 1 MW untuk kantor yang diproteksi dengan springkler, 0,5 ~ 1,0 MW untuk kamar Hotel berspringkler dan 5 MW untuk hunian retail berspringkler.

Besar api rancangan dalam kondisi *steady* di atas mengasumsikan bahwa daerah tersebut dilengkapi dengan springkler jenis respon standar.

Pengujian kebakaran berskala penuh untuk hunian retail telah dilakukan di Australia (Bennetts et al 1997). Pengujian ini menunjukkan bahwa beberapa kios retail yang umum (toko pakaian dan toko buku) kebakaran terkendali dan akhirnya dipadamkan oleh sebuah springkler tunggal.

Pengujian ini juga menunjukkan bahwa springkler mungkin kesulitan memadamkan suatu kebakaran dengan beban bahan bakar tinggi seperti toko mainan.

Pengujian kebakaran berskala penuh telah dilakukan untuk beragam hunian ( toko retail, kantor-kantor kecil, dan perpustakaan) di Inggris (Heskestad, 1991).

Pengujian berskala penuh telah dilakukan untuk sistem penyimpanan yang dapat dipindah. Informasi pengujian dilakukan pada tahun 1979 ini untuk perpustakaan Kongres Amerika Serikat yang tersedia pada lampiran C dari NFPA 909, *Standard for the Protection of Cultural Resources, Including Museums, Libraries, Places of Worship, and Historic Properties*.

Pengujian kebakaran berskala penuh selanjutnya telah dilakukan untuk perpustakaan arsip ke 2 Kongres dan Perpustakaan Nasional Kanada menunjukkan bahwa kebakaran dalam sistem penyimpanan yang dapat dipindahkan sulit dipadamkan (Loughheed et al, 1994).

**A.4.4.2** Selama fasa aktif awal dari kebakaran dengan springkler beroperasi, lapisan asap tetap terstratifikasi di bawah langit-langit (Heskestad, 1991). Dekat springkler, asap ditarik

ke dalam lapisan bawah yang dingin oleh butiran-butiran air dan kembali ke lapisan asap karena daya apung.

Pada saat springkler memegang kendali dan mulai memadamkan kebakaran, temperatur gas dalam lapisan asap menurun secara cepat dan asap disebarkan keseluruh ruangan dengan berkurangnya daya apung.

**A.4.4.3** Temperatur asap yang dihasilkan oleh suatu kebakaran setelah springkler beroperasi tergantung pada faktor seperti laju pelepasan kalor kebakaran, jumlah springkler yang beroperasi, dan densitas aplikasi springkler. Pengujian kebakaran berskala penuh dengan temperatur air 10<sup>0</sup>C menunjukkan bahwa, untuk empat buah springkler yang beroperasi, temperatur asap didinginkan mendekati atau di bawah ambien jika laju pelepasan kalor < 200 kW pada densitas aplikasi 0,1 gpm/ft<sup>2</sup> dan < 500 kW pada densitas aplikasi 0,2 gpm/ft<sup>2</sup>. Untuk laju pelepasan kalor yang lebih tinggi, temperatur asap adalah di atas temperatur ambien dan mengapung meninggalkan daerah berspringkler.

Untuk laju pelepasan kalor rendah dari kebakaran setelah springkler beroperasi, asap tercampur pada seluruh ketinggian dari kompartemen. Aliran asap melalui bukaan besar ke dalam suatu atrium mempunyai temperatur konstan dengan ketinggian.

Dengan laju pelepasan kalor yang lebih tinggi, terbentuk suatu lapisan atas yang panas.

Temperatur lapisan atas akan berada antara temperatur ambien dan temperatur pengaktifan springkler. Jika asap lebih panas dari pada temperatur pengaktifan springkler, springkler lain akan diaktifkan dan asap akan didinginkan. Untuk tujuan perancangan, temperatur asap dapat diasumsikan ekivalen dengan temperatur pengaktifan springkler.

**A.5.3** Salah satu sumber data cuaca adalah ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*.

Juga disarankan bahwa 1% kecepatan angin yang ekstrim digunakan sebagai kondisi perancangan. Apabila ada, data spesifik lokasi lainnya sebaiknya dipertimbangkan.

**A.6.4.1.3** Suatu pemodelan dengan komputer (ditulis dalam suatu bahasa pemrograman atau menggunakan suatu "spreadsheet") dapat dibuat dengan menggunakan rumus-rumus aljabar yang dimuat dalam pasal 7, untuk menghitung posisi bidang pemisah lapisan asap dari waktu ke waktu, dengan dan tanpa pembuangan asap.

Pendekatan ini melibatkan perhitungan laju aliran massa asap yang memasuki lapisan asap, temperatur asap yang memasuki lapisan, dan laju aliran massa asap yang dibuang dari lapisan asap oleh pelepasan asap gravitasi atau mekanik. Langkah-langkah yang digunakan untuk menghitung posisi bidang pemisah lapisan asap adalah sebagai berikut :

- (1) Pilih langkah waktu untuk perhitungan,  $\Delta t$ .
- (2) Tentukan kebakaran rancangan (misal *steady*/mantap, kebakaran membesar, kebakaran membesar dengan maksimum *steady*, atau deskripsi lain laju pelepasan kalor sebagai fungsi waktu). ( lihat butir 7.2.3. untuk diskusi mengenai kebakaran membesar).
- (3) Hitung atau rinci laju pelepasan kalor, Q, dari kebakaran rancangan pada langkah waktu sekarang dan juga bagian laju pelepasan kalor konvektif.
- (4) Hitung laju aliran massa asap yang memasuki lapisan asap selama langkah waktu sekarang. Untuk suatu cendawan asap aksis-simetrik, laju aliran massa cendawan asap sebaiknya dihitung dengan rumus (8) atau (9), bergantung pada posisi lapisan asap pada akhir langkah waktu sebelumnya relatif terhadap tinggi nyala api dari kebakaran rancangan. Untuk suatu cendawan asap luapan, laju aliran massa cendawan asap sebaiknya dihitung dengan rumus (10). Untuk suatu cendawan asap jendela, laju aliran massa cendawan asap sebaiknya dihitung dengan rumus (13), (14) dan (15). Untuk suatu kebakaran unsteady/tak mantap, laju aliran massa cendawan asap sebaiknya dievaluasi pada laju pelepasan kalor pada titik tengah dari langkah waktu.
- (5) Hitung temperatur asap yang memasuki lapisan asap dengan rumus (17).



- (6) Hitung massa asap dalam lapisan asap pada akhir langkah waktu ini:

$$M_2 = M_1 + (m_2 - m_1) \cdot \Delta t.$$

di mana :

- $M_2$  = massa asap dalam lapisan asap pada akhir dari langkah waktu sekarang (kg).  
 $M_1$  = massa asap dalam lapisan asap pada awal dari langkah waktu sekarang (kg).  
 $m_2$  = laju aliran massa cendawan asap (kg/detik).  
 $m_1$  = laju aliran massa pembuangan (kg/detik).  
 $\Delta t$  = langkah waktu (detik).

- (7) Hitung temperatur baru dari lapisan asap berdasarkan hukum kekekalan energi.

$$T_{s,2} = T_{s,1} + \left[ (1 - \eta) \cdot m_p \cdot (T_p - T_0) - m_e \cdot (T_s - T_0) - (T_s - T_0) \cdot (m_p - m_e) \right] \frac{\Delta t}{M_1}$$

di mana :

- $T_{s,2}$  = temperatur lapisan asap pada akhir langkah waktu sekarang ( $^{\circ}\text{C}$ ).  
 $T_{s,1}$  = temperatur lapisan asap pada awal langkah waktu sekarang ( $^{\circ}\text{C}$ ).  
 $T_p$  = temperatur cendawan asap ( $^{\circ}\text{C}$ ).  
 $T_0$  = temperatur ambien ( $^{\circ}\text{C}$ ).  
 $\eta$  = Faktor kehilangan kalor.  
 $m_p$  = laju aliran massa cendawan asap (kg/detik).  
 $m_e$  = laju aliran massa pembuangan (kg/detik).

Faktor kehilangan kalor adalah fraksi dari laju pelepasan kalor konvektif yang ditransfer dari lapisan asap ke langit-langit dan dinding, faktor tersebut mempunyai harga maksimum = 1. Kenaikan temperatur maksimum terjadi jika faktor kehilangan kalor adalah nol.

- (8) Hitung densitas lapisan asap:

$$\rho_s = \frac{1,2 \cdot (T_0 + 273)}{T_2 + 273}$$

di mana :

- $\rho_s$  = densitas lapisan asap pada akhir dari langkah waktu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

- (9) Hitung volume lapisan asap.

$$V_2 = \frac{M_2}{\rho_s}$$

di mana :

- $V_2$  = volume lapisan asap pada akhir langkah waktu ( $\text{m}^3$ ).

- (10) Tentukan posisi baru bidang pemisah lapisan asap sebagai fungsi dari volume lapisan atas dan geometri dari reservoir atap. Untuk daerah dengan penampang konstan, posisi lapisan asap dihitung sebagai berikut:

$$Z_2 = H_{\text{langit}} - \frac{V_2}{A_{\text{Res}}}$$

di mana :

- $Z_2$  = ketinggian bidang pemisah lapisan asap di atas lantai (m).  
 $H_{\text{langit}}$  = tinggi langit-langit di atas lantai.  
 $A_{\text{Res}}$  = luas reservoir ( $\text{m}^2$ ).

- (11) Hentikan perhitungan bila jumlah maksimum langkah waktu telah dicapai atau jika bidang lapisan pemisah asap berada pada atau di bawah puncak bahan bakar.
- (12) Ulangi langkah (3) dan gunakan nilai-nilai yang baru dihitung untuk perhitungan pada langkah waktu berikutnya.

**A.7.1.1.3** Penyederhanaan umum dari model zona ditabelkan pada A.1(a). Verifikasi hasil program komputer model kebakaran merupakan hal yang penting karena kadang lebih mudah mendapatkan hasil program daripada menentukan akurasi hasilnya. Hasil program komputer model kebakaran biasanya telah diverifikasi pada suatu rentang terbatas dari kondisi ekperimental [Peacock et al 1991, Soderbom 1992, Emmons 1989]; peninjauan ulang hasil ini sebaiknya memberikan suatu tingkat kepercayaan bagi pengguna. Namun, karena sifat paling dasar dari kegunaan model kebakaran sebagai alat untuk menyelidiki kondisi yang tidak diketahui, akan terdapat kondisi di mana suatu model belum diverifikasi. Untuk kondisi seperti ini pengguna sebaiknya mendapatkan bantuan dalam menentukan keakuratan model tersebut.

Ada tiga wilayah pemahaman yang sangat membantu meningkatkan akurasi pemodelan kebakaran dari kondisi yang belum diverifikasi. Wilayah pertama mencakup pemahaman pokok-pokok yang dimodelkan. Wilayah kedua mencakup penerjemahan yang tepat dari pokok-pokok dunia riil menjadi masukan model kebakaran. Wilayah ketiga mencakup pemahaman konversi masukan menjadi keluaran model kebakaran.

Dalam wilayah pertama, pokok-pokok yang harus dikarakterisasikan dengan akurat oleh pemodel adalah bahan bakar, kompartemen, dan kondisi ambien, seperti yang ditunjukkan pada Tabel A.1(b). Laju pelepasan kalor dari bahan bakar merupakan suatu aspek yang penting untuk dijelaskan. Terdapat beberapa detail lain dari bahan bakar yang juga mempengaruhi pertumbuhan kebakaran, seperti misalnya produksi spesi, fraksi kehilangan kalor radiasi, rasio udara-bahan bakar dalam proses pembakaran, dan kalor pembakaran. Namun, akurasi yang diharapkan dari jawaban, menentukan yang mana sebaiknya dimasukkan dan yang dapat diabaikan. Deskripsi lubang pelepasan dari kompartemen juga harus dievaluasi dengan tepat. Seringkali, luas kebocoran dapat menjadi penyebab untuk sejumlah besar aliran gas yang tidak diantisipasi, sebagai contoh pada kondisi iklim yang ekstrim oleh angin dan temperatur.

Wilayah ke dua dari pemodelan kebakaran adalah penerjemahan karakteristik aktual ke dalam suatu format yang dikenali sebagai masukan model. Beberapa pokok secara sederhana tidak mendapatkan perhatian karena pengaruhnya yang kecil. Sebagai contoh adalah pengabaian suatu saluran udara ventilasi mekanik bila suatu pintu yang lebar ke suatu ruangan tetap terbuka. Pokok-pokok lainnya harus disajikan dengan cara yang sudah agak diubah. Sebagai contoh adalah suatu kebakaran yang membakar sepanjang potongan vertikal dinding setinggi 5 ft. Tinggi dari kebakaran paling baik dinyatakan dari permukaan lantai; titik terendah di mana nyala api dapat mengikutkan udara masuk kedalamnya.

Wilayah pemahaman ketiga (terakhir) mungkin adalah yang paling sulit bagi pemula untuk menguasainya; hal ini terkait dengan pemahaman bagaimana model mengubah masukan menjadi keluaran. Bukanlah hal yang mudah bagi seorang pengguna baru untuk menguasai setiap detail proses transformasi ini, tetapi bagi seorang pemula diperlukan suatu pemahaman dasar tentang dinamika kebakaran [DiNenno 1988, Drysdale 1985] dan pengetahuan tentang tiga hukum konservasi [Welty et al 1976] untuk mengantisipasi berbagai hasil keluaran model. Hukum konservasi tersebut dapat dinyatakan dengan rumus differensial untuk mereproduksi perubahan yang mulus dan kontinyu yang diperlihatkan oleh sifat perilaku dalam suatu kebakaran riil. Hingga suatu tingkat penyimpangan perhitungan matematika dari rumus representasi differensial hukum konservasi, semakin tinggi ketidakpastian akurasi model, sehingga berada di luar rentang verifikasi. Potensi bagi suatu ketidak-akurasi model dipengaruhi oleh pengaruh relatif dari faktor tertentu dalam persamaan. Faktor yang mempunyai pengaruh terbesar mengandung variabel yang meningkat dengan pangkat eksponensial lebih dari satu.

Korelasi secara aljabar, model-model kebakaran lainnya, model skala, dan akal sehat dapat digunakan untuk memeriksa (verifikasi) akurasi model. Rumus aljabar hanya diverifikasi

pada kondisi eksperimental darimana rumus ini dikorelasikan. Proyeksi di luar domain eksperimental ini dapat didasarkan pada arah gejala titik-titik ujung eksperimental. Dengan menggunakan satu model untuk memverifikasikan model lainnya menjamin kepresisiannya, tetapi tidak akurasi, kecuali jika model kedua telah diverifikasikan secara independen. Model skala ekperimental selalu dapat digunakan untuk memeriksa kebenaran hasil model dengan komputer. Model skala tereduksi merupakan yang paling ekonomis; arah gejala dengan mudah didapatkan dari pengukuran seperti itu tetapi data yang lebih baik tidak dapat langsung diperoleh.

**Tabel A.1(a) Penyederhanaan dalam model zona**

---



---

**Bahan bakar**

- Laju pelepasan kalor tidak dipercepat oleh umpan balik kalor dari lapisan asap
- Laju pelepasan kalor sesudah penyalaan serentak (*flashover*) sedikit diketahui, dan simulasinya yang unik dilakukan hanya oleh sedikit model
- Pembangkitan CO disimulasikan, tetapi mekanismenya tidak sepenuhnya dipahami hingga transisi penyalaan serentak (*flashover*)
- Beberapa model tidak mempertimbangkan pembakaran dari kelebihan bahan hasil pirolisa pada bukaan luar suatu lubang pelepasan.

**Cendawan asap**

- Massa yang terikutkan ke dalam *plume* adalah  $\pm 20\%$  dan tidak diverifikasi dengan baik pada kompartemen yang tinggi
- Tidak ada waktu perjalanan dari ketinggian api hingga ke posisi yang ditinjau dalam cendawan asap dan aliran asap di bawah langit-langit
- Model untuk cendawan luapan tidak dikembangkan dengan baik
- Tidak semua model cendawan asap mempertimbangan geometri luasan bahan bakar
- Udara ikutan (*entrainment*) sepanjang sumur tangga tidak disimulasikan
- Udara ikutan (*entrainment*) dari lubang pelepasan (ventilasi) horisontal tidak disimulasikan oleh semua model.

**Lapisan**

- Lapisan stagnasi panas pada langit-langit tidak disimulasikan
- Tidak ada keseragaman temperatur.

**Perpindahan kalor**

- Beberapa model tidak membedakan antara dinding yang secara termal tipis dan yang secara termal tebal
- Tidak ada perpindahan kalor melalui pembatas dari satu ruang ke ruang lainnya
- Efek momentum diabaikan.

**Ventilasi**

- Pencampuran pada lubang ventilasi (pelepasan) ditentukan secara korelasi.

Tabel A.1(b) Penyederhanaan dalam model medan

**Deskripsi bahan terbakar**

- Laju pelepasan kalor berubah terhadap waktu
- Ketinggian api
- Fraksi radiasi
- Laju produksi spesi
- Luas kebakaran (garis, bak, atau gas).

**Deskripsi ruangan**

- Tinggi langit-langit
- Ukuran, lokasi dan status dinamis (terbuka atau tertutup) dari lubang pelepasan (termasuk luasan kebocoran)
- Sifat termofisik bahan dinding, langit-langit, dan lantai
- Lokasi, kapasitas, dan status dari pelepasan mekanik
- Adanya balok dan penunjang
- Waktu perjalanan dalam cendawan asap atau aliran asap di bawah langit-langit
- Kegagalan struktur
- Temperatur awal.

**Deskripsi kondisi ambien**

- Elevasi
- Tekanan ambien
- Temperatur ambien
- Kecepatan dan arah angin
- Kelembaban relatif
- Temperatur udara luar.

**A.7.1.2.1** Suatu kajian yang lebih lengkap dari teknik penskalaan dan contoh-contohnya bisa didapatkan dalam buku yang diacu [Quintiere 1989]. Studi aliran asap telah dilakukan oleh Heskestad [1972] dan Quientere, McCaffrey, dan Kashiwagi [1978]. Juga terdapat teknik analog yang menggunakan suatu sistem air tawar dan air asin [Steckler et al 1986]. Pemodelan aliran asap untuk bangunan didasarkan pada upaya menjaga suatu keseimbangan antara “gaya” apung dan konvektif sementara mengabaikan efek viskositas dan perambatan kalor konduksi. Pengabaian faktor-faktor ini tidak berlaku pada daerah batas benda padat. Beberapa kompensasi dapat dibuat dalam model skala dengan pemilihan berbagai bahan konstruksi.

**A.7.1.2.2** Kelompok-kelompok bilangan tak berdimensi dapat dirumuskan untuk suatu situasi yang melibatkan suatu sumber kalor yang mewakili suatu kebakaran bersama dengan fan pembuangan dan fan udara tambahan ari suatu laju aliran volumetrik tertentu. Solusi untuk temperatur gas ( $T$ ), kecepatan ( $v$ ), tekanan ( $p$ ), temperatur permukaan ( $T_s$ ) dinyatakan dalam faktor-faktor bilangan tak berdimensi dan sebagai fungsi dari  $x, y, z$  dan waktu adalah:

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{T}{T_0} \\ \frac{v}{\sqrt{gl}} \\ \frac{p}{\rho_0 gl} \\ \frac{T_s}{T_0} \end{array} \right\} = f \left( \frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \frac{t}{\sqrt{l/g}}, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3 \right)$$

di mana:

- $l$  = suatu panjang karakteristik
- $g$  = percepatan gravitasi
- $T_0$  = temperatur ambien
- $\rho_0$  = densitas udara ambien

$\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ , dan  $\Pi_3$  adalah kelompok-kelompok bilangan tak berdimensi yang timbul dari pelepasan energi kebakaran, aliran udara fan, dan perpindahan kalor melalui dinding:

$$\Pi_1 = \frac{Q}{\rho_0 \cdot c_p \cdot T_0 \cdot \sqrt{g} \cdot l^{5/2}} \sim \frac{\text{energi kebakaran}}{\text{energi aliran}}$$

di mana :

- $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran
- $c_p$  = kalor spesifik udara ambien

$$\Pi_2 = \frac{V_{fan}}{\sqrt{g} \cdot l^{5/2}} \sim \frac{\text{aliran fan}}{\text{aliran apung}}$$

di mana

- $V_{fan}$  = laju aliran volumetrik fan pembuangan

$$\Pi_3 = \frac{1}{(k \cdot \rho \cdot c)_w} \cdot \left\{ \frac{\rho_0}{\mu} \right\}^{1,6} \cdot g^{0,3} \cdot k^2 \cdot l^{0,9} \sim \frac{\text{perpindahan kalor konveksi}}{\text{perpindahan kalor melalui dinding}}$$

di mana

- $(k\rho c)_w$  = sifat termal (konduktifitas, densitas, dan kalor spesifik) dinding
- $\mu$  = viskositas gas
- $k$  = konduktivitas termal gas

Perumusan dari  $\Pi_3$  berlaku untuk suatu bahan konstruksi yang tidak mudah menghantar panas (*thermally thick*). Suku tak berdimensi lainnya ( $\Pi_s$ ) diperlukan bila efek ketebalan dinding dan efek radiasi signifikan.  $\Pi_3$  mencoba mengkoreksi kehilangan kalor pada daerah batas dengan memperbolehkan suatu bahan konstruksi yang berbeda dalam model skala dalam upaya mempertahankan suatu keseimbangan untuk kehilangan kalor.

