



UNIVERSITAS INDONESIA

PEMODELAN DINAMIKA ASAP PADA KEBAKARAN  
STASIUN METRO BAWAH TANAH

SKRIPSI

MUHAMMAD AGUNG S.

0806330333

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

PEMODELAN DINAMIKA ASAP PADA KEBAKARAN  
STASIUN METRO BAWAH TANAH

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

MUHAMMAD AGUNG S.

0806330333

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

2012

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :


### PEMODELAN DINAMIKA ASAP PADA KEBAKARAN STASIUN METRO BAWAH TANAH

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : Muhammad Agung S.

NPM : 0806330333

Tanda Tangan :



Tanggal : 9 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Muhammad Agung S.

NPM : 0806330333


Program Studi : Teknik Mesin


Judul Skripsi :


### PEMODELAN DINAMIKA ASAP PADA KEBAKARAN STASIUN METRO BAWAH TANAH

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

#### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Ir. Yulianto Sulistyo Nugroho M.Sc., PhD. (  )

Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer DEA (  )

Penguji 1 : Ir. Agung Subagio Dipl. Eng (  )

Penguji 2 : Prof. Dr. Ir. Harinaldi M.Eng (  )

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 9 Juli 2012

# UCAPAN TERIMA KASIH

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Pertama – tama, penulis ingin memanjatkan puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas terselesainya skripsi ini. Karena atas Rahmat dan Hidayah – Nya – lah serta kerja sama dengan berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul:

## PEMODELAN DINAMIKA ASAP PADA KEBAKARAN STASIUN METRO BAWAH TANAH

Tidak lupa penulis sampaikan terima kasih yang sebesar - besarnya kepada beberapa pihak sebagai berikut:

- Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan moril dan materi, selama penulis duduk di bangku perkuliahan.
- Prof. Ir. Yulianto Sulisty Nugroho M.Sc., Ph.D. yang bertindak sebagai dosen pembimbing penulis dalam rangka menyelesaikan skripsi ini dalam jangka waktu kurang lebih satu tahun.
- Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer DEA yang juga bertindak sebagai dosen pembimbing penulis dan telah memberikan masukan mengenai analisa termal daerah kritis pada model simulasi.
- RUUI 2012 yang telah memberikan dana hibah untuk melakukan penelitian ini dengan peneliti utama adalah Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho M.Sc., Ph.D.
- Saudara Hendra Gunawan Susanto, Guruh Dharsono, Refaldo Fanther, dan Hendar K. yang telah banyak meluangkan waktunya bersama penulis untuk berdiskusi mengenai permasalahan pemodelan simulasi, penulisan skripsi, dan analisa hasil simulasi.
- Kepada saudari Hayyu Indrianingrum yang telah memberikan dukungan moril dan doa sehingga setidaknya membantu penulis secara spiritual dalam menyelesaikan skripsi
- Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah memberikan beasiswa kepada penulis dalam bentuk biaya administrasi perkuliahan,

terhitung dari tahun ajaran gasal 2011/2012 sampai tahun ajaran genap 2012/2013 dalam bentuk program beasiswa Fast – Track.

- Para dosen Universitas Indonesia yang telah membimbing penulis selama duduk di bangku perkuliahan serta Guru – Guru yang telah mendidik penulis, dari SD sampai SMA, sehingga setidaknya penulis siap untuk menjalani proses pembelajaran di bangku perkuliahan.

Serta berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan – kekurangan yang terdapat di dalam skripsi ini, khususnya yang tidak penulis sadari dikarenakan keterbatasan pengetahuan yang penulis miliki. Oleh karena itu, berbagai kritik dan saran yang membangun akan sangat membantu penulis dalam memperluas serta memperdalam wawasan pribadi penulis.

Banyak harapan penulis terhadap skripsi ini, salah satunya adalah agar dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membaca, khususnya mahasiswa. Demikian yang dapat penulis sampaikan secara pribadi. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat, baik bagi diri penulis ataupun bagi yang membacanya.

Depok, Juli 2012

Muhammad Agung S.

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Agung S.  
NPM : 0806330333  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah yang berjudul :

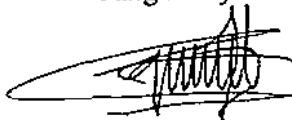
**PEMODELAN DINAMIKA ASAP PADA KEBAKARAN  
STASIUN METRO BAWAH TANAH**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pengkalian data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 9 Juli 2012

Yang menyatakan



(Muhammad Agung Santoso)

## ABSTRAK

Nama : Muhammad Agung S.  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul : Pemodelan Dinamika Asap pada Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah

Kebakaran pada struktur bawah tanah, khususnya stasiun bawah tanah, merupakan kondisi yang membahayakan bagi keselamatan. Hal ini relevan dengan pergerakan asap yang searah dengan jalur evakuasi. Beberapa kebakaran pada stasiun bawah tanah telah menimbulkan banyak korban jiwa, contohnya pada Stasiun Jungangno – Korea (198 korban jiwa) dan Baku – Azerbaijan (289 korban jiwa). Mengingat banyaknya korban jiwa yang disebabkan oleh kebakaran pada stasiun bawah tanah, maka peninjauan terhadap pergerakan asap pada stasiun bawah tanah jika kebakaran terjadi perlu untuk dilakukan. Prioritas peninjauan ini akan semakin meningkat dengan semakin pesatnya pembangunan jalur transportasi massal bawah tanah pada negara – negara berkembang, seperti Indonesia. Sebagai salah satu usaha dalam pembangunan infrastruktur, jalur transportasi massal bawah tanah diperlukan untuk mengatasi permasalahan kemacetan dan transportasi massal yang sering ditemui di kota – kota besar seperti Jakarta - Indonesia. Dengan diimplementasikannya sistem transportasi yang berada pada beberapa bidang, maka persinggungan jalur transportasi pada satu bidang dapat dihindari. Prediksi dan pergerakan asap pada kondisi kebakaran stasiun bawah tanah diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak *Fire Dynamic Simulator V5(FDS V05)*. Bahaya yang disebabkan oleh pergerakan asap, jika kebakaran terjadi, dapat ditekan seminimal mungkin dengan menghisap asap tersebut atau dengan meninggikan langit – langit ruangan tempat kebakaran terjadi. Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa besarnya kapasitas pembuangan asap berpengaruh besar terhadap cepatnya visibilitas kembali normal dengan hanya sedikit berpengaruh terhadap minimum visibilitas yang terdapat pada saat kebakaran terjadi. Sedangkan peninggian langit – langit ruangan tempat kebakaran terjadi mempunyai andil yang besar terhadap minimum visibilitas yang terjadi pada saat kebakaran terjadi. Pada penelitian ini, kapasitas pembuangan asap divariasikan dengan besar 3000 m<sup>3</sup>/jam, 4000 m<sup>3</sup>/jam, 5000 m<sup>3</sup>/jam, 6000 m<sup>3</sup>/jam, dan 7000 m<sup>3</sup>/jam. Dengan variasi terhadap tinggi peron stasiun bawah tanah yang berperan sebagai ruangan tempat terjadinya kebakaran adalah 3 m dan 4 m. Kesimpulan lain yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah bahwa pendekatan terhadap luas lantai tempat kebakaran terjadi untuk menentukan kapasitas pembuangan asap juga diperlukan dengan tidak melupakan peninjauan terhadap tinggi ruangan untuk menyediakan kondisi kondusif evakuasi jika kebakaran terjadi. Kemudian, peletakan fan pembuangan asap perlu mendapat peninjauan khusus untuk menekan penyebaran asap guna menyediakan kondisi kondusif evakuasi.

Kata kunci : *stasiun Metro bawah tanah, sistem pembuangan asap, volume peron, waktu aktivasi, temperatur aktivasi, simulasi*



## ABSTRACT

Name : Muhammad Agung S.  
Major : Mechanical Engineering  
Title : Smoke Dynamic Modelling on Metro Underground Station's  
Fire