Untuk suatu bangunan yang tipikal, pemodelan skala geometrik minimum yang disarankan sebaiknya adalah 1/8.

Bentuk penulisan pemodelan skala untuk laju pelepasan kalor kebakaran mengikuti dari mempertahankan  $\Pi_1$ . Demikian pula, pernyataan untuk laju pembuangan volumetrik dan sifat termal dinding didapatkan dari mempertahankan  $\Pi_2$  dan  $\Pi_3$ . Kondisi sifat-sifat dinding

dengan mudah dipenuhi dengan pemilihan bahan konstruksi yang tidak mudah terbakar dan  $(k\rho c)_{\text{dinding}}$  yang hampir sepadan dengan suatu bahan yang cukup tebal untuk mempertahankan kondisi tidak mudah menghantar kalor.

Contoh--contoh berikut ini disertakan untuk memberikan pandangan ke dalam cara dimana hubungan pemodelan skala Froude digunakan.

Contoh 1

Model skala seperti apa yang harus digunakan untuk suatu mal di mana daerah terkecil yang ditinjau mempunyai tinggi lantai ke langit-langit 3 m pada balkonnnya?

Perlu dicatat bahwa penting sekali bahwa aliran dalam model adalah sepenuhnya aliran turbulen, dan untuk mencapai hal ini disarankan bahwa daerah yang ditinjau dalam model skala sekurang-kurangnya 0,3 m. Tinggi dari lantai ke langit-langit dari model yang terkait haruslah sekurang-kurangnya 0,3 m. Tetapkan  $l_m = 0,3$  m dan  $l_F = 3$  m, maka  $l_m/l_F = 0,1$ . Oleh karena itu model dapat berupa skala 1 banding 10.

Rancangan kebakaran untuk suatu fasilitas khusus tertentu adalah suatu kebakaran konstan sebesar 5000 kW. Berapakah besar kebakaran yang diperlukan untuk suatu model skala 1 banding 10?

Contoh 2

$$\frac{l_m}{l_F} = 0,1$$

$$Q_m = Q_F \cdot \left(\frac{l_m}{l_F}\right)^{5/2} = 5000 (0,1)^{5/2} = 15,8 \text{ kW}.$$

Contoh 3

Untuk suatu fasilitas skala penuh dengan suatu laju pembuangan asap sebesar 250 m<sup>3</sup>/detik, berapakah laju pembuangan asap untuk suatu model skala 1 banding 10?

$$V_{fan,m} = V_{fan,F} \left(\frac{l_m}{l_F}\right)^{5/2} = 250(0,1)^{5/2} = 7,9 \text{ m}^3 / \text{detik}$$

Contoh 4

Dinding-dinding suatu fasilitas skala penuh terbuat dari beton. Bagaimanakah pengaruh dari membuat dinding-dinding dari suatu model skala 1 banding 10 dengan bahan papan gypsum?

Harga  $k\rho c$  dari bata adalah 1,7 kW<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>.K<sup>-2</sup>.detik

Sifat termal yang ideal dari model dapat dihitung sebagai berikut:

$$(k\rho c)_{w,m} = (k\rho c)_{w,F} \left(\frac{l_m}{l_F}\right)^{0,9} = (1,7)(0,1)^{0,9} = 0,21 \text{ (kW}^2/\text{m}^4 \cdot \text{detik)}$$

Nilai untuk papan gipsum adalah 0,18 kW<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>.K<sup>-2</sup>.detik, yang mana cukup dekat dengan nilai ideal diatas, sehingga papan gipsum tersebut adalah padanan yang baik. Perlu dicatat bahwa penggunaan jendela kaca untuk perekaman video dan photo dapat menjadi lebih utama daripada menskalakan sifat thermal dinding.

## Contoh 5

Dalam suatu model 1 banding 10, tinggi bersih berikut telah diamati: 2.5 m pada detik 26, 1.5 m pada detik 85, dan 1 m pada detik 152. Berapakah tinggi bersih yang bersesuaian untuk fasilitas skala penuh?

Untuk pasangan tinggi bersih dan waktu yang pertama dimana  $z_m = 2,5$  meter pada  $t_m = 26$  detik:

$$z_F = z_m \cdot \left( \frac{l_F}{l_m} \right) = 2,5 \cdot (10/1) = 25 \text{ m}$$

dan

$$t_F = t_m \left( \frac{l_F}{l_m} \right)^{1/2} = 26(10/1)^{1/2} = 82 \text{ detik.}$$

Pasangan tinggi bersih dan waktu lainnya dapat dihitung dengan cara yang sama dan hasilnya dituliskan dalam tabel berikut:

**Tabel A.2 Pengamatan pada skala model dan prediksi pada fasilitas skala penuh**

Pengamatan pada skala model.		Prediksi pada fasilitas skala penuh	
Tinggi jernih (m)	Waktu (detik)	Tinggi jernih (m)	Waktu (detik)
2,5	26	25	82
1,5	85	15	269
1,0	152	10	480

**A.7.2.1** Suatu kebakaran rancangan dengan ukuran kira-kira 5000 Btu/detik sering diacu untuk suatu hunian perdagangan [Morgan 1979]. Hal ini terutama didasarkan pada distribusi statistik dari besarnya kebakaran dalam pertokoan ( retail ) di Inggris yang diproteksi dengan sprinkler. Kurang dari 5 persen dari kebakaran dalam kategori ini melampaui 5000 Btu/detik. Secara geometrik, suatu kebakaran 5000 Btu/detik dalam suatu pertokoan dapat digambarkan sebagai suatu bujur-sangkar dengan sisi 10 ft yang menghasilkan suatu laju pelepasan kalor per satuan luas kira-kira 50 Btu/detik.ft<sup>2</sup>.

**A.7.2.2.1** Pengujian skala penuh untuk perkantoran dengan lantai terbuka [ Madrzykowski 1992, Lougheed 1997] memperlihatkan bahwa, pada saat springkler dapat mengendalikan kebakaran tetapi tidak segera dapat memadamkannya karena konfigurasi bahan bakar, laju pelepasan kalor menurun secara eksponensial seperti berikut:

$$Q(t) = Q_{act} e^{-kt}$$

di mana:

$Q(t)$  = laju pelepasan kalor pada waktu  $t$ , setelah aktivasi sprinkler (Btu/detik)

$Q_{act}$  = laju pelepasan kalor pada saat aktivasi springkler (Btu/detik)

$t$  = waktu setelah aktivasi springkler (detik)

$k$  = konstanta keruntuhan (detik<sup>-1</sup>)

Estimasi konstanta keruntuhan untuk hunian perkantoran yang diproteksi dengan densitas pancaran 0,1 gpm/ft<sup>2</sup> adalah 0,0023 untuk situasi dengan beban bahan bakar rendah dalam daerah terlindungi [Madrzykowski 1992] dan 0,00155 detik<sup>-1</sup> untuk situasi dengan beban bahan bakar tinggi [Lougheed 1997].

**A.7.4** Kasus lain untuk mana suatu solusi telah dikembangkan dilukiskan dalam gambar A.2. Dalam kasus ini, udara ambien di dalam ruangan yang bervolume besar mempunyai suatu gradien temperatur (perubahan temperatur per satuan ketinggian) yang konstan dari

permukaan lantai ke langit-langit. Kasus ini lebih jarang terjadi daripada kasus dengan temperatur yang mendekati fungsi anjak (step function). Untuk profil temperatur yang linier, tinggi maksimum di mana asap akan naik dapat diturunkan dari rintisan kerja oleh Morton, Taylor dan Turner [1956]:

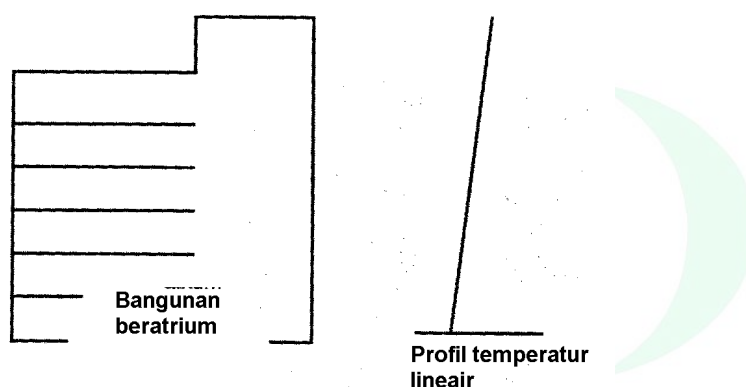
$$z_m = 14,7Q_c^{1/4} (\Delta T / dz)^{-3/8}$$

di mana

$z_m$  = tinggi maksimum kenaikan asap di atas permukaan kebakaran (ft)

$Q_c$  = porsi konvektif dari laju pelepasan kalor (Btu/detik)

$\Delta T / dz$  = laju perubahan temperatur ambien terhadap ketinggian ( $^{\circ}\text{F}/\text{ft}$ )



**Gambar A.2 Kasus yang tidak biasa dari profil temperatur yang linier**

Porsi bagian konvektif dari laju pelepasan kalor,  $Q_c$ , dapat diestimasikan sebagai 70% dari laju pelepasan kalor total.

$Q_c$  minimum yang diperlukan untuk mengatasi perbedaan temperatur ambien dan menggerakkan asap ke langit-langit ( $z_m = H$ ) mengikuti secara langsung dari rumus sebelumnya:

$$Q_{c,\min} = 2,39 \times 10^{-5} H^{5/2} \Delta T_0^{3/2}$$

di mana:

$Q_{c,\min}$  = laju pelepasan kalor konvektif minimum untuk mengatasi stratifikasi (Btu/detik)

$H$  = tinggi langit-langit di atas permukaan kebakaran (ft)

$\Delta T_0$  = beda antara temperatur ambien pada langit-langit dan temperatur ambien pada tinggi permukaan kebakaran.

Sebagai alternatif, suatu pernyataan diberikan dalam bentuk temperatur ambien yang meningkat dari lantai ke langit-langit, yang hanya cukup untuk mencegah suatu cendawan asap dengan laju pelepasan kalor  $Q_c$  agar mencapai suatu langit-langit dengan ketinggian  $H$ :

$$\Delta T_0 = 1300Q_c^{2/3} H^{5/3}$$



Akhirnya, sebagai alternatif ketiga, tinggi bersih maksimum di mana suatu cendawan asap dengan kekuatan  $Q_c$  dapat naik untuk suatu  $\Delta T_0$  yang ditentukan, mengikuti penulisan ulang dari rumus sebelumnya:

$$H_{\max} = 74Q_c^{2/5}\Delta T_0^{3/5}$$

**A7.5** Untuk tujuan perancangan, rumus aljabar untuk konsentrasi gas dan pengaburan jarak pandang dapat dibahas untuk dua kasus batas:

- (1) skenario pengisian asap, di mana semua produk pembakaran diasumsikan mengumpul dalam lapisan asap yang menurun
- (2) skenario pelepasan udara *quasi-steady*, di mana suatu keseimbangan *quasi-steady* terdapat di antara laju aliran masuk dan aliran keluar dari lapisan asap

Biasanya, skenario pelepasan *quasi-steady* lebih menarik untuk tujuan perancangan, sebab skenario ini menggambarkan kondisi *quasi-steady* yang berkembang dengan beroperasinya sistem pembuangan asap. Skenario pengisian asap mungkin menarik untuk menganalisa kondisi yang dapat berkembang sebelum sistem pengeluaran asap diaktifkan. Terdapat suatu periode transien diantara dua kasus batas ini. Selama periode antara transien ini, lapisan asap sekaligus mengisi dan dibuang. Analisis dari periode transien ini biasanya memerlukan pendekatan numerik berbasis komputer. Dari suatu titik pandang perancangan, periode ini mempunyai konsekuensi yang kecil karena bukan suatu kasus batas, oleh karenanya ini tidak dibahas lebih lanjut.

Metoda yang digunakan untuk menganalisis komposisi gas dan karakteristik optik untuk kedua kasus batas ini dapat dibahas dalam bentuk sejumlah rumus aljabar. Rumus aljabar ini pasti tetapi data yang digunakan dalam rumus ini tidak pasti [55]. Pengguna sebaiknya mengetahui ketidakpastian ini.

#### Tahapan pengisian asap – analisis sifat optik

Densitas optik rata-rata dari lapisan asap yang bergerak turun dapat diestimasi bila densitas optik massa dari bahan bakar dapat diestimasi dengan baik. Rumus (A.1) digunakan untuk mengestimasi densitas optik sebagai fungsi dari densitas optik massa, massa bahan terbakar, dan volume dari lapisan asap.

$$D = \frac{D_m m_f}{V_u} = \frac{D_m \int_0^t \dot{m}_f dt}{A z_u(t)} \quad (\text{A.1})$$

di mana:

- $D_m$  = densitas optik massa (ft<sup>2</sup>/lb) (m<sup>2</sup>/kg)
- $\dot{m}$  = laju pembakaran bahan bakar (lb/detik) (kg/detik)
- $m_f$  = total massa bahan bakar yang terbakar (lb) (kg)
- $A$  = luas penampang horisontal atrium (ft<sup>2</sup>) (m<sup>2</sup>)
- $z_u$  = ketebalan (kedalaman) lapisan atas (ft) (m)
- $V_u$  = volume lapisan atas (ft<sup>3</sup>) (m<sup>3</sup>)

Untuk kasus dengan langit-langit datar, luas yang kecil dari cendawan asap, dan suatu kebakaran dengan laju pembakaran dan laju pelepasan kalor konstan, rumus (A.1) menjadi:

$$D = \frac{D_m Q t}{\chi_a \Delta H_e A_u H} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{2t}{3\tau} \right)^{-3/2} \right]^{-1} \quad (\text{A.2})$$

$$\tau = \frac{V}{V_{ent}} = \frac{AH}{k_v Q^{1/3} H^{5/3}} = \frac{AH}{k_v (\alpha_n t^n)^{1/3} H^{5/3}} \quad (\text{A.3})$$

di mana:

- $V$  = volume atrium (ft<sup>3</sup>) (m<sup>3</sup>)
- $V_{ent}$  = laju volumetric udara ikutan (ft<sup>3</sup>/detik) (m<sup>3</sup>/detik)
- $k_v$  = konstanta volumetrik udara ikutan (0,32 ft<sup>4/3</sup>/Btu<sup>1/2</sup> detik<sup>2/3</sup>)  
(0,064 m<sup>4/3</sup>/kW<sup>1/3</sup> detik)
- $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran (Btu/detik) (kW)
- $\Delta H_c$  = kalor pembakaran (Btu/lb) (kJ/kg)
- $H$  = ketinggian langit-langit di atas lantai (ft) (m)
- $\chi_a$  = efisiensi pembakaran

Untuk kasus dengan langit-langit datar, luas yang kecil dari cendawan asap, dan suatu kebakaran  $t$ -kuadrat, rumus (A.1) menjadi :

$$D = \frac{D_m \alpha^3}{3 \chi_a \Delta H_c A H} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{2 k_v \alpha^{1/3} t^{5/3} H^{2/3}}{5 A} \right)^{-3/2} \right]^{-1} \quad (A.4)$$

di mana

- $\alpha$  = laju pertumbuhan kebakaran = 1000/( $t_g$ )<sup>2</sup> (detik)
- Untuk skenario lainnya, nilai yang tepat perlu disubstitusikan ke dalam rumus (A.1). Untuk beberapa skenario, mungkin diperlukan integrasi numerik.

### Tahapan pengisian asap – analisis komposisi lapisan

Analisis komposisi lapisan asap, dalam beberapa hal, analog dengan analisis densitas optik lapisan. Untuk menganalisis komposisi lapisan asap sebagai fungsi waktu, suatu faktor hasil,  $f_v$  pertama-tama harus dikenakan pada masing-masing spesi yang ditinjau:

$$\dot{m}_i = f_i \dot{m}_f \quad (A.5)$$

di mana

- $f_i$  = faktor hasil (lb<sub>produk</sub>/lb<sub>bahan bakar</sub>) (kg<sub>produk</sub>/kg<sub>bahan bakar</sub>)

Fraksi massa,  $Y_i$  dari masing-masing spesi dalam lapisan asap adalah:

$$Y_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i} \quad (A.6)$$

di mana:

- $Y_i$  = fraksi massa (lb<sub>produk turunan</sub>/lb<sub>total</sub>) (kg<sub>produk turunan</sub>/kg<sub>total</sub>)

Pembilang dalam rumus (A.6) dihitung dengan cara yang sama dengan rumus (A.1) sebagai :

$$m_i = \int_0^t \dot{m}_i dt = \int_0^t f_i \dot{m}_f dt = \int_0^t f_i \frac{Q}{\chi_a \Delta H_c} dt \quad (A.7)$$

Untuk kasus dengan faktor hasil yang konstan dan suatu kebakaran  $t$ -kuadrat, rumus (A.7) menjadi:

$$\dot{m}_i = f_i \int_0^t \frac{\alpha t^2}{\chi_a \Delta H_c} dt = \frac{f_i \alpha t^3}{3 \chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.8})$$

Untuk kasus dengan faktor hasil yang konstan dan suatu kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan, rumus (A.7) menjadi:

$$m_i = \int_0^t f_i \frac{Q}{\chi_a \Delta H_c} dt = \frac{f_i Q t}{\chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.9})$$

Penyebut dalam rumus (A.6) mewakili total massa dalam lapisan asap. Secara tipikal, massa bahan bakar yang dilepaskan dapat diabaikan dibanding massa dari udara yang terikutkan ke dalam lapisan asap, oleh karena itu total massa dari lapisan asap dapat didekati dengan :

$$\sum_i m_i = \bar{\rho} V_u \frac{\rho_0 T_0 V_u}{\bar{T}} \quad (\text{A.10})$$

Untuk kasus dimana kenaikan temperatur lapisan asap terhadap temperatur absolut ambien relatif kecil (sebagai contoh  $\bar{T}/T_0 \approx 1$ ), rumus (A.10) disederhanakan menjadi:

$$\sum_i m_i = \rho_0 V_u \quad (\text{A.11})$$

dengan mensubstitusikan rumus (A.8) dan (A.11) ke dalam rumus (A.6) untuk suatu kebakaran  $t$ -kuadrat, dihasilkan:

$$Y_i = \frac{f_i \alpha t^3}{3 \rho_0 V_u \chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.12})$$

Dengan mensubstitusikan (A.9) dan (A.11) ke dalam rumus (A.6) untuk kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan (steady fire) dihasilkan:

$$Y_i = \frac{f_i Q t}{\rho_0 V_u \chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.13})$$

Untuk suatu kebakaran yang tumbuh sebagai kebakaran  $t$ -kuadrat dari  $Q = 0$  pada waktu  $t = 0$  menjadi  $Q = Q_{qs}$  pada waktu  $t = t_s$ , dan selanjutnya terbakar untuk waktu tak terbatas pada  $Q = Q_{qs}$ , rumus (A.12) dan (A.13) dapat dikombinasikan untuk menghasilkan:

$$Y_i = \frac{f_i [\alpha t_{qs}^3 / 3 + Q_{qs} (t - t_{qs})]}{\rho_0 V_u \chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.14})$$

Volume lapisan asap,  $V_u$ , dalam persamaan ini dievaluasi dengan cara yang dipresentasikan dalam butir 7.8 dengan  $V_u = A(H - z)$ .