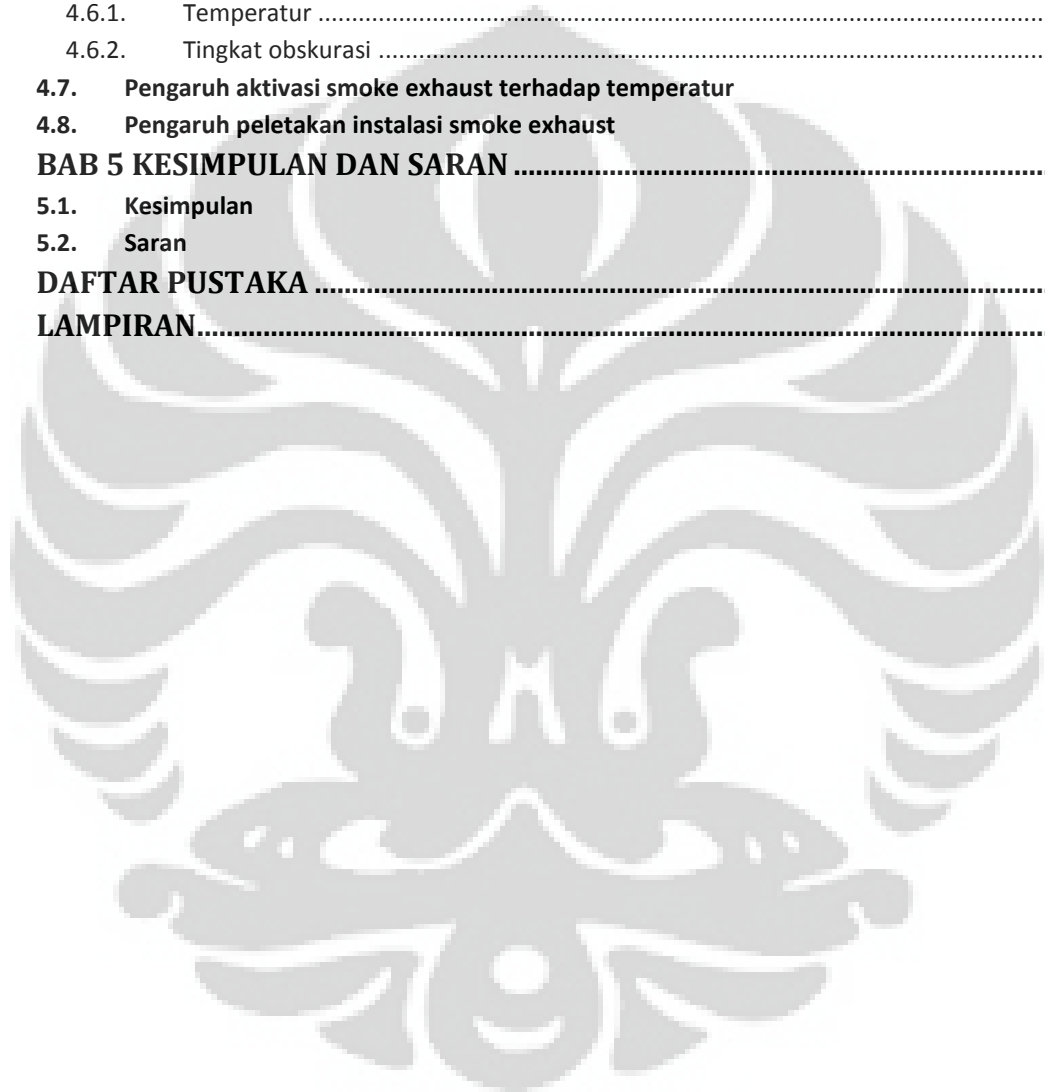
Fire in underground structures (e.g. Metro Subway Station), is a dangerous condition for safety. This is relevant to the movement direction of the smoke which is unidirectional with the evacuation routes. Several fires in underground stations has caused many casualties, for example is Jungangno Station's Fire - Korea (198 fatalities) and Baku's Fire - Azerbaijan (289 fatalities). Given the number of fatalities caused by fires on the subway, then a review of the movement of smoke in the subway station when a fire broke out need to be done. Predictions and the movement of smoke in the subway fire in this work obtained by using Fire Dynamic Simulator V5 (FDS V05). Harm caused by the movement of smoke, if a fire occurs, kept to a minimum by sucking the smoke out or by elevating the ceiling height of the room where the fire occurred. The results of this study prove that the magnitude of smoke exhaust capacity affect the required time for a visibility to return to a normal condition with only a slight effect on the minimum visibility's value. While the elevation of the ceiling's height of the room have contributed greatly to the minimum visibility's value when the fire occurred. In this study, the capacity of the exhaust smoke varied within 3000 m<sup>3</sup>/hr, 4000 m<sup>3</sup>/hr, 5000 m<sup>3</sup>/hr, 6000 m<sup>3</sup>/hr, and 7000 m<sup>3</sup>/hr. While the variation of the underground station platform's height that acts as a room where the fire broke out is 3 m and 4 m. Another conclusion that can be obtained from this study is that the approach to the floor's area to determine the capacity of smoke exhaust is necessary with also considering the height of the room to provide tenable condition to evacuate if a fire occurs. Then, the location of the smoke exhaust's ducting needs to get a special consideration to suppress the smoke's spread in order to provide a tenable condition for evacuation.

Keywords : *underground Metro stations, smoke exhaust system, platform's volume, activation time, activation temperature, simulation*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>I</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>VIII</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>X</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>XIII</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>XIV</b>
<b>NOMENKLATUR</b> .....	<b>XV</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Balakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Pembatasan Masalah	3
1.5. Metodologi Penelitian	4
1.6. Sistematika Penulisan	6
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>8</b>
2.1. Studi referensi penelitian	8
2.2. Stasiun Bawah Tanah Metro/MRT ( <i>Mass Rapid Transit</i> )	15
2.3. Beberapa peristiwa kebakaran pada sistem transportasi bawah tanah	17
2.3.1. Stasiun Jungangno (Daegu – Korea)	17
2.3.2. Stasiun King’s Cross (London – Inggris)	17
2.3.3. Kaprun (Austria)	18
2.3.4. Baku (Azerbaijan)	19
2.4. Pembakaran bahan bakar cair	20
2.4.1. Ukuran bahan bakar <i>spill</i> dan <i>pool</i>	21
2.4.2. Laju produksi kalor (HRR)	23
2.5. Sifat dan produksi asap	25
2.6. Model kebakaran zona	28
2.7. Fluks panas api	31
2.8. Fire Dynamic Simulator (FDS)	34
2.8.1. Pengaturan daerah komputasi	35
2.8.2. Pengaturan geometri	36
2.8.3. Pengaturan material dan permukaan geometri	36
2.8.4. Pengaturan kondisi pembakaran	37
2.8.5. Pengaturan parameter simulasi	39
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>40</b>
3.1. Daerah komputasi dan diskritisasi	40
3.2. Geometri stasiun dan aktivasi sistem pembuangan asap	41
3.3. Material	43
3.4. Model pembakaran	44
3.5. Alat ukur	46