#### Tahapan pelepasan asap *quasi-steady* – analisis sifat optik.

Di bawah kondisi pelepasan asap *quasi-steady*, terdapat suatu keseimbangan antara laju aliran massa masuk ke dalam dan laju aliran massa ke luar dari lapisan asap. Sifat densitas optik rata-rata lapisan asap dapat dihitung berdasarkan laju aliran sebagai berikut :

$$D = \frac{D_m \dot{m}_f}{V} = \frac{D_m Q}{\chi_a \Delta H_c V} \quad (\text{A.15})$$

Rumus (A.15) dapat digunakan untuk menentukan densitas optik suatu lapisan asap pada suatu laju pembuangan yang telah ditetapkan. Dengan kata lain, laju pembuangan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu densitas optik tertentu,  $D$ , dapat ditentukan dengan mengubah susunan rumus (A.15) menjadi:

$$V = \frac{D_m Q}{D \chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.16})$$

Penggunaan rumus (A.15) dan (A.16) memerlukan pengetahuan tentang densitas optik massa,  $D_m$ , dari asap. Densitas optik massa untuk berbagai bahan dilaporkan oleh Tewarson [1988] dan Mulholland [1988].

Nilai-nilai yang dilaporkan oleh peneliti ini didasarkan pada suatu uji kebakaran skala kecil, yang umumnya dilakukan dalam kondisi dengan ventilasi yang baik. Perlu disadari bahwa sifat optik asap dapat dipengaruhi oleh ventilasi, sehingga tidak cukup jelas bagaimana korelasi data skala kecil ini dengan perilaku dalam skala besar, khususnya untuk skenario di mana kondisi skala besar ini mencakup kebakaran dengan ventilasi kurang. Topik ini memerlukan penelitian lebih lanjut.

#### Tahapan pelepasan asap *quasi-steady* – analisis komposisi lapisan

Fraksi massa dari masing-masing spesi  $i$  dalam lapisan asap pada kondisi aliran *quasi-steady* umumnya diberikan oleh :

$$Y_i = \frac{\dot{m}_i}{\sum_i \dot{m}_i} \quad (\text{A.17})$$

Dalam kondisi aliran *quasi-steady*, laju aliran massa dari masing-masing spesi diberikan sebagai :

$$\dot{m}_i = f_i \dot{m}_f = f_i \frac{Q}{\chi_a \Delta H_c} \quad (\text{A.18})$$

Total aliran massa pada kondisi *quasi-steady* diberikan oleh:

$$\sum_i \dot{m}_i = \bar{\rho} V = \rho_0 V_{ent} = \rho_0 (V - V_{exp}) \quad (\text{A.19})$$

Dengan mensubstitusikan (A.18) dan (A.19) ke dalam rumus (A.17) dapat dilakukan perhitungan fraksi massa dari masing-masing spesi yang ditinjau dalam bentuk laju pembuangan yang diketahui :

$$Y_i - Y_{i,0} = \frac{f_i Q}{\rho_0 \chi_a \Delta H_c (V - V_{exp})} \quad (\text{A.20})$$

Untuk menentukan laju pembuangan volumetrik yang dibutuhkan guna membatasi fraksi massa dari spesi tertentu hingga suatu nilai batas,  $Y_i$ , rumus (A.20) disusun ulang menjadi:

$$V = V_{\text{exp}} + \frac{f_i Q}{\rho_0 \chi_a \Delta H_c (Y_i - Y_{i,0})} \quad (\text{A.21})$$

Laju ekspansi volumetrik,  $V_{\text{exp}}$ , dihitung sebagai:

$$V_{\text{exp}} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p T_0} = \frac{(1 - \chi_i) Q}{\rho_0 c_p T_0} \quad (\text{A.22})$$

**A.7.6** Pembatasan ukuran dan distribusi lubang masuk fan pembuangan dimaksudkan untuk mencegah asap menjadi dingin sebelum dapat dibuang dengan menjaga lapisan asap di atas dekat langit-langit. Hal ini penting khususnya untuk ruangan dimana panjangnya lebih besar dari pada tingginya, seperti pada pusat perbelanjaan.

Lubang masuk fan sebaiknya didistribusikan karena suatu laju pembuangan yang tinggi pada setiap titik pada lapisan asap yang tipis dapat menyebabkan udara bersih dari bawah lapisan asap terhisap melalui lapisan tersebut, menciptakan situasi terbalik dari saluran pembuangan bak mandi (*bath tub*). Oleh karena itu, tujuan dari pendistribusian lubang masuk fan adalah untuk menciptakan suatu laju pembuangan yang lembut dan merata pada keseluruhan lapisan asap.

**A.7.6.2.2** Rumus (3) dan (4) dibuat secara empirik untuk mengestimasi posisi bidang pemisah lapisan asap selama proses pengisian asap. Pengkajian ulang rumus (3) dan (4) ini dibagi dalam 2 bagian:

- (1) perbandingan hasil rumus (3) dan (4) dengan rumus yang didasarkan pada teori (dengan konstanta yang didapat secara empirik), yang selanjutnya disebut rumus berdasarkan ASET.
- (2) Evaluasi kemampuan prediksi rumus (3) dan rumus berdasarkan ASET dengan membandingkan hasil keluaran rumus dengan data eksperimental.

#### Perbandingan dengan rumus berdasarkan ASET

Perbandingan rumus standar ini untuk pengisian asap dengan rumus berdasarkan ASET memberikan suatu indikasi perbedaan antara rumus yang diturunkan secara empirik, sebagai contoh, rumus (3) dan (4), dengan rumus yang pada prinsipnya berdasarkan teori.

#### Kebakaran *steady*

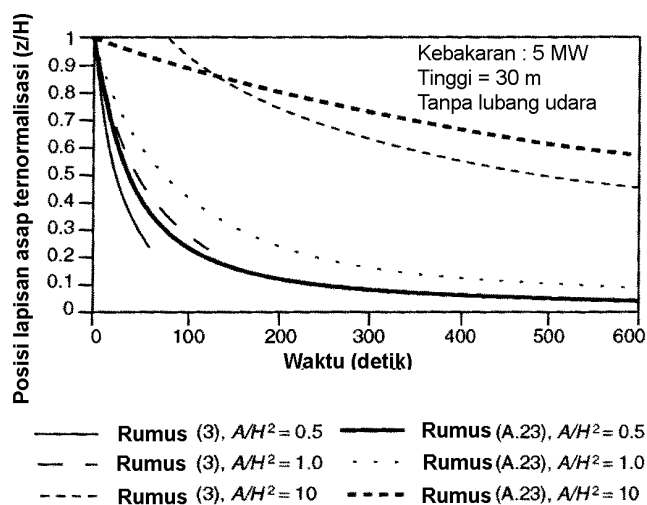
Suatu rumus pengisian asap teoritis dapat diturunkan dengan menggunakan hukum kekekalan massa dan energi untuk menentukan volume tambahan yang dipasokkan ke lapisan atas [Milke 1993]. Dengan menggunakan korelasi udara ikutan cendawan asap dari Zukowski [1980],

$$\frac{z}{H} = \left[ 1 + \frac{2k_v (tQ^{1/3} / H^{4/3})}{3(A/H^2)} \right]^{-3/2} \quad (\text{A.23})$$

di mana

- $z$  = posisi bidang pemisah lapisan asap (m)
- $H$  = ketinggian langit-langit (m)
- $t$  = waktu dari sejak penyalaan (detik)
- $Q$  = laju pelepasan kalor (kW)
- $A$  = luas penampang ruangan ( $\text{m}^2$ )
- $k_v$  = konstanta udara ikutan  $\simeq 0,064 \text{ m}^{4/3} (\text{detik.kW}^{1/3})$

Suatu perbandingan dari  $z/H$  yang diprediksikan oleh rumus (3) dan (A.23) diberikan dalam gambar A.3(a) untuk suatu ketinggian langit-langit 30 m, suatu kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan berukuran 5 MW, dan suatu rentang ratio  $A/H^2$  yang lebar. Secara umum, kesesuaian antara kedua rumus cukup baik. Rumus (3) hampir selalu memprediksikan suatu posisi bidang pemisah lapisan asap yang lebih rendah, kecuali dalam kasus ruangan yang sangat besar yang diwakili oleh  $A/H^2 = 10$ . Dalam kasus ini, rumus (3) mengindikasikan suatu penundaan kira-kira 100 detik sebelum pembentukan suatu lapisan asap, sementara rumus (A.23) mengindikasikan pembentukan lapisan dengan segera. Penundaan ini masuk akal untuk suatu ruangan yang besar seperti ini. Penundaan ini dapat disertakan dalam rumus (A.23) dengan memasukkan suku tambahan untuk menghitung kelambatan waktu perjalanan [Mowrer 1987]. Kelambatan waktu perjalanan diestimasikan sebesar 37 detik untuk kasus ini dengan suatu ketinggian 30 m dan luas penampang 9000 m<sup>2</sup>.

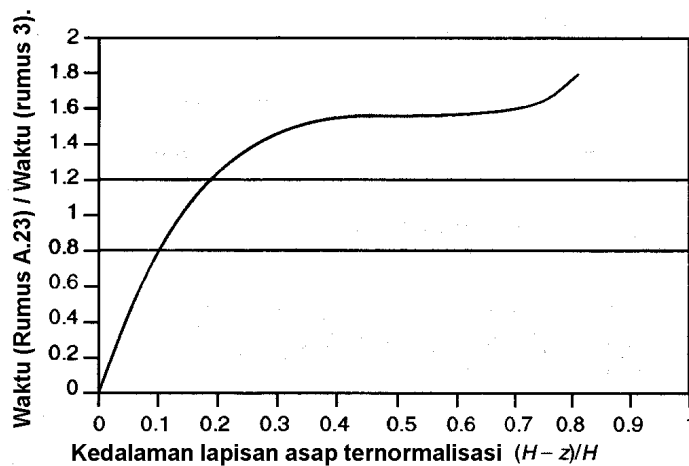


**Gambar A.3(a) Perbandingan rumus-rumus aljabar (3) dan (A23): kebakaran steady**

Meskipun perbandingan dalam gambar A.3(a) berguna, hal ini hanya berlaku untuk nilai  $A$ ,  $H$  dan  $Q$  terpilih. Perbandingan ini dapat diperluas penggunaannya untuk semua nilai  $A$ ,  $H$ , dan  $Q$  dengan cara membentuk suatu rasio dari dua rumus seperti yang dinyatakan dalam  $t$  :

$$\frac{t_{eqnA.23}}{t_{eqn3}} = \frac{3}{2k_v} \frac{\left[ \left( \frac{z}{H} \right)^{-2/3} - 1 \right]}{\exp \left[ \frac{1,11 - z/H}{0,28} \right]} \tag{A.24}$$

Gambar A.3(b) mengindikasikan hubungan antara rasio waktu dengan kedalaman lapisan asap yang dinormalisasikan,  $(H-z)/H$ . Untuk kesesuaian yang sempurna antara kedua rumus, rasio waktu sebaiknya mempunyai nilai 1,0. Namun, rasio waktu cukup bervariasi. Rasio waktu berada dalam 20% dari 1,0 hanya untuk suatu rentang yang sangat kecil. Untuk kedalaman lapisan asap yang dinormalisasikan kurang dari 0,13 (atau tinggi jernih dinormalisasikan 0,87), rumus (A.23) selalu memprediksikan waktu yang lebih singkat untuk mencapai suatu kedalaman tertentu dibanding rumus (3). Sebaliknya, rumus (3) selalu memprediksikan waktu yang lebih singkat untuk mencapai suatu kedalaman asap yang dinormalisasikan di atas 0,13.



**Gambar A.3(b) Perbandingan rumus aljabar (3) dan (A.23): Kebakaran steady**

Rasio waktu relatif tidak sensitif untuk nilai  $(H-z)/H$  dalam rentang 0,4 ~ 0,6. Di dalam rentang ini, rasio waktu bernilai nominal 1,5 yang artinya adalah, waktu yang diprediksikan oleh rumus (A.23) untuk mendapatkan suatu lapisan asap dengan kedalaman tertentu adalah 50% lebih besar dari yang diprediksikan oleh rumus (3). Dengan kata lain, rumus (3) memprediksikan penurunan yang lebih cepat sampai ke rentang kedalaman lapisan asap tersebut dibanding rumus (A.23).

#### Kebakaran t-kuadrat

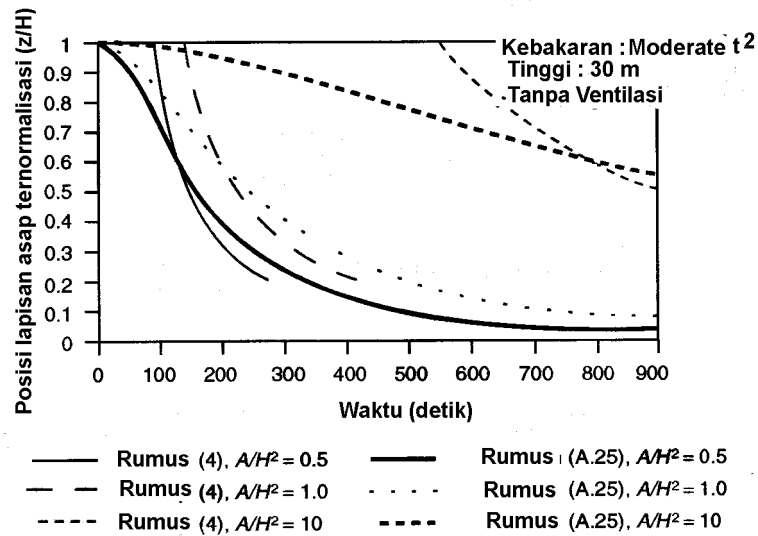
Perbandingan serupa dapat dilakukan untuk rumus (4) yang diturunkan secara empirik dan rumus yang didasarkan pada teori untuk kebakaran t-kuadrat. Rumus yang didasarkan pada ASET adalah :

$$\frac{z}{H} = \left( 1 + \frac{20k_v t^{5/3} / H^{-4/3}}{t_g^{2/3} A / H^2} \right)^{-3/2} \quad (\text{A.25})$$

dimana  $t_g$  = laju pertumbuhan kebakaran (detik)

Suatu perbandingan prediksi nilai  $z/H$  yang dipresentasikan dalam gambar A.3(c) untuk langit-langit dengan ketinggian 30 m, suatu kebakaran dengan laju pertumbuhan moderat ( $t_g = 300$  detik), dan suatu rentang rasio  $A/H^2$  yang lebar. Untuk nilai  $A/H^2$  hingga 1,0 kesesuaian nampak sangat baik setelah lapisan asap terbentuk. Sekali lagi, rumus yang diturunkan secara empirik dengan mencakup secara implisit keterlambatan perjalanan. Untuk rasio  $A/H^2 = 10$ , penundaan terbentuknya suatu lapisan asap lebih besar dari pada untuk rasio  $A/H^2$  yang lebih kecil; sedemikian sehingga kesesuaian posisi bidang pemisah yang cukup baik tidak dicapai sampai kira-kira 800 detik. Kelambatan waktu perjalanan yang diperkirakan adalah 206 detik.

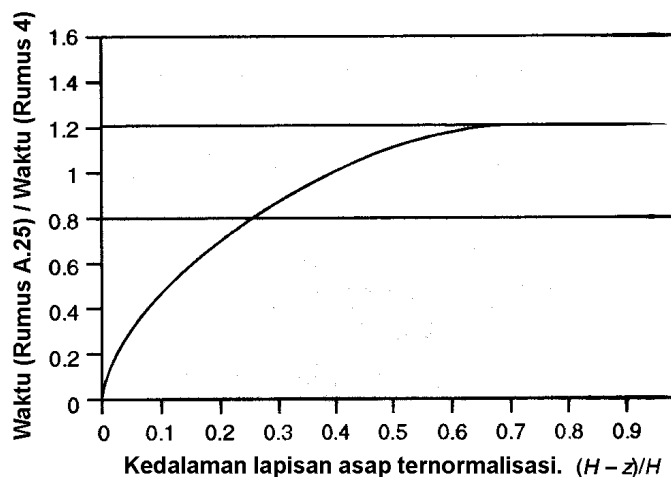
Nilai  $z/H = 0,59$  untuk titik perpotongan dari berbagai kurva untuk kedua rumus adalah konstan, tidak tergantung pada harga  $A$ ,  $H$ , dan  $Q$ . Oleh karena itu, untuk nilai  $z/H > 0,59$ , rumus (A.25) mengestimasi waktu yang lebih singkat dari bidang pemisah lapisan asap mencapai suatu posisi tertentu, sementara rumus (4) mengestimasi waktu yang lebih cepat untuk nilai  $z/H$  yang lebih rendah.



**Gambar A.3(c) Perbandingan dari rumus-rumus aljabar (4) dan (A.25): kebakaran t-kuadrat**

Dengan eksponen yang berbeda pada ruas kanan dari rumus (4) dan (A.25), suatu perbandingan umum sekali lagi hanya mungkin dengan penyelesaian untuk waktu dan menyatakannya sebagai suatu rasio:

$$\frac{t_{eqnA.25}}{t_{eqn4}} = \left[ \frac{(0,91)^{-0,69}}{4k_v^{-0,6}} \right] \left[ \frac{[(z/H)^{-2/3} - 1]^{0,6}}{(z/H)^{-0,69}} \right] \tag{A.26}$$



**Gambar A.3(d) Perbandingan rumus aljabar, rumus (4) dan (A.25): kebakaran t-kuadrat**

Hubungan dari rasio waktu untuk berbagai kedalaman lapisan asap yang dinormalisasikan,  $(H-z)/H$ , diberikan dalam gambar A.3(d). Secara umum, kesesuaian antara kedua waktu yang diprediksikan untuk kebakaran t-kuadrat adalah jauh lebih baik dari pada kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan (*steady fires*); waktu yang diprediksikan dengan menggunakan rumus (A.25) ada dalam 20% dari waktu dihasilkan rumus (4) untuk nilai  $(H-$



$z)/H$  dari 0,26 hingga 0,80. Sebagaimana dalam kasus kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan, rasio waktu adalah kurang dari 1,0 untuk nilai yang kecil dari kedalaman asap yang dinormalisasikan. Namun, dalam kasus ini, rasio waktu tidak melampaui 1,0 hingga kedalaman lapisan asap yang dinormalisasikan sekurangnya 0,40.

### **Program eksperimental skala besar di dalam ruangan dengan langit-langit yang tinggi**

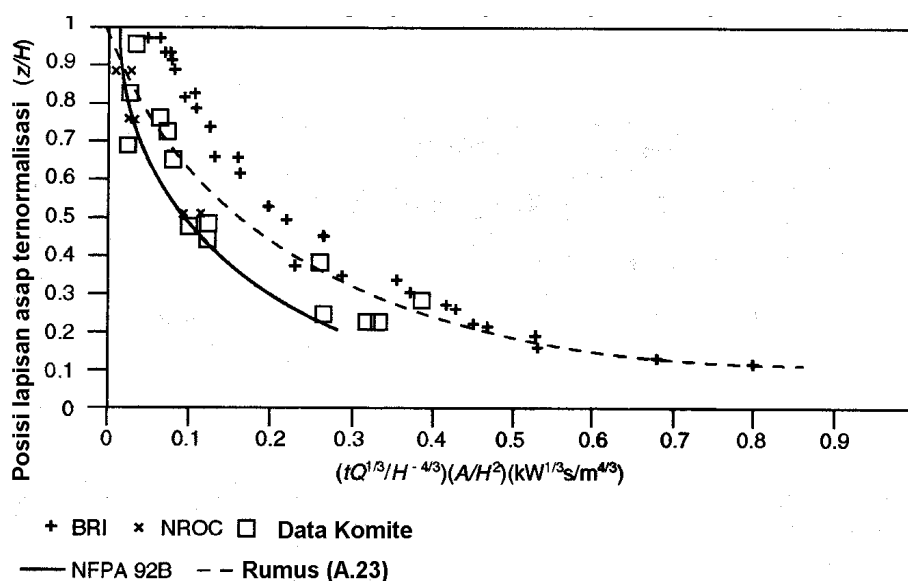
Kemampuan prediktif dari masing-masing rumus dapat diperiksa dengan membandingkan hasil keluarannya terhadap data eksperimental.