3.6.	Variasi parameter	46
<b>BAB 4 HASIL DAN ANALISA</b>		<b>50</b>
4.1.	Pengaruh laju ventilasi terhadap visibilitas	50
4.2.	Pengaruh volume <i>platform</i> terhadap visibilitas	56
4.3.	Ringkasan pengaruh kapasitas volumetrik pembuangan asap dan volume <i>platform</i> terhadap visibilitas	58
4.4.	Distribusi temperatur	60
4.5.	Analisa kontinuitas	69
4.6.	Kondisi batas pada kondisi kebakaran	73
4.6.1.	Temperatur	74
4.6.2.	Tingkat obskurasi	77
4.7.	Pengaruh aktivasi smoke exhaust terhadap temperatur	83
4.8.	Pengaruh peletakan instalasi smoke exhaust	86
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>		<b>90</b>
5.1.	Kesimpulan	90
5.2.	Saran	93
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>94</b>
<b>LAMPIRAN</b>		<b>96</b>



## DAFTAR GAMBAR

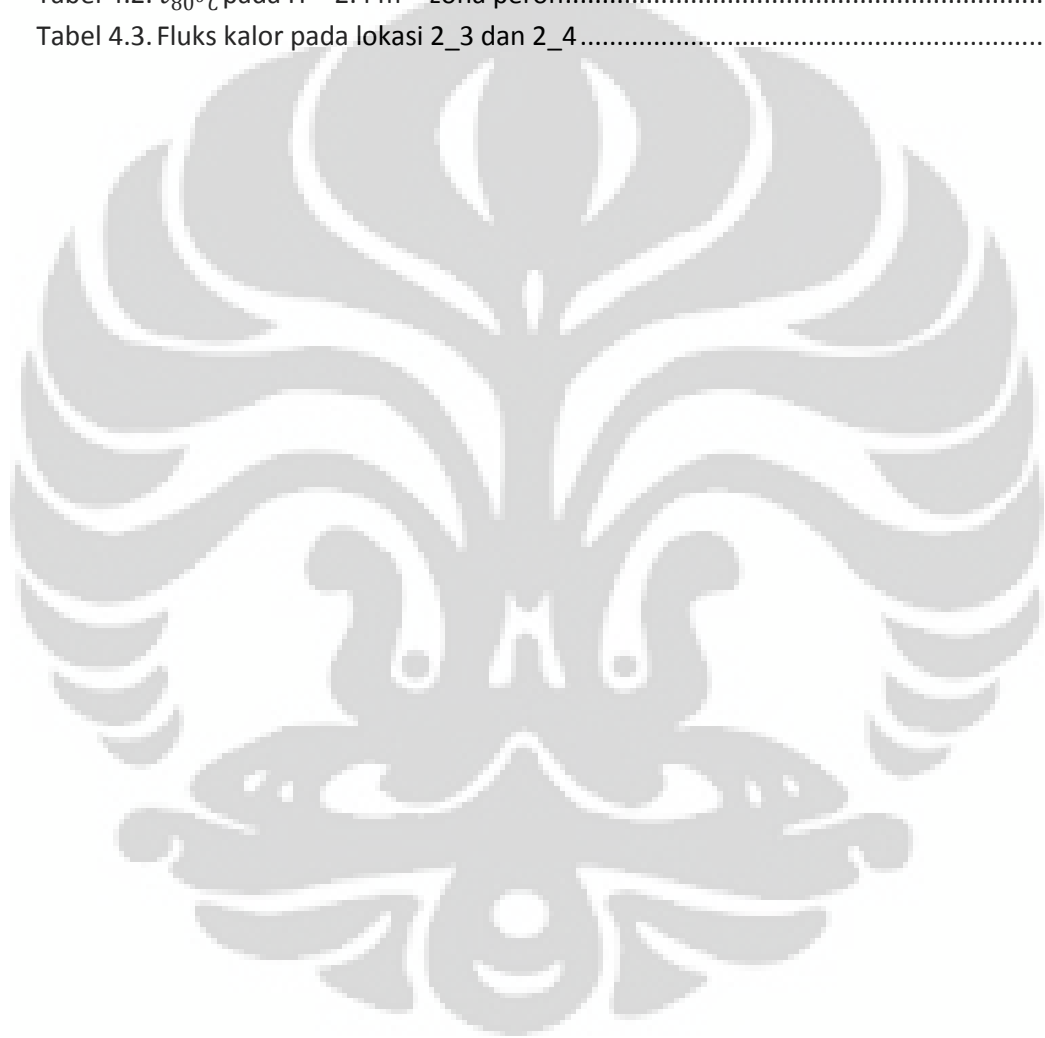
Gambar 2.1.	Model fisik yang digunakan oleh L. H. Cheng et al [1] .....	9
Gambar 2.2.	Distribusi temperatur dari hasil eksperimen (a) dan simulasi (b) pada beberapa lokasi (diambil dari L. H. Cheng et al [2]) .....	10
Gambar 2.3.	Laju ventilasi pada beberapa lokasi di jaringan transportasi MRT berdasarkan L. H. Cheng et al [1] .....	11
Gambar 2.4.	Visualisasi pergerakan asap pada detik ke 120 berdasarkan Jun – Tao et al [3] .....	11
Gambar 2.5.	Geometri stasiun yang disimulasikan oleh Jae Seong Roh et al [4]. .....	12
Gambar 2.6.	ASET dan RSET yang diperoleh oleh Jae Seong Roh et al [4] .....	13
Gambar 2.7.	Distribusi temperatur pada ketinggian 6 m dari lantai terowongan (referensi [5]) .....	14
Gambar 2.8.	Distribusi konsentrasi asap pada ketinggian 6 m dari lantai terowongan (referensi [5]) .....	14