Kemampuan prediktif dari rumus (A.23) diperiksa dengan membandingkan hasil keluaran terhadap data eksperimental. Sumber data eksperimental yang melibatkan suatu rentang ketinggian langit-langit dari 2,4 m hingga 12,5 m dengan ukuran ruangan dan skenario kebakaran yang diidentifikasi dalam tabel A.3. Termasuk dalam tabel adalah sumber data yang diacu dalam perkembangan awal dari rumus (3) [Heskestad 1991. Tersedia dua set data eksperimental tambahan sejak analisis awal oleh komite [Yamana 1985, Loughheed 1991]. Deskripsi komprehensif dari program pengujian tersedia ditempat lain [Hagglund et al 1985, Mulholland et al 1981, Cooper et al 1981, Milke 1993]. Karena kedua data tambahan dikumpulkan dari kebakaran dalam ruangan dengan ketinggian langit-langit yang secara signifikan lebih besar dari kumpulan data awal, kumpulan data yang baru ini menjadi menarik.

Posisi lapisan asap yang diprediksikan dan diukur sebagai fungsi waktu dari data sebelumnya dan kedua kelompok data yang baru dipresentasikan dalam gambar A.3(e). Data yang diidentifikasi sebagai "Komite" meliputi semua data atas dasar mana komite mengembangkan rumus (3). Kumpulan data yang baru diidentifikasi secara terpisah. Seperti yang diindikasikan dalam gambar, posisi lapisan asap dari data yang dianalisa berada diantara yang diukur oleh NRCC dan BRI. Oleh karena itu, meski terdapat perbedaan dalam ketinggian langit-langit, kumpulan data baru dan kumpulan data lama nampak cukup mirip. Kurva dengan label "NFPA 92B" menggambarkan prediksi dari rumus (3). Secara umum, kesesuaian antara prediksi dari rumus (3) dan (A.23) dan data eksperimental sangat baik. Rumus (3) memberikan batas bawah data eksperimental, mencakup data NRCC yang baru. Rumus (A.23) nampak memprediksikan nilai tengah dari rentang data.

Rumus yang dapat sebanding dengan rumus (3) dan (A.23) dapat diturunkan untuk ruangan dengan penampang variabel dan untuk kebakaran yang mengikuti aturan eksponensial (sebagai contoh kebakaran  $t$ -kuadrat). Selanjutnya, tersedia rumus aljabar yang mengacu ke suatu keanekaragaman sifat lapisan asap, termasuk temperatur, peredupan cahaya, dan konsentrasi spesi [Milke, 1993]. Rumus ini berlaku untuk mengevaluasi kondisi transien sebelum beroperasinya sistem manajemen asap atau kondisi keseimbangan dengan beroperasinya suatu sistem manajemen asap. Oleh karena itu, tersedia suatu anekaragam rumus aljabar tersedia dan dapat digunakan sebagai alat yang berguna untuk perancangan awal atau untuk pemeriksaan aspek tertentu dari hasil perhitungan dengan komputer untuk situasi yang lebih kompleks.

**A.7.6.2.4** Dalam ketiadaan analisis dengan menggunakan model skala, model medan, atau adaptasi model zona, sebaiknya dipertimbangkan suatu analisis sensitivitas. Suatu analisis sensitivitas dapat menyediakan informasi penting untuk membantu dalam pengambilan keputusan teknis berkaitan dengan penggunaan rumus (3) dan (4) untuk bentuk geometri yang kompleks dan tidak seragam. Suatu contoh dari suatu analisis sensitivitas diilustrasikan sebagai berikut untuk suatu ruangan bervolume besar yang mempunyai geometri langit-langit tidak rata.



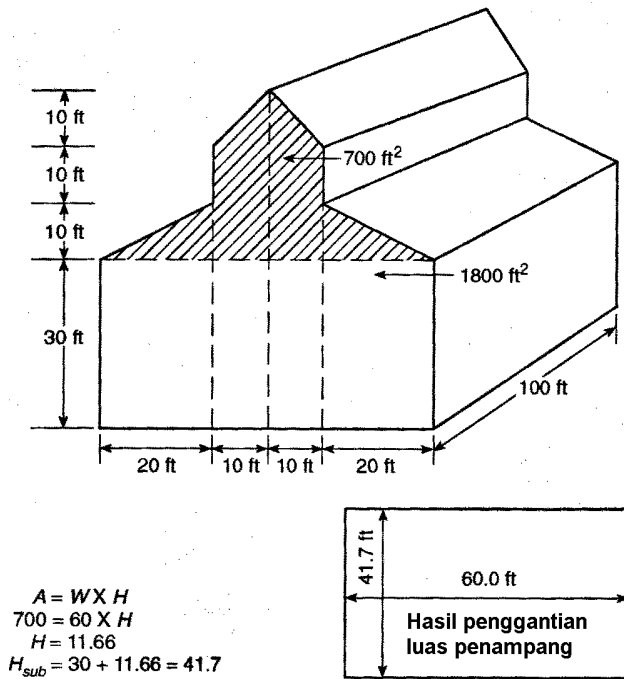
Gambar A.3(e) Perbandingan posisi lapisan asap, data eksperimental dan hasil prediksi

Tabel A.3 Ringkasan dari eksperimen skala penuh

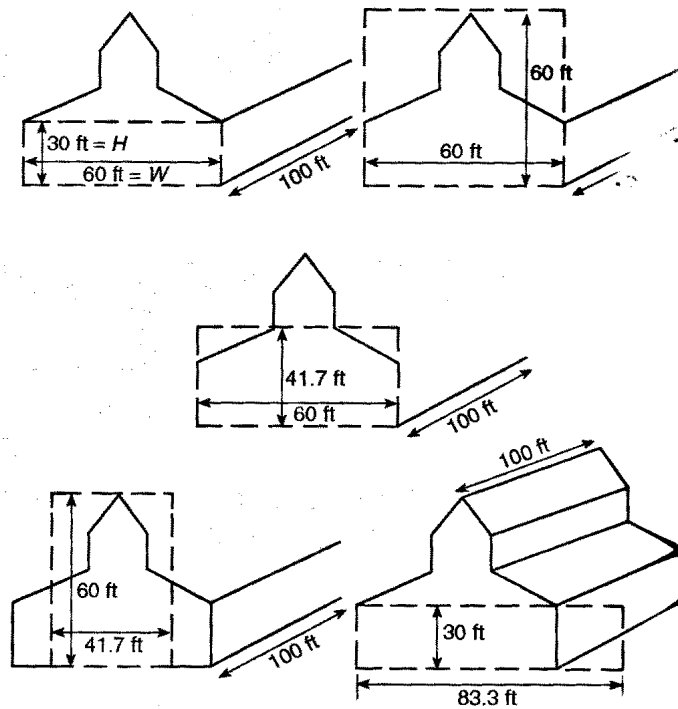
Kelompok penelitian	Bahan bakar	Laju pelepasan kalor	Dimensi ruang uji	Pengukuran posisi lapisan asap
Data baru				
BRI [50]	Bak metanol 3,24 m <sup>2</sup>	1,3 MW (steady)	30 m x 24m ; tinggi 26,3 m	Observasi visual, kenaikan temperatur pertama
NRCC [51]	Bak etanol 3,6 m diameter	8 MW (steady)	55 m x 33 m; tinggi 12,5 m	Kenaikan temperatur pertama
Data komite				
Sandia, test 7 [10]	Burner propylene berdiameter 0,91 m	516 kW	18,3 m x 12,2 m; tinggi 6,1 m	Kenaikan pertama temperatur, konsentrasi karbon dioksida
Mulholland [53]	Burner acetylene	16,2 kW	3,7 m x 3,7 m; tinggi 2,4 m	kenaikan temperatur, peredupan cahaya
Cooper [54]	Burner metan	25 kW, 100 kW , 225 kW	Ruang 89,6 m <sup>2</sup> , tinggi koridor dan lobi 2,4 m	Kenaikan temperatur,
Hagglund(14)	Bak kerosen 0,5 m <sup>2</sup>	280 kW	5,62 m x 5,62 m; tinggi lobi 2,4 m	Observasi visual, kenaikan temperatur pertama

Langkah pertama analisis adalah mengubah suatu geometri yang tidak seragam menjadi suatu geometri seragam yang mirip atau mempunyai volume yang sama.

Dalam hal geometri seperti yang ditunjukkan dalam gambar A.4(a), ini akan dilakukan sebagai berikut:



Gambar A.4(a) Ruang bervolume besar dengan geometri langit-langit tidak rata



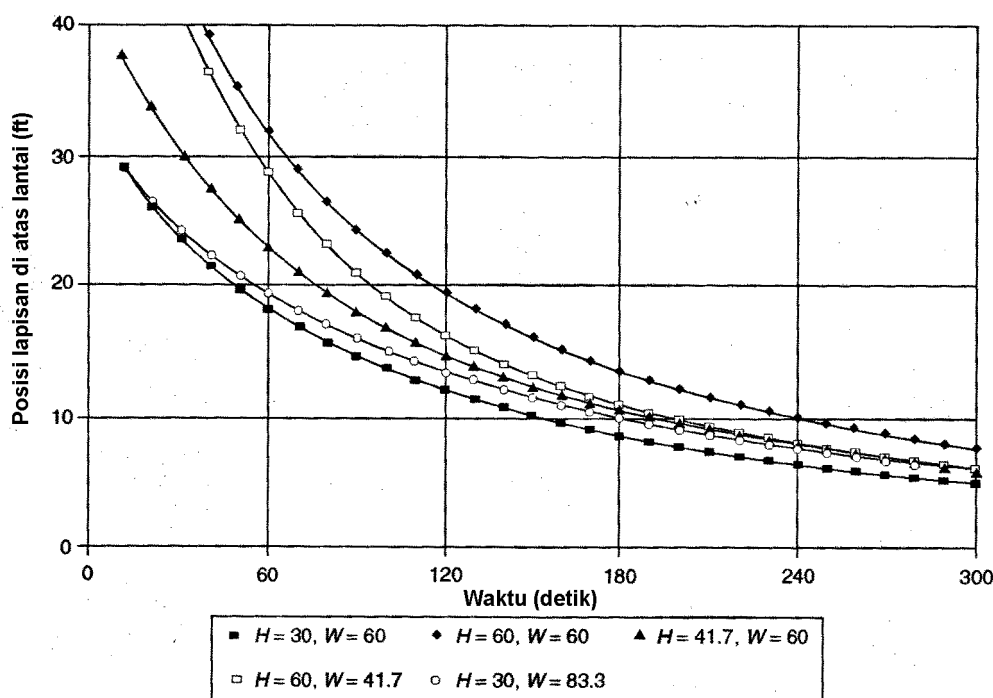
Gambar A.4(b) Pertimbangan geometri ketidakseragaman lainnya

- (1) ubah luas penampang vertikal bukan segi empat yang ada ke suatu penampang vertikal segi empat dengan luas yang sama.
- (2) Dimensi ketinggian yang berkaitan dengan penampang segi empat ekivalen

Hasil rumus (4) harus di bandingkan dengan kondisi maksimum dan kondisi minimum lainnya sebagaimana ditunjukkan dalam gambar A.4(b).

Suatu metoda perbandingan yang tepat dapat berupa suatu grafik persamaan (4) seperti ditunjukkan dalam gambar A.4(c). Asumsikan bahwa bangunan yang diteliti dapat dievakuasikan dalam 3 menit dan bahwa kriteria perancangannya mensyaratkan lapisan asap tetap pada berada 10 ft di atas lantai pada saat itu (3 menit). Suatu kajian dari kurva-kurva akan mengindikasikan bahwa ketinggian lapisan asap seperti yang dihitung untuk kasus pengganti adalah tepat. Kesimpulan ini dapat ditarik dengan mengingat bahwa baik ketinggian ekstrim minimum kasus ( $H=30$  ft,  $W = 60$ ft) atau kasus dengan ketinggian maksimum ( $H=60$ ) tidak menawarkan jawaban yang diharapkan, tetapi hasil untuk kedua kasus ini ( $H=41,6$   $W=60$ , dan  $H=30$ ,  $W=83,5$ ) dapat dibenarkan untuk suatu pendekatan yang baik (masuk akal) dari perilaku dari ruang (dengan denah) tidak seragam. Sebaliknya, mungkin juga cukup tidak masuk akal untuk mengharapkan perilaku tersebut diindikasikan oleh kasus maksimum dan kasus minimum.

**A.7.6.2.4.(3)** Suatu model zona (lihat butir 7.1.1.3.1) yang memprediksikan pengisian asap pada suatu ruang dengan penampang geometri seragam dimodifikasikan untuk mengenali perubahan luas penampang dari suatu ruangan (lihat butir 7.1.1). Sumber udara-ikutan (*entrainment*) dapat dimodifikasikan untuk menampung (*to account*) kenaikan atau penurunan yang diharapkan dari udara ikutan oleh sebab pertimbangan-pertimbangan geometris seperti misalnya tonjolan-tonjolan dan sebagainya.



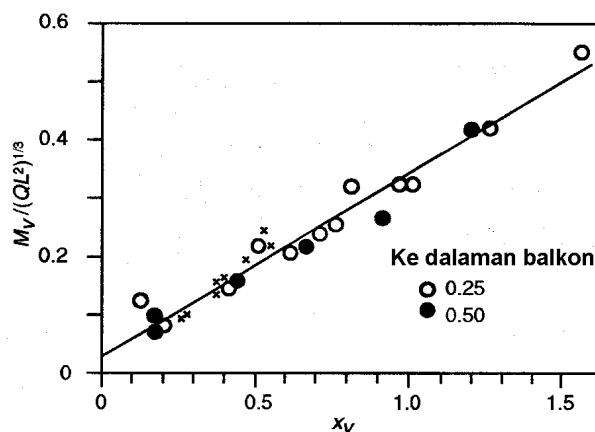
**Gambar A.4(c) Data perbandingan untuk pedoman pada geometri tidak segi empat-kebakaran yang tumbuh**

**A.7.6.2.4 (4)** Suatu ruang tidak beraturan dievaluasi dengan menggunakan rumus (3) dan (4) pada dan antara batas-batas suatu ketinggian maksimum dan ketinggian minimum yang dapat diidentifikasi dari geometri ruangan dengan menggunakan pertimbangan ketinggian atau volume ekivalen.

**A.7.8.1.2** Pengujian dengan model fisik [Lougheed & Hadjisophocleous 1997, 1999] yang menggunakan kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan (steady state) telah menunjukkan bahwa rumus (8) memberikan suatu perkiraan yang baik dari laju aliran massa cendawan asap untuk suatu sistem manajemen asap yang beroperasi dalam kondisi keseimbangan (lihat butir 7.7.1). Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa lapisan asap tercampur dengan baik. Temperatur rata-rata dalam lapisan asap dapat didekati dengan menggunakan estimasi adiabatik untuk temperatur cendawan asap pada ketinggian bidang pemisah lapisan asap [rumus (17)].

Pada keseimbangan, ketinggian  $z$  dalam rumus (8) adalah lokasi dari bidang pemisah lapisan asap di atas permukaan bahan bakar (lihat gambar A.1). Zona transisi berada di bawah ketinggian lokasi ini. Untuk suatu sistem manajemen asap yang efisien, kedalaman zona transisi kira-kira 10% dari ketinggian atrium. Dalam zona transisi, temperatur dan parameter asap lainnya berkurang secara linier dengan ketinggian, antara ketinggian bidang pemisah lapisan asap dan tepi bawah dari zona transisi.

**A.7.8.2.1** Kesesuaian antara prediksi dari rumus (17) dengan yang dari upaya eksperimental skala kecil dipresentasikan dalam gambar A.5. Meskipun kesesuaian itu cukup bagus, tetapi hasil tersebut hanya berasal dari dua program eksperimental skala kecil.



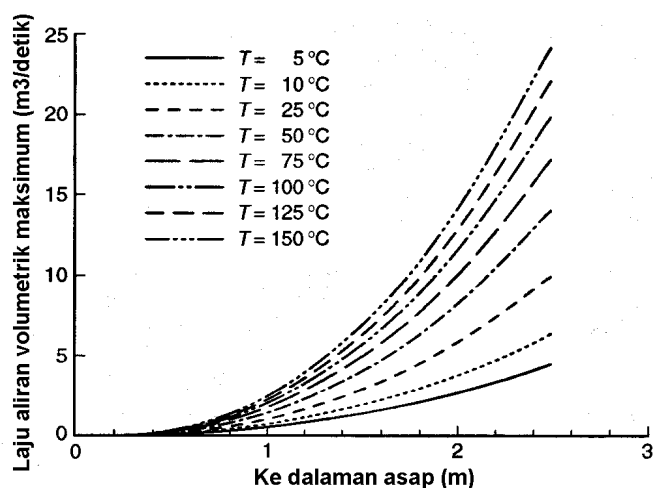
**Gambar A.5** Kesesuaian antara nilai-nilai prediksi dan eksperimen

**A.7.9** Rumus-rumus untuk efek penyumbatan (*plugholing*) aslinya dikembangkan untuk pelepasan alami [Thomas et al 1963]. Rumus ini juga diaplikasikan untuk sistem pembuangan mekanik oleh Hinckley [1995]. Faktor numerik yang diikutkan dalam rumus (19) dan (20) mengasumsikan lubang masuk pembuang ditempatkan dekat suatu dinding. Faktor yang lebih besar dapat digunakan jika lubang masuk ditempatkan dekat pusat reservoir asap.

Meskipun rumus-rumus tersebut sebelumnya dikembangkan untuk pelepasan alami, kerjasama penelitian pemodelan fisik dan numerik yang dilakukan oleh ASHRAE dan NRC [Lougheed & Hadjisophocleous 1997, 1999, Hadjisophocleous et al 1999] mengindikasikan bahwa rumus-rumus tersebut juga dapat diaplikasikan untuk sistem pembuangan mekanik. Penelitian-penelitian ini menggunakan model fisik, dengan ketinggian 5,5 m dan 12,2 m dengan laju aliran volumetrik hingga 25 m<sup>3</sup>/detik untuk lubang masuk pembuangan tunggal (kecepatan rata-rata pada lubang masuk hingga 30 m/detik). Hasil model fisik mengindikasikan bahwa kedalaman asap dapat dikurangi hingga hampir 10% dari tinggi jernih (bersih) dengan menggunakan lubang masuk berganda untuk meminimalkan laju aliran massa/volumetrik pada masing-masing lubang masuk pembuangan. Penelitian model numerik mengindikasikan bahwa hasil tersebut dapat diskalakan untuk atria yang lebih tinggi.

Dengan menambah jumlah lubang masuk pembuangan, kecepatan pada masing-masing lubang masuk dapat dikurangi. Efisiensi tertinggi untuk model fisik sistem pembuangan

didapatkan jika kecepatan pada lubang masuk dibatasi hingga 10 m/detik atau kurang. Direkomendasikan pula rasio perbandingan kedalaman lapisan asap terhadap diameter lubang masuk pembuangan ( $d/D$ ) lebih besar dari 2 ([untuk lubang masuk pembuangan berbentuk segiempat, gunakan  $D=2ab/(a+b)$ , dimana a dan b adalah panjang dan lebar bukaan pembuangan]). Dalam cara ini, kecepatan aliran, pada bagian bawah dari zona transisi, yang dihasilkan oleh sistem pembuangan cukup rendah dibanding kecepatan pada lubang masuk, dan aliran dominan ke dalam sistem pembuangan berasal dari lapisan asap. Upaya untuk mengurangi kedalaman lapisan asap di bawah kedalaman minimum dengan menggunakan laju pembuangan yang besar tidak pernah berhasil. Dalam kasus ini, sistem pembuangan asap menghasilkan suatu campuran udara dingin dengan lapisan panas. Lapisan asap didinginkan dan diencerkan. Namun, kedalamannya bertambah. Pengaruh temperatur dan kedalaman lapisan asap pada efisiensi maksimum laju pelepasan diperlihatkan dalam gambar A.6. Efisiensi sistem pembuangan asap meningkat tajam dengan kenaikan kedalaman lapisan asap dan lebih sedikit meningkat (dibanding dengan peningkatan oleh kedalaman asap) dengan kenaikan temperatur lapisan asap. Faktor-faktor ini, terkait dengan penurunan laju aliran masa dengan penurunan z, menyediakan suatu mekanisme oto-kompensasi (*self compensation*) untuk sistem manajemen asap dalam atrium. Pertimbangan-pertimbangan yang dimuat dalam bagian ini menjadi penting ketika berhadapan dengan suatu sistem yang persyaratan rancangan untuk tinggi jernihnya tepat dibawah ketinggian lubang masukan pembuangan.