Gambar 2.9.	Stasiun bawah tanah MRT LRT7 Quezon Memorial Underground Station – Filipina .....	16
Gambar 2.10.	PSD yang diintegrasikan pada stasiun bawah tanah Metro Sunny Bay, Hongkong .....	16
Gambar 2.11.	Grafik kedalaman bahan bakar berdasarkan volume pelepasan bahan bakar untuk JP – 4, JP – 8, 6% AFF, dan air (literatur [12]) .....	22
Gambar 2.12.	Resiprokal dari grafik pada Gambar 2.11 (literatur [12]) .....	22
Gambar 2.13.	Kurva HRR berdasarkan waktu untuk material PMMA pada berbagai ketebalan (mm) (literatur [13]) .....	23
Gambar 2.14.	Laju regresi dan normalisasi tinggi api untuk beberapa bahan bakar berdasarkan diameter wadah bahan bakar (literatur [13]) .....	24
Gambar 2.15.	Model kebakaran zona (referensi [10]) .....	29
Gambar 2.16.	Model kebakaran zona pada referensi [11] .....	30
Gambar 2.17.	Fluks panas maksimum pada dinding berdasarkan Back et al (referensi [15]) .....	32
Gambar 2.18.	Fluks panas dalam arah vertikal pada garis tengah api berdasarkan referensi [15] .....	33
Gambar 2.19.	Distribusi fluks panas secara horizontal berdasarkan Back et al (referensi [15]) .....	34
Gambar 3.1.	Daerah diskrit pada bidang $x - z$ .....	40
Gambar 3.2.	Daerah diskrit pada bidang $y - z$ .....	41
Gambar 3.3.	Geometri tipikal stasiun bawah tanah MRT .....	42
Gambar 3.4.	Alat pembuangan asap pada lantai 1 .....	42
Gambar 3.5.	Alat pembuangan asap pada zona peron .....	42
Gambar 3.2.	Peletakan sumber kebakaran pada zona peron .....	44
Gambar 3.3.	Grafik HRR yang digunakan pada simulasi (ganti grafik dengan grafik sederhana) .....	45
Gambar 3.4.	Geometri simulasi variasi aktivasi <i>smoke exhaust</i> .....	45