**Gambar A.6 Pengaruh temperatur dan kedalaman lapisan asap pada laju pelepasan**

**A.7.11** Densitas asap kira-kira sama dengan densitas udara. Densitas udara pada 68°F di atas permukaan laut adalah 0,075 lb/ft<sup>3</sup>. Densitas udara pada temperatur lain dapat dihitung dari:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{528}{460 + T}$$

di mana :

$\rho_0$  = 0,075 (lb/ft<sup>3</sup>)

$\rho$  = densitas asap pada temperatur T (lb/ft<sup>3</sup>)

T = Temperatur asap (°F)

#### A.8.4.5 Upaya verifikasi dapat meliputi hal-hal sebagai berikut

- (1) Verifikasi menyeluruh dari kabel, peralatan, dan perlengkapan, dalam batas tertentu termasuk syarat untuk konfirmasi dalam pengaktifan sistem, pengujian periodik, dan pembatalan operasi secara manual.
- (2) Ketersediaan daya listrik untuk operasional harus mencapai seluruh sirkit yang tidak saling terkait.
- (3) Konfirmasi dari pengaktifan fan yang ditunjukkan dengan adanya tekanan di dalam saluran udara, aliran udara, atau sensor ekivalen yang menanggapi hilangnya pasokan daya listrik; masalah dalam kabel sirkit pasokan daya dan kontrol; hambatan aliran udara; dan kegagalan dari ban penggerak, tangkai kopling, ataupun motornya sendiri.
- (4) Konfirmasi dari beroperasinya damper udara dengan kontak, kedekatan, atau sensor ekivalen yang menanggapi hilangnya pasokan daya listrik atau udara kempa; masalah dalam penyediaan daya, sirkit kontrol, atau jalur penumatik, dan kegagalan dari penggerak damper, batang penyambung, atau dampernya sendiri.
- (5) Upaya lain atau cara lain yang cocok.

Nomor (1) sampai (4) menjelaskan beberapa metoda yang dapat digunakan, baik secara sendiri-sendiri atau kombinasi, untuk memastikan bahwa semua bagian dari sistem kontrol beroperasi secara wajar. Sebagai contoh, supervisi konvensional (untuk pekerjaan elektrikal) mungkin digunakan untuk memastikan tersambungannya bahan penghantar dari unit sistem kontrol tanda kebakaran di dalam jarak 3 ft dari masukan sistem kontrol (lihat SNI 03-3986-2000, Tata cara perencanaan, pemasangan dan pengujian sistem deteksi dan alarm kebakaran untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung), dan verifikasi menyeluruh ini dapat digunakan untuk memastikan pengoperasian dari masukan sistem kontrol ke hasil akhir yang dikehendaki. Jika sistem lain digunakan untuk memastikan bagian yang berbeda dari sirkit kontrol, peralatan yang terkendali, atau kedua-duanya, maka masing-masing sistem harus bertanggung-jawab dalam memberikan indikasi kondisi-kondisi di luar hal yang normal dari masing-masing bagiannya.

Verifikasi menyeluruh, seperti dijelaskan pada butir 3.5, memantau baik komponen elektrikal maupun mekanikal dari sistem kontrol asap. Verifikasi menyeluruh memberikan konfirmasi bahwa hasil yang diinginkan telah dicapai selama jangka waktu di mana alat yang dikendalikan sedang diaktifkan. Tujuan dari verifikasi menyeluruh adalah untuk menentukan apakah ada kegagalan sirkit, tetapi sebaliknya juga memastikan apakah hasil akhir yang diinginkan (misal aliran udara atau posisi damper) tercapai. Verifikasi menyeluruh yang benar, karena itu, memerlukan perbandingan antara operasi yang diinginkan dengan hasil akhir yang sesungguhnya.

Terbukanya suatu kabel kontrol, kegagalan suatu sabuk penggerak fan, terlepasnya suatu tangkai kopling, tersumbatnya suatu saringan udara, kegagalan suatu motor, ataupun kondisi tidak normal yang lain yang dapat menghambat operasi sistem dengan layak tidak diharapkan untuk menghasilkan suatu indikasi tidak bekerjanya sistem secara normal pada saat alat yang dikendalikan tidak berfungsi, karena hasil yang terukur secara individu pada saat itu sesuai dengan hasil yang diharapkan.

Jika kondisi yang mencegah operasi yang layak terjadi selama pengaktifan alat pada upaya berikutnya, maka suatu indikasi tidak bekerja yang normal harus disediakan.

**A.9.3.6.2** Bahwa pengujian serah terima yang melibatkan kebakaran nyata memang mempunyai bahaya yang nyata terhadap jiwa dan harta milik karena panas yang ditimbulkan dan sifat racun dari asap.

## Lampiran B

### B.1 Pendahuluan

Yang berikut menyajikan teknik untuk mengestimasi laju pelepasan kalor dari bermacam susunan bahan bakar yang biasanya terdapat di bangunan gedung di mana pelepasan asap merupakan suatu sarana keselamatan kebakaran yang potensial. Teknik ini terutama membahas menunjuk estimasi konsentrasi bahan bakar yang didapati pada toko, gelanggang, kantor, dan lokasi serupa yang meliputi daerah yang luas seperti yang dimaksud dalam standar ini.

Sebaliknya, NFPA 204, *Guide for Smoke and Heat Venting*, menunjuk jenis susunan bahan bakar umumnya untuk lokasi penyimpanan dan manufaktur dan bangunan gedung jenis yang lain, yang termasuk dalam standar itu. SNI ini dapat digunakan untuk situasi di mana lapisan panas tidak menambah laju pembakaran.

Metoda yang diberikan pada apendik ini untuk mengestimasi laju pelepasan kalor, oleh karena itu didasarkan pada kondisi pembakaran bebas di mana tidak ada efek langit-langit atau lapisan gas panas yang terlibat. Dan oleh karena itu diasumsikan bahwa laju pembakaran secara relatif tidak dipengaruhi oleh lapisan panas.

### B.2 Sumber data

Sumber data berikut muncul sesuai urutan prioritas, dengan syarat perolehan data mempunyai kualitas yang sama:

- (1) pengujian sesungguhnya dari susunan terlibat
- (2) pengujian sesungguhnya dari susunan serupa
- (3) algoritma yang diturunkan dari pengujian susunan dengan karakteristik bahan bakar dan dimensional yang serupa
- (4) perhitungan yang didasarkan pada sifat dan bahan yang diuji dan radiasi nyala api (*flame flux*) yang diharapkan
- (5) model matematik dari penyebaran dan perkembangan kebakaran.

### B.3 Pengujian sebenarnya dari susunan terlibat

Bila suatu pengujian kalorifik sebenarnya dari susunan spesifik telah dilakukan, dan data dinyatakan sebagai laju pelepasan kalor, maka data tersebut dapat digunakan sebagai masukan untuk metoda dalam standar ini. Karena data pengujian sebenarnya jarang menghasilkan kondisi mantap (*steady state*) yang diasumsikan untuk suatu kebakaran pertumbuhan terbatas, atau pertumbuhan mengikuti kuadrat waktu yang diasumsikan untuk suatu kebakaran yang tumbuh kontinyu ( $t^2$ ), pertimbangan keteknikan biasanya diperlukan untuk memperoleh masukan sesungguhnya yang perlu jika salah satu pendekatan ini digunakan (lihat lampiran C untuk detil lebih lanjut yang relevan untuk kebakaran  $t^2$ ). Jika digunakan model komputer yang dapat merespon suatu kurva laju pelepasan kalor terhadap waktu, data dapat langsung dipergunakan. Saat ini tidak ada katalog pengujian susunan spesifik bahan bakar. Beberapa data pengujian dapat ditemukan dalam berbagai laporan teknik. Sebagai gantinya, pengujian individual dapat dilakukan.

Banyak pengujian kebakaran tidak memasukkan suatu pengukuran langsung dari laju pelepasan kalor. Dalam beberapa kasus, laju pelepasan kalor dapat diturunkan berdasarkan pengukuran laju kehilangan massa dengan mempergunakan rumus berikut:



$$Q = \dot{m} h_c \quad (\text{B.1})$$

di mana:

$Q$  = laju pelepasan kalor (kW)

$\dot{m}$  = laju kehilangan massa (kg/det)

$h_c$  = kalor pembakaran (kJ/kg)

Pada kasus lainnya, laju pelepasan kalor dapat diturunkan berdasarkan pengukuran ketinggian nyala api sebagai berikut:

$$Q = 37(L + 1,02D)^{5/2} \quad (\text{B.2})$$

di mana:

$Q$  = laju pelepasan kalor (kW)

$L$  = ketinggian nyala api (m)

$D$  = diameter kebakaran (m)

#### B.4 Pengujian sebenarnya susunan mirip dengan yang terkait

Bila suatu pengujian kalorifik sebenarnya dari susunan spesifik tidak ditemukan, ada kemungkinan untuk memperoleh data pada satu atau lebih pengujian yang mirip dengan bahan bakar yang dimaksud dalam hal-hal penting seperti jenis bahan bakar, susunan, atau skenario penyalaan. Semakin mirip pengujian sebenarnya dengan bahan bakar yang dimaksud, semakin tinggi keyakinan pada laju pelepasan kalor yang diturunkan. Tetapi tambahan pertimbangan keteknikan mungkin diperlukan untuk menyesuaikan data pengujian untuk mendekati data bahan bakar yang dimaksud. Jika laju pelepasan kalor tidak diukur secara langsung, dapat diestimasi dengan menggunakan metoda yang dijelaskan untuk estimasi laju pembakaran dari ketinggian nyala api pada butir B.3.

#### B.5 Algoritma yang didapat dari pengujian susunan yang mempunyai dengan karakteristik bahan bakar dan dimensional yang serupa

##### B.5.1 Kebakaran bak (*pool fires*)

Dalam banyak kasus, laju pelepasan kalor dari susunan yang diuji telah dibagi oleh suatu dimensi yang biasa dipakai, misalnya luas lantai yang dihuni, untuk menurunkan laju pelepasan kalor yang dinormalisasikan per satuan luas lantai. Laju pelepasan kalor dari kebakaran bak adalah algoritma terbaik yang didokumentasikan dan diterima pada kelas ini. Suatu rumus untuk laju pelepasan massa dari kebakaran bak adalah sebagai berikut [76] :

$$\dot{m}'' = \dot{m}_0'' (1 - e^{-kBD}) \quad (\text{B.3})$$

Variabel untuk rumus (B.3) ditunjukkan pada tabel B.5.1 [76]

Laju massa yang diturunkan dari rumus (B.3) dikonversikan ke dalam laju pelepasan kalor, menggunakan rumus (B.1) dan kalor pembakaran dari tabel B.1. Laju pelepasan kalor per satuan luas lantai dikalikan luas bak kebakaran menghasilkan data pelepasan kalor untuk kebakaran yang diantisipasi.

## B.5.2 Data lain yang dinormalisasikan

Data lain telah dikembangkan dari pengujian yang didasarkan pada laju pembakaran per satuan luas. Tabel B.2(a) dan B.2(b) memuat data yang paling banyak tersedia.

Tabel B.1 Data untuk estimasi laju pembakaran bak besar

Bahan	Densitas (lb/ft <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> (Btu/lb)	m <sub>0</sub> <sup>"</sup> (lb/ft <sup>2</sup> detik)	kB (ft <sup>-1</sup> )
Cryogenic*				
Liquid H <sub>2</sub>	4,4	55.000	0,0035	1,9
LNG (umumnya CH <sub>4</sub> ).	26	21.500	0,016	0,33
LPG (umumnya C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	37	20.000	0,02	0,43
Alkohol				
Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	50	8.500	0,0035	+
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	50	11.500	0,0031	+
Bahan bakar Organik sederhana.				
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	36	20.000	0,016	0,82
Bensin (C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> )	53	17.000	0,017	0,82
Hexane (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	41	19.000	0,015	0,58
Heptane (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	42	19.000	0,021	0,34
Xylene (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	54	17.500	0,018	0,42
Acetone (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	49	11.000	0,0084	0,58
Dioxane (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	65	11.000	0,0037**	1,6**
Dethylether (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub> )	45	14.500	0,017	0,21
Produk Petroleum.				
Bensin	46	19.000	0,0098	1,1
Gasoline	46	19.000	0,011	0,064
Kerosene	51	18.500	0,008	1,1
JP-4	47	18.500	0,01	1,1
JP-5	51	18.500	0,011	0,49
Minyak Transformer, hydrocarbon	47	20.000	0,008*	0,21**
Bahan bakar minyak, berat	59 ~ 62	17.000	0,0072	0,52
Minyak mentah	52~55	18.000	0,0045~0,0092	0,85
Padat				
Polymethylmethacrylate (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	74	10.000	0,0041	1,0
Polypropylene (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	56	18.500	0,0037	
Polystyrene (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>	66	17.000	0,007	

\* Untuk bak pada tanah daratan, bukan di atas air.

\*\* Estimasi tidak pasti, karena hanya ada dua titik data.

+ Nilai tidak tergantung diameter pada rejim turbulen.

Tabel B.2(a) Laju pelepasan kalor satuan untuk berbagai komoditas

Komoditas	Btu/detik.ft <sup>2</sup> luas lantai
Palet kayu, ditumpuk setinggi 1½ ft (kelembaban 6 ~ 12%).	125
Palet kayu, ditumpuk setinggi 5 ft (kelembaban 6 ~ 12%).	350
Palet kayu, ditumpuk setinggi 10 ft (kelembaban 6 ~ 12%).	600
Palet kayu, ditumpuk setinggi 16 ft (kelembaban 6 ~ 12%).	900
Kantong surat, terisi, disimpan setinggi 5 ft .	35
Karton, terkompartmenten, ditumpuk setinggi 15 ft.	150
Baki surat, bahan PE, terisi, setinggi 5 ft pada kereta.	750
Tong sampah, bahan PE, dalam karton, ditumpuk setinggi 15ft.	175
<i>Shower stall</i> , bahan fiberglass PE, dalam karton, ditumpuk setinggi 15 ft.	125
Botol, bahan PE, disimpan dalam karton terkompartmenten.	550
Botol PE dalam karton, ditumpuk se tinggi 15 ft.	175
Papan isolasi, bahan PU, busa kaku, ditumpuk setinggi 15 ft.	170
Toples, bahan PS, dalam karton terkompartmenten.	1250
Bak, bahan PS, disusun dalam karton, ditumpuk setinggi 14ft.	475
Komponen mainan, bahan PS, dalam karton, ditumpuk setinggi 15 ft.	180
Papan isolasi, bahan PS, busa kaku, ditumpuk setinggi 14 ft.	290
Botol PVC, disimpan dalam karton terkompartmenten.	300
Bak, bahan PP, disimpan dalam karton terkompartmenten.	390
Gulungan film, bahan PP dan PE, ditumpuk setinggi 14 ft.	550
Metil alkohol.	65
Bensin	290
Minyak tanah	290
Minyak Diesel	175

**CATATAN** Laju pelepasan kalor per luas lantai dari bahan mudah terbakar yang sepenuhnya terlibat, didasarkan pada umpan balik radiatif yang dapat diabaikan dari sekelilingnya, dan efisiensi pembakaran 100%.

PE = Poli Etilen

PP = Poli Propilen

PS = Poli Stiren

PU = Poli Uretan

PV = Poli Vinil Klorida

### B.5.3 Data lain yang berguna

Data lain yang tidak dinormalisasikan mungkin berguna dalam pengembangan kurva laju pelepasan kalor. Beberapa contoh disertakan pada tabel B.3(a) sampai B.3(h).

Tabel B.2(b) Laju pelepasan kalor maksimum

Bahan dalam gudang	Waktu pertumbuhan (detik)	Densitas pelepasan kalor ( $q$ )	Klasifikasi (s – lambat) (m – sedang) (f – cepat)
Palet kayu, ditumpuk setinggi 1½ ft (kelembaban 6~12%).	150~310	110	m~f
Palet kayu, ditumpuk setinggi 5 ft (kelembaban 6~12%)	90~190	330	f
Palet kayu, ditumpuk setinggi 10 ft (kelembaban 6~12%).	80~110	600	f
Palet kayu, ditumpuk setinggi 16 ft (kelembaban 6~12%).	75~105	900	f
Kantong surat, terisi, disimpan setinggi 5 ft.	190	35	f
Karton, terkompartemen, ditumpuk setinggi 15 ft.	60	200	*
Kertas, gulungan vertikal, ditumpuk setinggi 20 ft.	15~28	--	*
Katun (juga PE, PE/katun, Akrilik/Nilon/PE), garmen, dalam rak setinggi 12 ft.	20~42	--	*
Karton pada palet, disimpan dalam rak setinggi 15~30ft.	40~280	--	m~f
Produk kertas, dipak padat dalam karton, disimpan dalam rak setinggi 20 ft.	470	--	m~s
Baki surat, bahan PE, terisi, ditumpuk setinggi 5 ft pada kereta.	190	750	f
Tong sampah, bahan PE, dalam karton ditumpuk setinggi 15 ft.	55	250	*
<i>Shower Stall</i> , bahan FRP, dalam karton, ditumpuk setinggi 15 ft.	85	110	*
Botol, bahan PE, dipak dalam karton terkompartemen.	85	550	*
Botol, bahan PE, dalam karton, ditumpuk setinggi 15 ft.	75	170	*
Palet PE, ditumpuk setinggi 3 ft.	130	--	f
Palet PE, ditumpuk setinggi 6~8 ft .	30~55	--	*
Matras, bahan PU, tunggal, horisontal.	110	--	f
Isolasi, bahan PF, papan, busa kaku, ditumpuk setinggi 15 ft.	8	170	*
Toples, bahan PS, dipak dalam karton terkompartemen.	55	1200	*
Bak, bahan PS, disusun dalam karton, ditumpuk setinggi 14 ft.	105	450	f
Komponen mainan, bahan PS, dalam karton, ditumpuk setinggi 15 ft	110	180	f
Papan isolasi, bahan PS, kaku, ditumpuk setinggi 14 ft	7	290	*
Botol, bahan PVC, dipak dalam karton terkompartemen.	9	300	*

Tabel B.2(b) (lanjutan)

Bahan dalam gudang	Waktu pertumbuhan (detik)	Densitas pelepasan kalor ( $q$ )	Klasifikasi (s – lambat) (m – sedang) (f – cepat)
Bak, bahan PP, dipak dalam karton terkompertemen.	10	390	*
Gulungan film, bahan PP dan PE, ditumpuk setinggi 14 ft.	40	350	*
Tong berisi minuman keras, ditumpuk setinggi 20 ft.	23~40	--	*
Metil alkohol	--	65	--
Bensin	--	200	--
Minyak tanah	--	200	--
Minyak Diesel.	--	180	--

Untuk unit SI, 1 ft = 0,305 m.

CATATAN

$$1. \quad Q_m = qA$$

di mana :

$Q_m$  = laju pelepasan kalor maksimum (Btu/detik)

$q$  = densitas pelepasan kalor.

$A$  = luas lantai (ft<sup>2</sup>).

2.

Laju pelepasan kalor per unit luas lantai adalah untuk bahan mudah terbakar yang sepenuhnya terlibat, dengan efisiensi pembakaran 100%. Waktu pertumbuhan yang ditunjukkan adalah yang dibutuhkan untuk laju pelepasan kalor lebih dari 1000 Btu/detik untuk kebakaran yang berkembang dengan asumsi efisiensi pembakaran 100%.

(PE = Poli Etilen; PS = Poli Stiren; PVC = Poli Vinil Klorida; PP = Poli Propilen; PU = Poli Uritan; FRP = Fibreglass Reinforced Polyester).

\* Laju pertumbuhan kebakaran melebihi klasifikasi kriteria .