Gambar 3.5. Lokasi termokopel, pengukur visibilitas, dan <i>beam detector</i> .....	46
Gambar 3.6. Lokasi pengukur aliran gas (gas flow meter) .....	46
Gambar 3.7. Lokasi heat detektor pada simulasi variasi aktivasi <i>smoke exhaust</i> .....	49
Gambar 4.1. Visibilitas pada ketinggian 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m, dan 2.4 m pada lokasi 2_1 sesuai dengan perubahan laju visibilitas, (a) 3000 m <sup>3</sup> /jam, (b) 4000 m <sup>3</sup> /jam, (c) 5000 m <sup>3</sup> /jam, (d) 6000 m <sup>3</sup> /jam, (e) 7000 m <sup>3</sup> /jam .....	51
Gambar 4.2. Visibilitas relevan terhadap peningkatan kapasitas sistem pembuangan asap pada ketinggian 1.8 m – lokasi 2_1 – skenario A.....	53
Gambar 4.3. Integral nilai visibilitas.....	54
Gambar 4.4. Luasan daerah reduksi visibilitas berdasarkan kapasitas volumetrik pembuangan asap pada skenario A - lokasi 2_1 .....	54
Gambar 4.5. Visibilitas berdasarkan waktu dan lokasi relatif terhadap sumber kebakaran untuk kapasitas volumetrik pembuangan asap 3000 m <sup>3</sup> /jam dan ketinggian 1.8 m.....	55
Gambar 4.6. Visibilitas berdasarkan waktu dan lokasi relatif terhadap sumber kebakaran untuk kapasitas volumetrik pembuangan asap 5000 m <sup>3</sup> /jam dan ketinggian 1.8 m.....	55
Gambar 4.7. Perbandingan visibilitas volume <i>platform</i> 5070 m <sup>3</sup> dan 6760 m <sup>3</sup> pada ketinggian 1.8 m – lokasi 2_1 untuk kapasitas pembuangan asap 3000 m <sup>3</sup> /jam (a), 4000 m <sup>3</sup> /jam (b), 5000 m <sup>3</sup> /jam (c), 6000 m <sup>3</sup> /jam (d), dan 7000 m <sup>3</sup> /jam (e) .....	57
Gambar 4.8. Reduksi visibilitas pada volume <i>platform</i> 5070 m <sup>3</sup> dan 6760 m <sup>3</sup> pada lokasi 2_1 untuk (a) ketinggian 0.6 m, (b) ketinggian 1.2 m, (c) ketinggian 1.8 m, dan (d) ketinggian 2.4 m .....	58
Gambar 4.9. Visibilitas pada lokasi 2_1 – ketinggian 1.8 m untuk semua skenario simulasi .....	59
Gambar 4.10. Luas daerah reduksi visibilitas pada semua skenario simulasi untuk lokasi 2_1 .....	60
Gambar 4.11. Distribusi temperatur zona peron pada skenario 1A.....	61
Gambar 4.12. Penyebaran asap pada detik ke – 50 kebakaran skenario 1A.....	64
Gambar 4.13. Laju aliran massa pada setiap kolom tangga skenario 1A .....	64
Gambar 4.14. Penyebaran asap dan laju aliran massa pada setiap kolom tangga skenario 1A.....	65
Gambar 4.15. Vektor aliran massa untuk setiap kolom tangga pada skenario 1A detik ke 100.8 .....	66
Gambar 4.16. nilai kecepatan fluida dalam arah z untuk skenario 1A .....	67
Gambar 4.17. Distribusi temperatur zona <i>concourse</i> .....	69
Gambar 4.18. Laju netto aliran massa masuk menuju zona peron (skenario 1A).....	70
Gambar 4.19. Densitas asap pada ketinggian 2.4 m zona peron (skenario 1A) .....	71
Gambar 4.20. Rata – rata densitas asap pada ketinggian 2.4 m zona peron (skenario 1A) .....	72
Gambar 4.21. laju pembuangan massa asap oleh <i>smoke exhaust</i> peron pada skenario 1A .....	72

Gambar 4.22. Massa asap dalam peron (skenario 1A) berdasarkan persamaan 4.1 dan 4.2. ....	73
Gambar 4.23. Temperatur untuk 60 detik pertama zona peron skenario 3A dan skenario 3B .....	75
Gambar 4.24. temperatur rata – rata 6 menit pertama saat kebakaran terjadi .....	77
Gambar 4.25. Obskurasi zona peron pada ketinggian 1.8 m.....	78
Gambar 4.26. Obskurasi zona <i>concourse</i> .....	78
Gambar 4.27. Visibilitas zona peron – ketinggian 1.8 m skenario 5B.....	80
Gambar 4.28. Visibilas benda yang mengeluarkan cahaya pada skenario 5B di ketinggian 2.4 m zona peron .....	81
Gambar 4.29. Visibilitas benda yang mengeluarkan cahaya pada skenario 5B di ketinggian 1.8 m zona peron .....	82
Gambar 4.31. Densitas optik pada skenario 5B.....	82
Gambar 4.31. Densitas optik pada skenario 5A.....	83
Gambar 4.30. Distribusi temperatur pada waktu aktivasi 10 detik.....	83
Gambar 4.31. Visualisasi simulasi daerah sekitar sumber kebakaran pada detik ke 22.8. ....	85
Gambar 4.32. Temperatur pada lokasi 2_3 dan 2_4 elevasi 2.4 m pada simulasi daerah sekitar sumber kebakaran.....	86
Gambar 4.33. Distribusi temperatur 60 detik pertama skenario 5B .....	86
Gambar 4.34. Letak sumber kebakaran pada simulasi kebakaran tanpa <i>smoke exhaust</i> pada zona <i>concourse</i> .....	87
Gambar 4.35. Distribusi temperatur rata – rata 6 meit pertama pada skenario 5B .....	87
Gambar 4.36. Visibilitas struktur bangunan skenario 5B zona peron .....	88
Gambar 4.36. Visibilitas benda bercahaya skenario 5B zona peron.....	88
Gambar 4.37. Obskurasi untuk zona peron dan <i>concourse</i> pada ketinggian 1.8 m relatif terhadap lantai peron atau <i>concourse</i> .....	89
Gambar 4.38. Densitas Optik zona peron pada elevasi 1.8 m skenario 5B. ....	89