Tabel B.3(a) Laju pelepasan kalor maksimum dari analisis Institut deteksi kebakaran

Komoditas	Nilai perkiraan (Btu/detik)
Keranjang sampah ukuran sedang dengan karton susu	100
Tong ukuran besar dengan karton susu.	140
Kursi dengan bahan busa Poliuretan	350
Matras dari busa Latex (panas pada pintu kamar).	1200
Ruang duduk dilengkapi perabot (panas pada pintu terbuka)	4.000 ~ 8.000

Tabel B.3(b) Karakteristik dari sumber penyalaan [3]

Sumber penyalaan	Keluaran kalor tipikal (W)	Waktu terbakar <sup>a</sup> (detik)	Ketinggian nyala maksimum (mm)	Lebar nyala (mm)	Fluks Kalor maksimum (kW/m <sup>2</sup> )
Rokok kering 1,1 g (tidak dihisap, diletakkan pada permukaan padat)	5	1200	--	--	42
Rokok 1,1 g (tidak dihisap, diletakkan pada permukaan padat) dikondisikan sampai kelembaban relatif 50%.	5	1200	--	--	35
Pil Methenamine 0,15 g	45	90	--	--	4
Korek api dari kayu (diletakkan pada permukaan padat)	80	20~30	30	14	18~20
Susunan kayu BS 5852, Bagian 2					
Susunan No.4, 8,5 g.	1.000	190			15 <sup>d</sup>
Susunan No.5, 17 g.	1.900	200			17 <sup>d</sup>
Susunan No.6, 60 g.	2.600	190			20 <sup>d</sup>
Susunan No.7, 126 g	6.400	350			25 <sup>d</sup>
Kantong kertas warna coklat yang diremas	1.200	80			
Kertas lilin yang diremas padat, 4,5g	1.800	25			
Kertas lilin yang diremas longgar, 4,5g	5.300	20			
Dua lembar koran dilipat, 22 g (penyalaan dari bawah)	4.000	100			
Dua lembar koran diremas, 22 g (penyalaan dari atas)	7.400	40			
Dua lembar koran diremas, 22 g (penyalaan dari bawah)	17.000	20			
Keranjang sampah Polyethylene, 285 g, diisi dengan 12 karton susu (390 g).	50.000	200 <sup>b</sup>	550	200	35 <sup>c</sup>
Kantong sampah plastik diisi dengan sampah cellulosic (1,2 ~ 14 kg) <sup>e</sup>	120.000 s/d 350.000	200 <sup>b</sup>			

Untuk Unit SI, 1 inch = 25,4 mm; 1 Btu/detik = 1,055 W; 1 Oz = 0,02835 kg = 28,35 g; 1 Btu/ft<sup>2</sup>.detik = 11,35 kW/m<sup>2</sup>.

<sup>a</sup> Jangka waktu untuk penyalaan yang signifikan.

<sup>b</sup> Waktu terbakar total lebih dari 1800 detik.

<sup>c</sup> Seperti ditunjukkan pada alat pembakar simulasi.

<sup>d</sup> Diukur dari jarak 25 mm.

<sup>e</sup> Hasilnya sangat bervariasi dengan densitas pengepakan

Tabel B.3(c) Karakteristik dari perabot tipikal sebagai sumber penyalaan [3]

	Massa total (kg)	Kandungan kalor total (MJ)	Laju pelepasan kalor maksimum (kW)	Radiasi termal maksimum ke pusat lantai <sup>a</sup> (kW/m <sup>2</sup> )
Keranjang berisi sampah kertas	0,73~1,04	0,7~7,3	4~18	0,1
gorden, beludru, katun	1,9	24	160~240	1,3~3,4
gorden, acrylic/katun	1,4	15~16	130~150	0,9~1,2
TV	27~33	145~150	120~290	0,3~2,6
Contoh kursi	1,36	21~22	63~66	0,4~0,5
Contoh sofa	2,8	42	130	0,9
Kursi berlengan	26	18	160	1,2
Pohon natal kering.	6,5~7,4	11~41	500~650	3,4~14

Untuk Unit SI, 1 lb = 0,4536 kg = 453,6 g ; 1 Btu = 1,055 x 10<sup>-3</sup> MJ; 1 Btu/detik = 1,055 kW; 1 Btu/ft<sup>2</sup>.detik = 11,35 kW/m<sup>2</sup>.

<sup>a</sup> Diukur pada kira-kira sejauh 2 m dari barang terbakar.

Tabel B.3(d) Laju pelepasan kalor dari kursi dalam uji NBS [3]

Spesimen	(kg)	Massa mudah terbakar (kg)	Corak	Rangka	Bahan pengisi	Kain pelapis	pelapis antara	Puncak m (g/detik)	Puncak q (kW)
C12	17,9	17,0	Kursi santai tradisional	Kayu	Katun	Nilon	--	19,0	290 <sup>a</sup>
F22	31,9		Kursi santai tradisional	Kayu	Katun (FR)	Katun	--	25,0	370
F23	31,2		Kursi santai tradisional	Kayu	Katun (FR)	Olefin	--	42,0	700
F27	29,0		Kursi santai tradisional	Kayu	Campuran	Katun	--	58,0	920
F28	29,2		Kursi santai tradisional	Kayu	Campuran	Katun	--	42,0	730
F25	27,8		Kursi santai tradisional	Kayu	PU	Olefin	--	80,0	1990
T66	23		Kursi santai tradisional	Kayu	PU, Polyester	Katun	--	27,7	640
F21	28,3		Kursi santai tradisional	Kayu	PU (FR)	Olefin	--	83,0	

Tabel B.3(d) (lanjutan)

Spesimen	(kg)	Massa mudah terbakar (kg)	Corak	Rangka	Bahan pengisi	Kain pelapis	pelapis antara	Puncak <i>m</i> (g/detik)	Puncak <i>q</i> (kW)
F24	28,3		Kursi santai tradisional	Kayu	PU (FR)	Katun	--	46,0	
C13	19,1	18,2	Kursi santai tradisional	Kayu	PU	Nylon	Neoprene	15,0	230 <sup>a</sup>
C14	21,8	20,9	Kursi santai tradisional	Kayu	PU	Olefin	Neoprene	13,7	220 <sup>a</sup>
C15	21,8	20,9	Kursi santai tradisional	Kayu	PU	Olefin	Neoprene	13,1	210 <sup>b</sup>
T49	15,7		Kursi santai	Kayu	PU	Katun	--	14,3	210
F26	19,2		Kursi santai tipis	Kayu	PU (FR)	Olefin	--	61,0	810
F33	39,2		<i>Loveseat Tradisional</i>	Kayu	Campuran	Katun	--	75,0	940
F31	40		<i>Loveseat Tradisional</i>	Kayu	PU (FR)	Olefin	--	130,0	2890
F32	51,5		Sofa Tradisional	Kayu	PU (FR)	Olefin	--	145,0	3120
T57	54,6		<i>Loveseat</i>	Kayu	PU, katun	PVC	--	61,9	1100
T56	11,2		Kursi kantor	Kayu	Latex	PVC	--	3,1	80
CO9/T64	16,6	16,2	Kursi blok busa	Kayu	PU, Polyester	PU	--	19,9	460
CO7/T48	11,4	11,2	Kursi santai modern	Busa PS	PU	PU	--	38,0	960
C10	12,1	8,6	<i>Pedestal chair</i>	Busa PU kaku	PU	PU	--	15,2	240 <sup>a</sup>
C11	14,3	14,3	Kursi blok busa	--	PU	Nylon	--	NA	810 <sup>b</sup>
F29	14,0		Kursi santai tradisional	Busa PP	PU	Olefin	--	72,0	1950
F30	25,2		Kursi santai tradisional	Busa PP kaku	PU	Olefin	--	41,0	1060
CO8	16,3	15,4	<i>Pedestal swivel chair</i>	PE dituang	PU	PVC	--	112,0	830 <sup>b</sup>
CO5	7,3	7,3	<i>Bean bag chair</i>	--	Polysterene	PVC	--	22,2	370 <sup>a</sup>
CO2	13,1	12,2	Kursi santai tradisional	Kayu	Katun PU	Olefin	--	13,2	800 <sup>b</sup>
CO3	13,6	12,7	Kursi santai tradisional	Kayu	Katun PU	Katun		17,5	460 <sup>a</sup>
CO1	12,6	11,7	Kursi santai tradisional	Kayu	Katun PU	Katun		17,5	260 <sup>a</sup>



Tabel B.3(d) (lanjutan)

Spesimen	(kg)	Massa mudah terbakar (kg)	Corak	Rangka	Bahan pengisi	Kain pelapis	pelapis antara	Puncak $m$ (g/detik)	Puncak $q$ (kW)
CO4	12,2	11,3	Kursi santai tradisional	Kayu	PU	Nylon		75,7	1350 <sup>b</sup>
C16	19,1	18,2	Kursi santai tradisional	Kayu	PU	Nylon		NA	180
CO6	20,4	20,4	Frameless foam back chair	--	PU	Acrylic	--	151,0	2480 <sup>b</sup>
T50	16,5		Kursi kamar tunggu	Metal	Katun	PVC	--	NA	<10
T53	15,5	1,9	Kursi kamar tunggu	Metal	PU	PVC	--	13,1	270
T54	27,3	5,8	Metal frame loveseat	Metal	PU	PVC	--	19,9	370
T75/F20	7,5(x4)	2,6	Kursi dapat disusun (4)	Metal	PU	PVC	--	7,2	160

Untuk Unit SI, 1 lb/detik = 0,4536 kg/detik = 453,6 g/detik.

1 lb = 0,4536 kg.

1 Btu/detik = 1,055 kW.

<sup>a</sup> Diperkirakan dari rekaman kehilangan massa dan asumsi nilai  $Wh_c$

<sup>b</sup> Diperkirakan dari konsentrasi gas di pintu.

**Tabel B.3(e) Pengaruh jenis kain pelapis pada laju pelepasan kalor dalam tabel B.3(d) (di dalam setiap kelompok ciri-ciri semua konstruksi lain dipertahankan konstan)**

Spesimen	$q_{maksimum}$ skala penuh (kW)	Bahan pengisi	Kain pelapis
	Kelompok 1		
F 24	700	Katun (750 g/m <sup>2</sup> )	Busa FR PU
F21	1970	Polyolefin (560 g/m <sup>2</sup> )	Busa FR PU
	Kelompok 2		
F22	370	Katun (750 g/m <sup>2</sup> )	cotton batting
F23	700	Polyolefin (560 g/m <sup>2</sup> )	cotton batting
	Kelompok 3		
28	760	tak satupun	Busa FR PU
17	530	Katun (650 g/m <sup>2</sup> )	Busa FR PU
21	900	Katun (110 g/m <sup>2</sup> )	Busa FR PU
14	1020	Polyolefin (650 g/m <sup>2</sup> )	Busa FR PU
7, 19	1340	Polyolefin (360 g/m <sup>2</sup> )	Busa FR PU

Untuk Unit SI, 1 lb/ft<sup>2</sup> = 48,83 g/m<sup>2</sup>

1 oz/ft<sup>2</sup> = 305 g/m<sup>2</sup>

1 Btu/detik = 1,055 kW

**Tabel B.3(f) Pengaruh jenis bahan pengisi pada laju pelepasan kalor dalam tabel B.3(d) (di dalam setiap kelompok ciri-ciri semua konstruksi lain dipertahankan konstan)**

Spesimen	$q_{maksimum}$ skala penuh (kW)	Bahan pengisi	Kain pelapis
Kelompok 1			
F 21	1970	Busa FR PU	Polyolefin (560 g/m <sup>2</sup> )
F23	1990	Busa NFR PU	Polyolefin (560 g/m <sup>2</sup> )
Kelompok 2			
F21	1970	Busa FR PU	Polyolefin (560 g/m <sup>2</sup> )
F23	700	Cotton batting	Polyolefin (560 g/m <sup>2</sup> )
Kelompok 3			
F24	700	Busa FR PU	Katun (750 g/m <sup>2</sup> )
F22	370	Cotton batting	Katun (750 g/m <sup>2</sup> )
Kelompok 4			
12, 27	1460	Busa NFR PU	Polyolefin (360 g/m <sup>2</sup> )
7, 19	1340	Busa FR PU	Polyolefin (360 g/m <sup>2</sup> )
15	120	Busa Neoprene	Polyolefin (360 g/m <sup>2</sup> )
Kelompok 5			
20	430	Busa NFR PU	Katun (650 g/m <sup>2</sup> )
17	530	Busa FR PU	Katun (650 g/m <sup>2</sup> )
22	0	Busa Neoprene	Katun (650 g/m <sup>2</sup> )

Untuk Unit SI, 1 lb/ft<sup>2</sup> = 48,83 g/m<sup>2</sup>

1 oz/ft<sup>2</sup> = 305 g/m<sup>2</sup>

1 Btu/detik = 1,055 kW

**Tabel B.3(g) Pengaruh bahan rangka untuk spesimen dengan bahan pengisi NFR PU dan kain pelapis Polyolefin [3]**

Spesimen	Massa (kg)	Puncak q (kW)	Rangka
F25	27,8	1990	Kayu
F30	25,2	1060	Polypropylene
F29	14,0	1950	Polypropylene

Untuk unit SI, 1 lb = 0,4536 kg

1 Btu/detik = 1,055 kW

Tabel B.3(h) Pertimbangan untuk memilih laju pelepasan kalor untuk perancangan

Kebakaran dengan laju pelepasan kalor konstan		
Industri [Theobald]	260 kW/m <sup>2</sup>	(kira-kira 26 Btu/detik.ft <sup>2</sup> )
Kantor (Law [16])	290 kW/m <sup>2</sup>	(kira-kira 29 Btu/detik.ft <sup>2</sup> )
Hotel (Hansell & Morgan [67])	249 kW/m <sup>2</sup>	(kira-kira 25 Btu/detik.ft <sup>2</sup> )
Kebakaran dengan laju pelepasan kalor variabel		
<b>NBSIR 88-3695</b> <b>Konfigurasi bahan bakar</b>	<b>Laju pertumbuhan kebakaran.</b>	
<i>Computer Workstation</i>		
Terbakar bebas	Lambat ~ cepat	
Berkompartemen	Sangat lambat	
Gudang dengan rak		
Terbakar bebas	Medium sampai dengan 200 detik, cepat setelah 200 detik.	
Modul kantor	Sangat lambat sampai dengan medium.	
<b>NISTIR 483</b> <b>Komoditas bahan bakar</b>	<b>Laju pelepasan kalor puncak (kW)</b>	
Computer Workstation	1000 ~ 1300	
<b>NBS Monograph 173</b> <b>Komoditas bahan bakar</b>	<b>Laju pelepasan kalor puncak (kW)</b>	
Kursi	80 ~ 2480 (<10, rangka metal)	
Sofa panjang ( <i>love seat</i> )	940 ~ 2890 (370, rangka metal)	
Sofa	3120	

## B.6 Deskripsi kebakaran yang dihitung didasarkan atas sifat-sifat yang diuji

### B.6.1 Latar belakang

Dimungkinkan untuk membuat perkiraan umum laju pelepasan kalor dari material yang terbakar didasarkan pada sifat pembakaran material tersebut. Keterlibatan sifat pembakaran terkait dapat ditentukan dengan pengujian dalam skala kecil.

Bagian terpenting dari pengujian ini adalah pengujian kalorimeter yang melibatkan baik kalorimetri pengurangan oksigen, maupun aplikasi fluks kalor eksternal ke contoh uji material bersamaan dengan penentuan waktu penyalaan, laju pelepasan massa, dan laju pelepasan kalor untuk fluks yang spesifik dipakai.

Alat pengujian yang saat ini paling terkenal adalah kalorimeter kerucut ( *ASTM E 1354, Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter* ) dan kalorimeter *Factory Mutual* [80].

Sebagai tambahan terhadap sifat-sifat yang diukur secara langsung dimungkinkan untuk memperoleh temperatur penyalaan, fluks penyalaan kritis, inersia termal efektif, kalor pembakaran dan kalor pembentukan gas yang didasarkan atas hasil-hasil dari kalorimeter tersebut.

Sifat-sifat yang tidak dapat diperoleh dari kalorimeter ini dan penting untuk menentukan penyebaran nyala api ke arah yang tidak sama dengan aliran nyala api, dapat diperoleh dari peranti LIFT (lateral ignition and flame travel) (lihat ASTM E 1321, *Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties* ).

Bagian ini menyajikan suatu konsep penggunaan data uji sifat pembakaran sebagai dasar dari suatu evaluasi analitik laju pelepasan kalor yang terjadi dalam penggunaan material yang diuji. Pendekatan yang dituangkan dalam bagian ini didasarkan pada tulisan dari Nelson dan Forssell [1994].

**B.6.2 Diskusi tentang sifat-sifat yang diukur**

Tabel B.4 menyajikan daftar jenis sifat-sifat pembakaran yang dapat diperoleh dari kalorimeter kerucut atau kalorimeter Factory Mutual dan instrumen yang sejenis.

Pada tabel B.4 laju pelepasan kalor ( *RHR : Rate of Heat Release* ), kehilangan massa, dan waktu penyalaan adalah fungsi dari fluks radiasi panas eksternal yang diterima oleh contoh uji. Tujuan dari penggunaan fluks eksternal adalah untuk mensimulasikan lingkungan kebakaran yang mengelilingi suatu benda yang terbakar.

Secara umum, dapat diperkirakan suatu paket bahan bakar yang terbakar bebas (misal sesuatu yang terbakar di tempat terbuka dan tidak dipengaruhi oleh umpan balik energi dari lapisan gas panas suatu sumber kalor selain dari nyalanya sendiri) dipengaruhi oleh suatu fluks dalam rentang nilai 25 kW/m<sup>2</sup> sampai 50 kW/m<sup>2</sup>.

**Tabel B.4 Hubungan antara sifat-sifat yang diukur dengan kalorimeter terhadap analisis kebakaran**

Sifat	Penyalaan	Penyebaran nyala api	Ukuran kebakaran (energi)
Laju pelepasan kalor*		XXX	XXX
Kehilangan massa*			XXX
Waktu penyalaan*	XXX	XXX	
Sifat-sifat efektif termal+	XXX	XXX	
Kalor pembakaran+		XXX	XXX
Kalor penimbunan gas+			XXX
Fluks penyalaan kritis+	XXX	XXX	
Temperatur penyalaan+	XXX	XXX	

\* Sifat adalah fungsi dari fluks eksternal yang diterima.

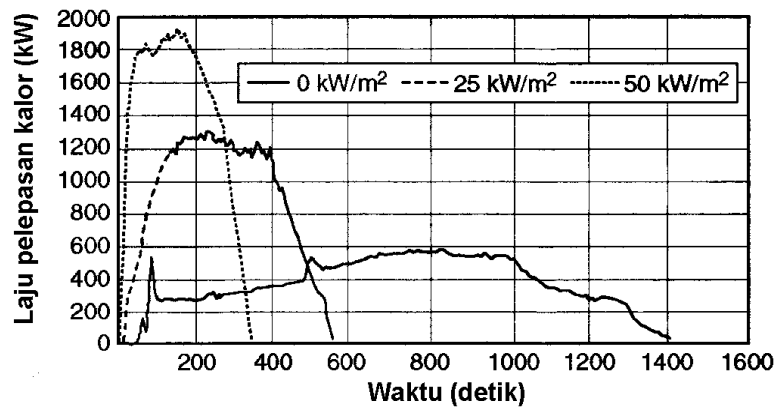
+ Sifat-sifat yang diturunkan dari pengukuran-pengukuran dengan kalorimeter.

Jika kebakaran ada di dalam suatu ruangan dan kondisinya mendekati penyalaan serentak (*flashover*), fluks akan bertambah ke rentang 50 kW/m<sup>2</sup> sampai 75 kW/m<sup>2</sup>. Dalam kebakaran yang berkembang penuh pasca penyalaan serentak (*flashover*), suatu rentang dari 75 kW/m<sup>2</sup> sampai 100 kW/m<sup>2</sup> dapat diharapkan.

Berikut ini adalah suatu diskusi masing-masing sifat yang diukur atau diturunkan dan bentuk umum yang digunakan untuk melaporkan sifat tersebut.

**(a) Laju pelepasan kalor**

Laju pelepasan kalor ditentukan dengan kalorimetri pengurangan oksigen. Setiap pengujian dilakukan pada fluks datang yang ditentukan oleh penguji dan untuk perioda waktu yang ditentukan sebelumnya atau sampai contoh bahan habis terbakar. Hasil lengkap disajikan dalam bentuk kurva laju pelepasan kalor terhadap waktu, dengan dicatat tingkat fluks yang digunakan. Dalam beberapa kasus, laju pelepasan kalor untuk beberapa pengujian dari material yang sama pada tingkat-tingkat yang berbeda dari fluks yang digunakan digambar pada satu gambar untuk perbandingan. Gambar B.6.2(a) adalah contoh penggambaran yang demikian.



**Gambar B.1** Grafik keluaran tipikal hasil uji dengan kalorimeter kerucut

Seringkali hanya puncak laju pelepasan kalor pada fluks spesifik yang dilaporkan. Tabel B.5(a) adalah suatu contoh.

**Tabel B.5(a)** Rata-rata maksimum laju pelepasan kalor (kW/m<sup>2</sup>)

Material	Orientasi	2,2 Btu/det/ft <sup>2</sup>	4,4 Btu/det/ft <sup>2</sup>	6,6 Btu/det/ft <sup>2</sup>
		<i>Exposing Flux</i>	<i>Exposing Flux</i>	<i>Exposing</i>
PMMA	Horisontal	57	79	114
	Vertikal	49	63	114
Cemara	Horisontal	12	21	23
	Vertikal	11	15	56
Contoh A	Horisontal	11	18	22
	Vertikal	8	11	19
Contoh B	Horisontal	12	15	21
	Vertikal	5,3	18	29
Contoh C	Horisontal		19	22
	Vertikal		15	15
Contoh D	Horisontal	6,2	13	13
	Vertikal		11	11

**(b) Laju kehilangan massa (m)**

Laju kehilangan massa ditentukan dengan suatu timbangan sel beban. Metoda pelaporannya identik dengan metoda untuk laju pelepasan kalor. Pada situasi yang tipikal di mana material mempunyai kalor pembakaran yang konsisten, kurva laju kehilangan massa dan laju pelepasan kalor sama bentuknya.

**(c) Waktu penyalaan (q<sub>i</sub>)**

Waktu penyalaan dilaporkan untuk setiap masing-masing pengujian dan tingkat fluks yang dipakai.

**(d) Inersia termal efektif (k<sub>pc</sub>)**

Inersia termal efektif adalah suatu pengukuran respon kenaikan panas dari material yang diuji terhadap fluks kalor yang dikenakan kepada contoh uji. Ini diturunkan dari waktu penyalaan dan didasarkan kepada rasio fluks sebenarnya yang datang terhadap fluks penyalaan kritis dan waktu penyalaan. Sejumlah pengujian yang berturutan pada berbagai tingkat fluks yang dipakai diperlukan untuk menurunkan inersia termal efektif.

Inersia termal efektif yang diturunkan dengan cara ini dapat berbeda dan lebih disukai daripada yang diturunkan dengan menggunakan data *handbook* untuk nilai dari  $k$ ,  $\rho$ , dan  $c$  yang diturunkan tanpa sebuah kebakaran.

**(e) Kalor pembakaran ( $H_c$ )**

Kalor pembakaran diturunkan dengan membagi laju pelepasan kalor terukur dengan laju kehilangan massa terukur. Biasanya dilaporkan sebagai sebuah nilai tunggal, kecuali bila contoh uji adalah material komposit dan laju pelepasan kalor dan kehilangan massa bervariasi secara signifikan terhadap waktu dan *exposure*.

**(f) Kalor pembangkitan gas ( $h_g$ )**

Kalor pembangkitan gas adalah fluks yang dibutuhkan untuk penguraian suatu unit massa dari bahan bakar. Besaran ini diturunkan sebagai suatu keseimbangan kalor dan biasanya dilaporkan sebagai sebuah nilai tunggal dalam bentuk jumlah energi per unit massa dari material yang diuraikan (dengan satuan: kJ/g).

**(g) Fluks penyalan kritis ( $q_{cr}$ )**

Fluks penyalan kritis adalah tingkat minimum dari fluks yang datang ke contoh uji yang diperlukan untuk menyalakan contoh uji tersebut, dengan waktu aplikasi yang tidak terbatas. Pada tingkat fluks yang datang kurang dari fluks penyalan kritis, penyalan tidak terjadi.

**(h) Temperatur penyalan ( $T_i$ )**

Temperatur penyalan adalah temperatur permukaan dari contoh uji pada saat penyalan terjadi. Ini adalah suatu nilai contoh uji yang bebas dari fluks yang datang. Ini dapat diturunkan dari pengujian dengan kalorimeter, pengujian dengan perangkat lif, maupun pengujian-pengujian yang lain. Besaran ini diturunkan dari waktu penyalan dalam suatu pengujian, fluks yang digunakan pada pengujian itu, dan inersia termal efektif dari contoh uji tersebut. Ini dilaporkan pada suatu temperatur tunggal.

Jika pengujian menggunakan suatu nyala api pemandu (*pilot flame*) atau percikan api, temperatur yang dilaporkan adalah untuk penyalan yang dipandu; jika tidak ada nyala api pemandu, temperatur adalah untuk penyalan sendiri. Sebagian besar data yang tersedia adalah untuk penyalan dengan api pemandu.

### B.6.3 Penyalan

Rumus untuk waktu untuk penyalan,  $t_{ig}$ , diberikan untuk material tipis dan material tebal secara termal, sebagaimana didefinisikan pada butir B.6.3(a) dan (b). Untuk material yang cukup tebal, estimasi untuk  $t_{ig}$  memerlukan pertimbangan di luar lingkup dari penyajian ini [Drysdale 1985, Carslaw & Jaeger 1959].

**(a) Material tipis secara termal**

Berkaitan pada penyalan dari suatu fluks kalor konstan yang datang,  $q_i$ , pada permukaan yang terekspos dan dengan kehilangan kalor yang relatif kecil pada permukaan yang tidak terekspos, suatu material tipis secara termal adalah suatu material yang temperaturnya relatif merata di dalam keseluruhan dari ketebalannya,  $l$ , pada  $t = t_{ig}$ . Sebagai contoh, pada  $t = t_{ig}$ ,

$$T_{\text{terekspos}} - T_{\text{takterekspos}} = T_{ig} - T_{\text{takterekspos}} < 0,1(T_{ig} - T_0) \quad (\text{B.4})$$

Rumus (B.4) dapat digunakan untuk menunjukkan bahwa suatu material adalah tipis secara termal [Carslaw & Jaeger 1959] bila,

$$l < 0,6(t_{ig}^{\prime\prime})^{1/2} \quad (\text{B.5})$$

Sebagai contoh, untuk lembaran kayu maple atau kayu ek (di mana difusitas termal  $\alpha = 1.28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$  [Kanury 1995], jika  $t_{ig} = 35$  detik diukur pada uji penyalaan dipandu, maka, sesuai dengan rumus (B.5), bila tebal contoh uji kurang dari 0.0013 m, permukaan contoh uji yang tidak terekspos dapat diharapkan untuk mendekati nilai  $T_{ig}$  pada saat penyalaan, dan contoh uji itu dapat dianggap sebagai tipis secara termal. Waktu penyalaan dari material yang tipis secara termal yang dikenai fluks datang di mana nilainya di atas fluks datang kritikal, adalah

$$t_{ig} = \rho c l \frac{(T_{ig} - T_0)}{q_i} \quad (\text{B.6})$$

**(b) Material tebal secara termal**

Berkaitan kepada tipe uji penyalaan yang dijelaskan pada B.6.3(a), suatu contoh uji yang mempunyai tebal,  $l$ , dianggap sebagai material tebal secara termal jika kenaikan temperatur dari permukaan yang tidak terekspos adalah relatif kecil dibandingkan dengan permukaan yang terekspos pada  $t = t_{ig}$ . Sebagai contoh, pada  $t = t_{ig}$ ,

$$T_{\text{takterekspos}} BT_0 < 0,1 (T_{\text{terekspos}} BT_0) = 0,1 (T_{ig} BT_0) \quad (\text{B.7})$$

Rumus (B.7) dapat digunakan untuk menunjukkan bahwa suatu material adalah tebal secara termal [Carslaw & Jaeger 1959] bila,

$$l > 2(t_{ig} 10)^{1/2} \quad (\text{B.8})$$

Sebagai contoh, sesuai dengan rumus (B.8), dalam suatu uji penyalaan atas selembar kayu maple atau kayu eik, jika  $t_{ig} = 35$  detik diukur pada contoh uji penyalaan terpandu, maka bila tebal contoh uji lebih besar dari 0.0042 m, permukaan yang tidak terekspos dari contoh uji tersebut dapat diharapkan relatif dekat dengan  $T_0$  pada  $t = t_{ig}$  dan contoh uji itu dapat dianggap sebagai tebal secara termal.

Waktu penyalaan dari material yang tebal secara termal yang dikenai fluks datang di mana nilainya di atas fluks datang kritikal, adalah

$$t_{ig} = \left(\frac{B}{4}\right) k \rho c \left(\frac{T_{ig} BT_0}{q_i}\right)^2 \quad (\text{B.9})$$

Harus diperhatikan bahwa suatu material tertentu pada hakekatnya bukan tipis atau tebal secara termal (maksudnya, karakteristik tipis-tebalnya secara termal bukanlah karakteristik atau sifat suatu material) tetapi tergantung juga pada ketebalan dari material khusus tersebut (jelasnya, suatu material khusus dapat diterapkan pada baik konfigurasi tipis atau tebal secara termal).

**(c) Perambatan antar paket bahan bakar terpisah**

Bila perhatian kita adalah untuk perambatan antar paket bahan bakar individu yang terpisah, fluks datang dapat dihitung dengan menggunakan prosedur perpindahan kalor radiasi tradisional [Tien et al 1995].

Laju perpindahan kalor radiasi dari paket bahan bakar yang menyala dengan laju pelepasan energi total,  $Q$ , ke elemen permukaan dari suatu paket bahan bakar terekspos yang menghadap nyala api dapat dihitung dari :

$$q_{inc}'' = \frac{X_r Q}{4\pi r^2} \quad (\text{B.10})$$

di mana:

- $q_{inc}''$  = fluks datang pada bahan bakar terekspos
- $X_r$  = fraksi radian nyala api
- $Q$  = laju pelepasan kalor nyala api
- $r$  = jarak radial dari pusat nyala api ke bahan bakar terekspos

#### B.6.4 Estimasi laju pelepasan kalor

Seperti telah didiskusikan pada B.6.2, pengujian telah menunjukkan bahwa umpan balik energi dari suatu paket bahan bakar terbakar mempunyai rentang nilai antara sekitar 25 kW/m<sup>2</sup> sampai 50 kW/m<sup>2</sup>. Untuk suatu analisis konservatif yang wajar, direkomendasikan untuk menggunakan data uji yang dikembangkan dengan suatu fluks datang 50 kW/m<sup>2</sup>. Untuk suatu pendekatan orde satu, harus diasumsikan bahwa seluruh permukaan yang secara serentak dapat terbakar melepaskan energi pada laju pelepasan setara dengan yang ditentukan dengan pengujian material di dalam suatu kalorimeter sifat pembakaran dengan suatu fluks datang 50 kW/m<sup>2</sup> untuk suatu paket bahan bakar yang terbakar bebas dan 75 kW/m<sup>2</sup> sampai 100 kW/m<sup>2</sup> untuk kondisi pasca penyalaan serentak (*flashover*).

Dalam membuat estimasi ini, perlu diasumsikan bahwa seluruh permukaan, yang terekspos nyala api [atau gas super panas, pada kondisi pasca penyalaan serempak (*flashover*)], terbakar dan melepas energi dan massa pada laju yang diuji. Jika tersedia udara yang cukup, maka estimasi laju pelepasan kalor kemudian dihitung sebagai hasil perkalian dari luas terekspos dan laju pelepasan kalor per unit luas yang ditentukan dalam kalorimeter uji.

Bila terdapat data hasil pengujian yang diambil pada fluks datang dari nyala api, laju pelepasan kalor pengujian harus digunakan. Bila data hasil pengujian adalah untuk suatu fluks datang yang lain, laju pembakaran harus diestimasi menggunakan kalor pembentukan gas seperti ditunjukkan pada rumus (B.11) untuk menghitung laju pembakaran massa per unit luas

$$\dot{m}'' = \frac{q_i''}{h_c} \quad (B.11)$$

Hasil laju kehilangan massa kemudian dikalikan dengan kalor pembakaran efektif yang diturunkan dan luas terbakar terekspos ke fluks datang untuk memperoleh laju pelepasan kalor yang diestimasi sebagai berikut :

$$\dot{Q}_i = \dot{m}'' h_c A \quad (B.12)$$

#### B.6.5 Perambatan nyala api (*Flame spread*)

Jika diinginkan untuk memprediksi pertumbuhan kebakaran ketika merambat di atas permukaan yang dapat terbakar, perlu mengestimasi perambatan nyala api (*flame spread*). Penghitungan laju penyebaran nyala api adalah suatu teknologi baru yang masih dalam tahap embrio. Prediksi harus dipertimbangkan sebagai estimasi dalam skala besaran (*order of magnitude*) yang sangat besar.

Perambatan nyala api adalah gerakan dari bidang depan nyala api sepanjang permukaan material yang terbakar (atau yang terekspos ke suatu nyala api) di mana permukaan yang terekspos belum seluruhnya terbakar. Secara fisik, perambatan nyala api dapat diperlakukan sebagai penerus penyalaan yang dihasilkan dari enersi kalor yang diproduksi oleh bagian material yang membara, lidah apinya, dan berbagai enersi mendadak lainnya yang muncul di atas bagian permukaan yang tidak terbakar.



Sumber lain dari enersi dadakan yang mencakup obyek lain yang menyala, gas dengan temperatur tinggi dapat mengumpul di bagian atas suatu ruangan terkurung, dan sumber kalor radiasi digunakan dalam suatu alat uji seperti kalorimeter kerucut atau LIFT. Untuk tujuan analisis, perambatan lidah api dapat dibagi ke dalam dua kategori, yang bergerak searah dengan gerak lidah api, (bersama-sama atau perambatan karena aliran angin) dan yang bergerak dalam berbagai arah (lateral atau melawan perambatan lidah api).

Perambatan nyala api bersama-sama dibantu oleh kalor fluks sesaat dari lidah api ke bagian yang tidak ternyalakan dari material yang sedang terbakar. Perambatan lidah api lateral tidaklah terbantu dan cenderung lebih perlahan dalam penyebaran jika tidak ada sumber luar kalor fluks.

Perambatan nyala api bersama-sama dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V = \frac{\dot{q}_i L}{k\rho c(T_{ig} - T_s)^2} \quad (\text{B.13})$$

Harga dari  $k\rho c$  dan temperatur penyalaan dihitung dari kalorimeter kerucut seperti didiskusikan sebelum ini. Untuk rumus ini, lebar lidah api ( $L$ ) diukur dari ujung depan daerah yang menyala.



## Lampiran C Api $t$ -kuadrat

Lampiran ini bukan merupakan bagian dari rekomendasi dari dokumen ini tetapi dimasukkan untuk informasi penggunaan saja.

**C.1** Sepanjang dekade terakhir, orang yang tertarik dalam mengembangkan deskripsi generik untuk nilai pelepasan panas dari nyala api terbuka secara kebetulan telah menggunakan suatu taksiran " $t$ -kuadrat" untuk pemakaian ini. Sebuah api  $t$ -kuadrat adalah sebuah api dimana nilai pembakarannya berubah secara proporsional terhadap kwadrat waktu. Seringkali, api  $t$ -kuadrat dibagi dalam kelas berdasarkan kecepatan tumbuhnya, disebut cepat, medium, dan lambat (dan kadang-kadang ultra-cepat). Bilamana kelas-kelas ini dipakai, kelas-kelas ini di definisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk api tumbuh ke nilai pelepasan panas dari 1000 Btu/detik (1055 kW). Waktu-waktu yang berhubungan ke setiap kelas adalah sebagai berikut:

**Tabel C.1 Kelas dan waktu untuk mencapai 1000 Btu/detik**

Kelas	Waktu untuk mencapai 1000 Btu/detik (1055 kW)
Ultra-cepat	75 detik
Cepat	150 detik
Medium	300 detik
Lambat	600 detik

Persamaan umumnya adalah:

$$q = at^2$$

dimana:

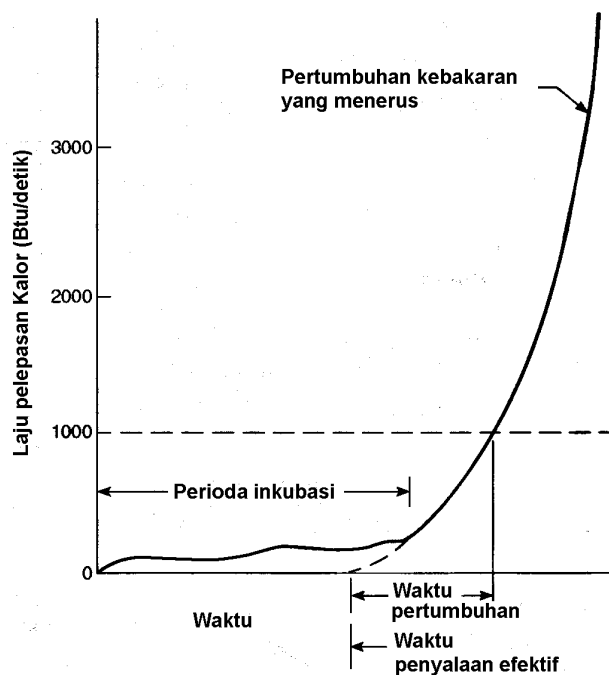
$q$  = nilai pelepasan panas (biasanya dalam Btu/detik atau kW)

$a$  = sebuah konstanta yang menentukan kecepatan tumbuh

$t$  = waktu (biasanya dalam detik)

## **C.2 Relevansi dari taksiran $t$ -kuadrat kepada api yang riil**

Sebuah api  $t$ -kuadrat dapat dipandang sebagai sebuah api dimana nilai pelepasan panas per unit luas adalah tetap di atas semua permukaan yang terbakar dan api menjalar seperti suatu lingkaran dengan radius yang membesar secara tetap. Dalam kasus-kasus serupa itu, luas daerah terbakar bertambah sebagai kuadrat dari radius yang membesar secara tetap. Tentu saja, api-api lain yang tidak mempunyai susunan bahan bakar reguler dengan baik sekali serupa itu dan nilai pembakaran konsisten sebetulnya dapat atau tidak dapat menghasilkan sebuah kurva  $t$ -kuadrat.

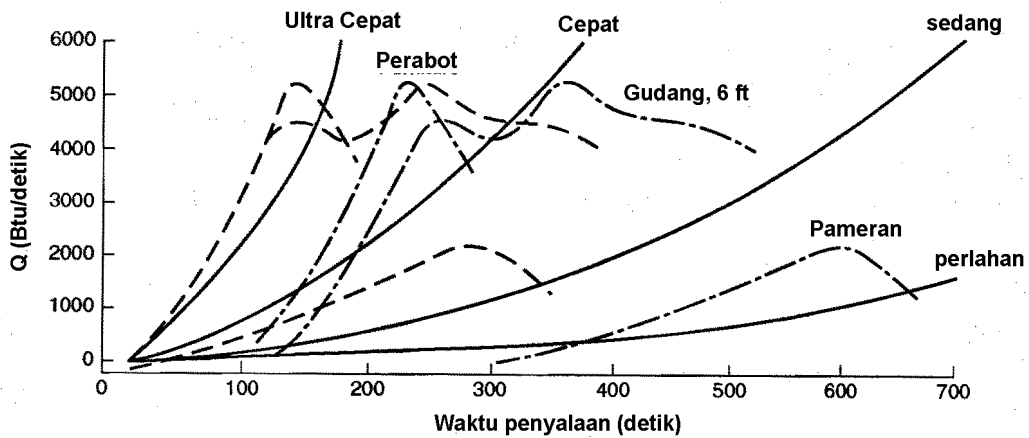


**Gambar C.1(a) Ilustrasi konseptual dari pertumbuhan kebakaran yang menerus**

Gambar C.1 diambil dari NFPA 204, *Guide For Smoke and Heat Venting*. Ditampilkan untuk mendemonstrasikan bahwa sebagian besar kebakaran mempunyai periode inkubasi dimana kebakaran tersebut tidak mengikuti suatu aproksimasi  $t$ -kuadrat. Pada beberapa kasus periode inkubasi ini dapat menjadi halangan serius kepada penggunaan aproksimasi  $t$ -kuadrat. Dalam beberapa kejadian hal ini bukan merupakan pertimbangan serius didalam sebuah atria atau ruangan berukuran besar. lainnya yang dibicarakan dalam pedoman ini. Diharapkan bahwa laju pelepasan kalor selama periode inkubasi biasanya tidak akan cukup untuk pengaktifan dari sistem deteksi asap. Bagaimanapun juga bila pengaktifan seperti itu terjadi atau observasi penghuni mengakibatkan pengaktifan awal dari sistem manajemen asap, akan menghasilkan suatu usaha perlindungan yang kebetulan.