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. skenario kebakaran yang ditetapkan oleh Jae Seong Roh et al [4] .....	12
Tabel 2.2. Kondisi tidak aman terhadap evakuasi berdasarkan Purser (1988) dan Scherfig (1993).....	13
Tabel 2.3. Nilai $\varepsilon$ untuk beberapa material (diambil dari referensi [14]) .....	26
Tabel 3.1. Nilai termofisik material pada simulasi .....	43
Tabel 3.2. Variasi parameter pada simulasi .....	48
Tabel 4.1. $t_{80^{\circ}C}$ pada H = 1.8 m – zona peron .....	62
Tabel 4.2. $t_{80^{\circ}C}$ pada H = 2.4 m – zona peron.....	63
Tabel 4.3. Fluks kalor pada lokasi 2_3 dan 2_4.....	84



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Nilai $D_m$ dan $D_s$ berdasarkan referensi [14] .....	96
Lampiran 2. Pengaturan awal simulasi pada tipikal geometri kereta bawah tanah dengan ketinggian atap peron 3 m dan laju ventilasi sebesar $3000 \text{ m}^3/\text{jam}$ .....	97

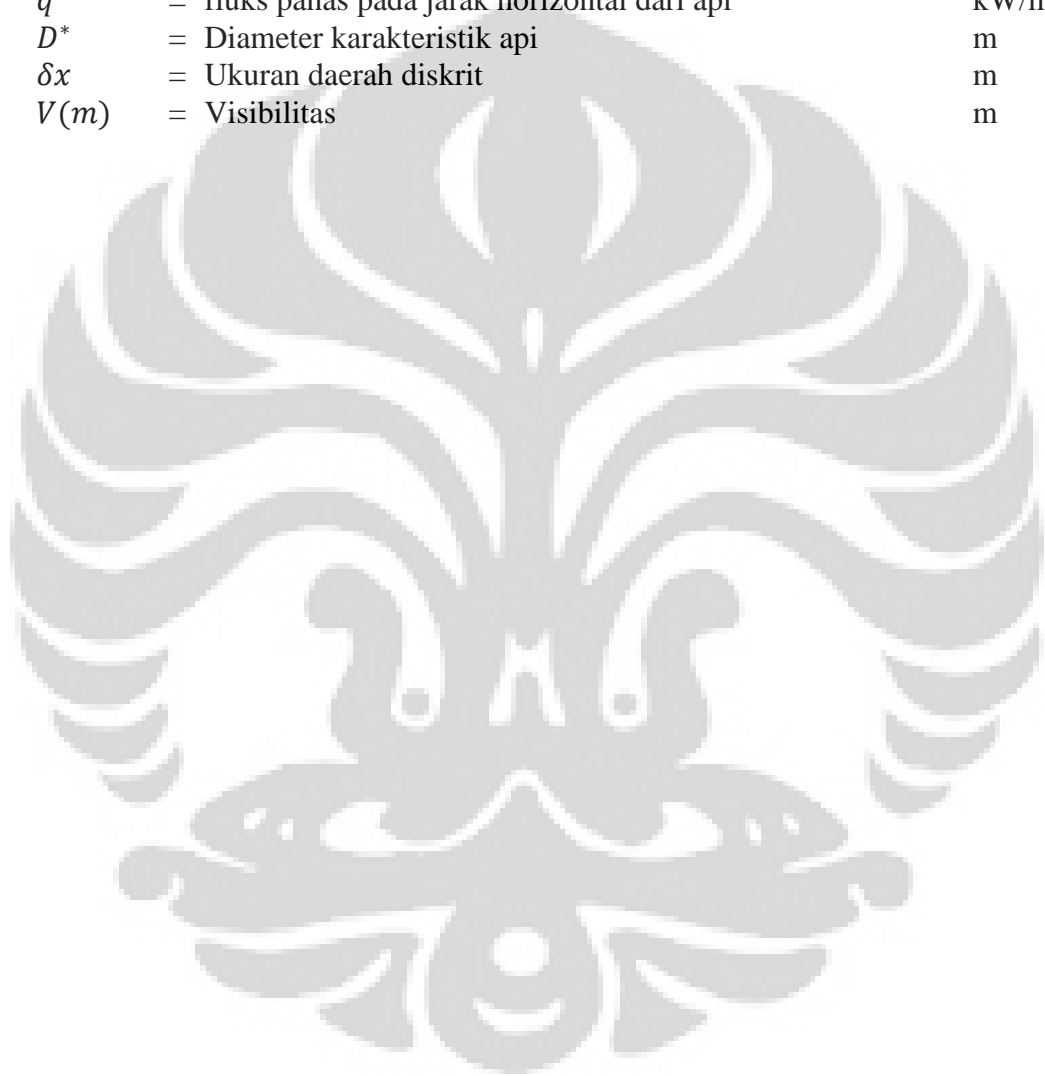




## Nomenklatur

$\dot{Q}$	= laju produksi kalor; Heat Release Rate; HRR	kW
$A_f$	= luas penampang api	$m^2$
$A_s$	= luas penampang bahan bakar	$m^2$
$\delta$	= ketebalan bahan bakar yang tertumpah	mm
$V$	= volume	Liter
$\dot{m}$	= laju pembakaran massa	kg/s
$\Delta H_c$	= entalpi pembakaran	kJ/kg
$\dot{m}''$	= laju pembakaran massa per satuan luas	kg/( $m^2 \cdot s$ )
$\dot{m}''_{max}$	= laju pembakaran massa per satuan luas maksimum	kg/( $m^2 \cdot s$ )
$\dot{y}$	= laju regresi bahan bakar	m/s
$\dot{y}_{max}$	= laju maksimum regresi bahan bakar	m/s
$D$	= diameter bahan bakar	m
$k$	= koefisien reduksi intensitas cahaya	$m^{-1}$
$\beta$	= koreksi rata – rata panjang beam detector	
$A$	= luas	$m^2$
$t_b$	= waktu pembakaran	s
$\rho$	= densitas	kg/ $m^3$
$\varepsilon$	= faktor konversi asap – bahan bakar	
$I_0^\lambda$	= intensitas cahaya monokromatik dengan panjang gelombang $\lambda$	lx
$I_\lambda$	= intensitas cahaya yang ditransmisikan sejauh $L$	lx
$L$	= panjang lintasan intensitas	m
$D$	= densitas optik per satuan panjang	$m^{-1}$
$K_m$	= koefisien <i>light extinction</i> per satuan massa	$m^2/kg$
$m$	= konsentrasi asap	kg/ $m^3$
$D_s$	= densitas optik spesifik	
$D_m$	= densitas optik persatuan massa	$m^2/kg$