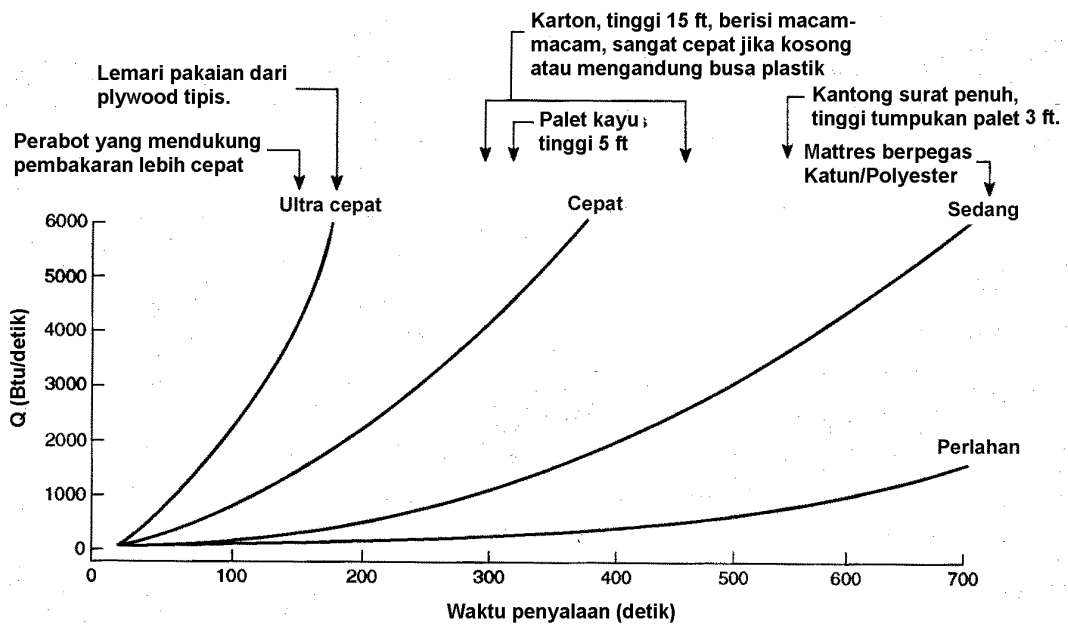
Gambar C.1(b), diambil dari Nelson [1987, membandingkan kurva laju pelepasan kalor yang dikembangkan oleh kelas-kelas kebakaran  $t$ -kuadrat tersebut diatas dan dua kebakaran uji yang biasa digunakan untuk pengujian. Kurva kebakaran uji ditunjukkan oleh garis putus-putus dengan label furnitur dan penyimpanan setinggi 6 ft (*furniture and 6-ft storage*). Garis putus-putus yang jauh dari titik awal menunjukkan laju pelepasan kalor actual dari kebakaran uji yang digunakan dalam pengembangan dari springkler untuk perumahan dan suatu susunan karton standar uji coba setinggi 6-ft berisi ember plastik busa yang juga sering digunakan sebagai suatu kebakaran uji standar.

Set garis putus-putus lainnya di dalam gambar C.1(b) menunjukkan kurva yang sama dipindahkan ke titik awal dari grafik. Perbandingan dengan kurva generik menjadi lebih sesuai. Seperti dapat dilihat, laju pertumbuhan dari kebakaran tersebut sebenarnya lebih cepat dari yang didefinisikan untuk suatu kebakaran *ultra-fast*. Sesuai untuk suatu kebakaran uji yang dirancang untuk menguji sistem pemadaman kebakaran yang sedang diuji.



Gambar C.1(b) Kebakaran t-kuadrat, laju pelepasan energi

Gambar C.1(c) menghubungkan kurva laju pertumbuhan kelas kebakaran t-kuadrat ke suatu seleksi dari susunan bahan bakar actual yang diambil dari NFPA 204, *Guide For Smoke and Heat Venting*. Susunan individual juga dijelaskan dalam lampiran B.



Gambar C.1(c) Hubungan kebakaran t-kuadrat, laju pelepasan energi

## Lampiran D Rumus dalam pasal 7 dengan satuan SI

Appendiks ini bukan merupakan standar melainkan hanya dimaksudkan sebagai informasi untuk membantu penggunaan rumus-rumus dengan satuan SI.

### Rumus (1)

$$R = \left( \frac{Q}{12\pi q''} \right)^{1/2}$$

### Rumus (2)

$$Q = 1000 \left( \frac{t}{t_g} \right)^2$$

di mana:

- $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran [kW]  
 $t$  = jangka waktu setelah penyalaan efektif [detik]  
 $t_g$  = waktu pertumbuhan kebakaran [detik]

### Rumus (3)

$$\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left( \frac{tQ^{1/3} / H^{4/3}}{A / H^2} \right)$$

di mana:

- $z$  = ketinggian indikasi pertama asap di atas permukaan kebakaran [m]  
 $H$  = ketinggian langit-langit di atas permukaan kebakaran [m]  
 $t$  = waktu [detik]  
 $Q$  = laju pelepasan kalor dari kebakaran konstan [kW]  
 $A$  = luas penampang daerah yang berisi asap [m<sup>2</sup>]

### Rumus (4)

$$\frac{z}{H} = 0,91 \left( \frac{t}{t_g^{2/5} H^{4/5} (A / H^2)^{3/5}} \right)^{-1,45}$$

di mana:

- $z$  = ketinggian indikasi pertama asap di atas permukaan kebakaran [m]  
 $H$  = ketinggian langit-langit di atas permukaan kebakaran [m]  
 $t$  = waktu [detik]  
 $Q$  = laju pelepasan kalor dari kebakaran konstan [kW]  
 $A$  = luas penampang daerah yang berisi asap [m<sup>2</sup>]  
 $t_g$  = waktu pertumbuhan kebakaran [detik]

**Rumus (5)**

$$m = \frac{Q\Delta t}{H_c}$$

di mana:

- $m$  = jumlah bahan bakar yang terbakar [kg]
- $Q$  = laju pelepasan kalor kebakaran [kW]
- $\Delta t$  = jangka waktu kebakaran [detik]
- $H_c$  = kalor pembakaran bahan bakar [kJ/kg]

**Rumus (6)**

$$m = \frac{333\Delta t^3}{H_c t_g^2}$$

di mana:

- $m$  = jumlah bahan bakar yang terbakar [kg]
- $Q$  = laju pelepasan kalor dari kebakaran konstan [kW]
- $A$  = luas penampang daerah yang berisi asap [m<sup>2</sup>]
- $t_g$  = waktu pertumbuhan kebakaran [detik]
- $\Delta t$  = jangka waktu kebakaran [detik]
- $H_c$  = kalor pembakaran bahan bakar [kJ/kg]

**Rumus (7)**

$$z_l = 0,166Q_c^{2/5}$$

di mana:

- $z_l$  = batas ketinggian nyala api [m]
- $Q_c$  = porsi konvektif dari laju pelepasan kalor [kW]

**Rumus (8)**

$$m = 0,071Q_c^{1/3} z^{5/3} + 0,0018Q_c \quad (z > z_l)$$

**Rumus (9)**

$$m = 0,032Q_c^{3/5} z \quad (z \leq z_l)$$

lihat persamaan (8) untuk keterangannya.

**Rumus (10)**

$$m = 0,36(QW^2)^{1/3} (Z_b + 0,25H)$$

di mana:

- $m$  = laju aliran massa di dalam cendawan asap [kg/detik]
- $Q$  = laju pelepasan kalor [kW]
- $W$  = lebar cendawan asap pada waktu meluap di bawah balkon [m]
- $Z_b$  = ketinggian di atas balkon [m]
- $H$  = ketinggian balkon di atas bahan bakar [m]

**Rumus (12)**

$$Q = 1260A_w H_w^{1/2}$$

di mana:

$Q$  = laju pelepasan kalor [kW]

$A_w$  = luas bukaan ventilasi [m<sup>2</sup>]

$H_w$  = ketinggian bukaan ventilasi [m]

**Rumus (13)**

$$a = 2,40A_w^{2/5} H_w^{1/5} - 2,1H_w$$

di mana:

$a$  = ketinggian efektif [m]

$A_w$  = luas bukaan ventilasi [m<sup>2</sup>]

$H_w$  = ketinggian bukaan ventilasi [m]

**Rumus (14)**

$$m = 0,071Q_c^{1/3} (z_w + a)^{5/3} + 0,0018Q_c$$

di mana

$m$  = laju aliran massa dalam cendawan pada ketinggian  $z_w$  [kg/detik]

$Q_c$  = porsi konvektif dari laju pelepasan kalor kebakaran [kW]

$z_w$  = tinggi di atas puncak jendela [m]

**Rumus (15)**

$$m = 0,68(A_w H_w^{1/2})^{1/3} (z_w + a)^{5/3} + 1,59A_w H_w^{1/2}$$

di mana

$m$  = laju aliran massa dalam cendawan pada ketinggian  $z_w$  [kg/detik]

$A_w$  = luas bukaan ventilasi [m<sup>2</sup>]

$H_w$  = ketinggian bukaan ventilasi [m]

$z_w$  = tinggi di atas puncak jendela [m]

$a$  = ketinggian efektif [m]

**Rumus (16)**

$$d = K_d z$$

di mana

$d$  = diameter cendawan asap [m]

$z$  = tinggi [m]

$K_d$  = konstanta diameter (lihat nomor 3.8.4)

**Rumus (22)**

$$v = \frac{m}{\rho}$$

di mana

- $v$  = laju volumetrik produksi asap [m<sup>3</sup>/detik]
- $\rho$  = densitas asap [1,2 kg/m<sup>3</sup> pada 20 °C]

**Rumus (23)**

$$v = 0,64 \left[ gH(T_f - T_0) / T_f \right]^{1/2}$$

di mana

- $v$  = kecepatan udara [m/detik]
- $g$  = akselerasi gravitasi [9,8 m/detik<sup>2</sup>]
- $H$  = tinggi bukaan [m]
- $T_f$  = temperatur asap panas [°C]
- $T_g$  = temperatur udara ambien [°C]

**Rumus (24)**

$$v_e = 0,057 [Q / z]^{1/3}$$

di mana

- $v_e$  = kecepatan udara [m/detik]
- $Q$  = laju pelepasan kalor [kW]
- $z$  = jarak dari dasar kebakaran ke bagian bawah bukaan [m]



## Lampiran E Contoh soal untuk penggunaan rumus

Lampiran ini bukan merupakan standar melainkan hanya dimaksudkan sebagai informasi untuk membantu penggunaan rumus-rumus.

### E.1 Data soal

Diketahui sebuah Atrium dengan penampang segi empat yang seragam.

Tinggi 120 ft  
Luas 20.000 ft<sup>2</sup>  
 $A/H^2$  1,4

Kebakaran rancangan (*steady state*) 5000 Btu/detik  
Permukaan untuk pejalan kaki tertinggi 94 ft.

#### E.1.1 Soal 1

Tentukan waktu saat indikasi pertama asap berada pada ketinggian 6 ft di atas permukaan pejalan kaki tertinggi.

Solusi.

##### (a) Gunakan rumus (3)

$$\frac{z}{H} = 0,67 - 0,28 \ln \left( \frac{tQ^{1/3} / H^{4/3}}{A/H^2} \right)$$

$z$  100 ft  
 $H$  120 ft  
 $Q$  5000 Btu/detik  
 $Q^{1/3}$  17,1  
 $H^{4/3}$  591,9  
 $A/H^2$  1,4

$$0,83 = 0,67 - 0,28 \ln \left( \frac{17,1t / 591,9}{1,4} \right)$$

$$0,16 = -0,28 \ln \left( \frac{0,034t}{1,39} \right)$$

$$0,16 = -0,28 \ln [0,02t]$$

$$-0,57 = \ln(0,02t)$$

$$0,56 = 0,02t$$

$$t = 28 \text{ detik}$$

##### (b) Gunakan metoda laju aliran massa, berdasarkan Rumus (8)

Dua metoda perhitungan akan digunakan. Metoda perhitungan yang pertama akan mengasumsikan densitas asap 0,075 lb/ft<sup>3</sup>. Ini ekuivalen dengan asap pada temperatur 70 °C. Metoda perhitungan yang kedua akan mengasumsikan temperatur lapisan asap sama dengan temperatur cendawan asap rata-rata pada ketinggian lapisan batas asap. Dalam

kedua kasus itu, diasumsikan tidak ada kerugian kalor dari lapisan asap ke dinding batas atrium. Interval waktu 1 detik dipilih untuk setiap kasus tsb.

(1) Perhitungan 1 Tidak ada koreksi densitas asap.

**Langkah 1** Hitung laju lairan massa (lb/detik) pada  $z = H$  dengan Rumus (8).

**Langkah 2** Konversikan laju aliran massa menjadi volumetrik, dengan asumsi temperatur asap 70 °C, sbb:

$$V = 60 \frac{m}{\rho}$$

di mana

$V$  = laju aliran volumetrik [ft<sup>3</sup>/menit}

$m$  = laju aliran massa [lb/detik]

$\rho$  = densitas asap [lb/ft<sup>3</sup>]

**Langkah 3** Asumsikan bahwa volume asap yang diproduksi selama interval waktu yang dipilih secara langsung dan merata didistribusikan ke seluruh luas atrium. Tentukan kedalaman lapisan asap,  $dz$  (ft), yang terkumpul selama jangka waktu yang dipilih.

**Langkah 4** Hitung ketinggian yang baru batas lapisan asap.

Ulangi langkah (1) – (4) sampai batas lapisan asap mencapai ketinggian rancangan.

**Tabel E.1 dengan angka-angka contoh menunjukkan teknik perhitungan tsb**

Waktu (detik)	z (ft)	Massa (lb/detik)	Volumetrik (ft <sup>3</sup> /detik)
1	119,3	990	13.199
2	118,7	981	13.080
3	118,0	972	12.963
4	117,4	964	12.847
5	116,8	955	12.732
6	116,1	946	12.619
7	115,5	938	12.508
8	114,9	930	12.397
9	114,3	922	12.288
10	113,7	914	12.181
11	113,1	906	12.074
12	112,5	898	11.969
13	111,9	890	11.866
14	111,3	882	11.763
15	110,7	875	11.662
16	110,1	867	11.562
17	109,5	860	11.463
18	109,0	852	11.366
19	108,4	845	11.270
20	107,9	838	11.174

Tabel E.1 (lanjutan)

Waktu (detik)	z (ft)	Massa (lb/detik)	Volumetrik (ft <sup>3</sup> /detik)
21	107,3	831	11.080
22	106,7	824	10.987
23	106,2	817	10.895
24	105,7	810	10.804
25	105,1	804	10.715
26	104,6	791	10.626
27	104,1	790	10.538
28	103,5	784	10.451
29	103,0	777	10.366
30	102,5	771	10.281
31	102,0	765	10.197
32	101,5	759	10.115
33	101,0	752	10.033
34	100,5	746	9.952
35	100,0	740	9.872

### E.1.2 Soal 2

Tentukan laju aliran volumetrik pembuangan yang diperlukan untuk menjaga asap 5 ft di atas permukaan tertinggi pejalan kaki di atrium, yaitu balkon lantai 9. Anggaplah api berada di tengah lantai dasar atrium.

Dengan api yang berada di tengah lantai atrium, diharapkan terbentuk cendawan asap yang aksis-simetrik. Pertama, rumus (7) harus digunakan untuk menentukan tinggi api.

Diketahui:  $Q_c = 3500$  Btu/detik

$$z_l = 0,533 Q_c^{2/5}$$

$$z_l = 0,533 (3500)^{2/5}$$

$$z_l = 13,9 \text{ ft}$$

Dengan rancangan batas lapisan asap pada 85 ft di atas lantai, ketinggian nyala api lebih rendah dari rancangan lapisan asap. Jadi, dengan Rumus (8) untuk menentukan laju produksi asap pada ketinggian batas lapisan asap:

$$z = 85 \text{ ft}$$

$$m = 0,022(Q_c^{1/3} z^{5/3} + 0,0042Q_c)$$

$$m = 0,022 (3500)^{1/3} (85)^{5/3} + 0,0042 (3500)$$

$$m = 564 \text{ lb/detik}$$

Kalau laju aliran volumetrik pembuangan sama dengan laju produksi asap, maka tebalnya lapisan asap akan stabil pada ketinggian rancangan. Jadi, dengan mengkonversi laju aliran massa menjadi laju aliran volumetrik:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

di mana:  $\rho = 0,075 \text{ lb/ft}^3$

$$V = 564 / 0,075$$

$$V = 7521 \text{ ft}^3/\text{detik, atau } 451.260 \text{ scfm.}$$

### **E.1.3 Soal 3**

Tentukan apakah cendawan asap akan menyentuh semua dinding sebelum mencapai ketinggian rancangan yang dinyatakan dalam soal 2 (5 ft di atas permukaan lantai tertinggi). Perhitungan pada soal 2 berasumsi bahwa cendawan asap tidak melebar menyentuh dinding atrium sebelum mencapai tinggi rancangan batas lapisan asap. Perhitungan berikut ini sebagai pemeriksaan.

Dengan rumus (16) untuk ketinggian batas lapisan asap 85 ft ( $z = 85 \text{ ft}$ ):

$$d = 0,5 z$$

$$d = 0,5(85)$$

$$d = 42,5 \text{ ft}$$

Jadi kesimpulannya, asap tidak menyentuh dinding atrium sebelum mencapai tinggi rancangan batas lapisan asap.

### **E.1.4 Soal 4**

Tentukan temperatur lapisan asap setelah pengaktifan fan.

Kualitas asap di dalam lapisan asap mungkin menjadi penting dalam konteks mengenai *tenability* dan *damageability*.

Dengan menerapkan tabel 7.5:

Diketahui:

$$Q_c = 3500 \text{ Btu/detik}$$

$$\rho = 0,075 \text{ lb/ft}^3$$

$$c = 0,24 \text{ Btu/lb.}^\circ\text{F}$$

$$V = 7521 \text{ ft}^3/\text{detik}$$

$$\Delta T = Q_c / (\rho c V)$$

$$\Delta T = 3500 / [90,075)(0,24)(7521)]$$

$$\Delta T = 26^\circ \text{ F}$$

### **E.1.5 Soal 5**

Pada lantai 10 ingin dibuat sebuah bukaan, lebar 10 ft dan tinggi 6 ft, dari sisi penghuni ke arah atrium.

(a) Untuk kebakaran yang terjadi di ruang penghuni, tentukan laju aliran udara berlawanan yang diperlukan untuk menahan asap tidak keluar dari ruang penghuni (asumsikan temperatur kebakaran  $1000^\circ\text{F}$ ).

Dengan menggunakan Rumus (23) :

Diketahui  $H = 6 \text{ ft}$

$$g = 32,2 \text{ ft/detik}^2$$

$$T_f = 1000^\circ\text{F}$$

$$T_o = 70^\circ\text{F}$$

$$v = 38,4 [g H (T_f - T_o) / (T_f + 460)]^{1/2}$$

$$v = 38,4 [(32,2)(6)(1000 - 70) / (1000 + 460)]^{1/2}$$

$$v = 426 \text{ ft/menit}$$

(b) Untuk kebakaran yang terjadi di atrium, tentukan laju aliran udara berlawanan yang diperlukan untuk menahan asap tidak masuk ke dalam ruang penghuni.

Diketahui  $Q = 5000$  Btu/detik

$$z = 90 \text{ ft}$$

$$v_e = 17[Q/z]^{1/3}$$

$$v_e = 17[5000/90]^{1/3}$$

$$v_e = 64,8 \text{ ft/min}$$