$V_c$	= volume ruangan	$m^3$
$S$	= visibilitas	m
$\rho$	= densitas gas pada kontrol volume	kg/ $m^3$
$z_l$	= ketinggian zona	m
$Y_{ij}$	= konsentrasi massa spesies $i$ yang meninggalkan volume kontrol melalui pola aliran $j$	
$\dot{\omega}_i$	= laju produksi massa spesies karena pembakaran	kg/s
$T$	= temperatur gas di dalam kontrol volume	K
$T_j$	= temperatur gas pada pola aliran $j$ yang melintasi batasan volume kontrol	K
$\dot{Q}_{net\ loss}$	= laju neto rugi perpindahan panas pada kondisi batas	kW
$\Delta H$	= entalpi pembakaran	kJ/kg
$\dot{\omega}_F$	= laju reaksi bahan bakar	kg/s
$\dot{m}_g$	= laju massa gas keluar kompartemen	kg/s
$\dot{m}_f$	= laju massa bahan bakar terbakar	kg/s
$\dot{m}_a$	= laju massa udara masuk ke dalam kompartemen	kg/s
$C_d$	= koefisien penyempitan <i>orifice</i> (tipikal = 0.7)	

$W_0$	= lebar bukaan	m
$H_0$	= tinggi bukaan	m
$\rho_\infty$	= kerapatan udara lingkungan	kg/m <sup>3</sup>
$g$	= percepatan gravitasi	m/s <sup>2</sup>
$A_\rho$	= luas penampang bukaan	m <sup>2</sup>
$q_{peak}$	= fluks panas maksimum	kW/m <sup>2</sup>
$Z$	= elevasi ketinggian	m
$L_f$	= panjang lidah api	m
$q_{\zeta l}$	= fluks panas pada garis tengah api	kW/m <sup>2</sup>
$q$	= fluks panas pada jarak horizontal dari api	kW/m <sup>2</sup>
$D^*$	= Diameter karakteristik api	m
$\delta x$	= Ukuran daerah diskrit	m
$V(m)$	= Visibilitas	m



# BAB 1

## Pendahuluan

### 1.1. Latar Belakang

Pada kondisi kebakaran, parameter – parameter seperti pergerakan asap, konsentrasi asap, visibilitas, dan distribusi termal merupakan hal yang penting dan menjadi suatu acuan utama terhadap amannya desain suatu ruang, relevan terhadap besarnya api dan peninjauan keselamatan kebakaran lainnya. Pada struktur bawah tanah, khususnya stasiun bawah tanah, parameter – parameter tersebut menjadi acuan yang jauh lebih penting lagi dikarenakan pergerakan asap yang searah dengan jalur evakuasi.

Visibilitas yang merupakan sebuah interval jarak yang diperlukan untuk suatu benda agar dapat dilihat atau dibedakan dengan latar belakangnya, merupakan faktor keselamatan yang penting untuk ditinjau pada saat kebakaran terjadi, khususnya pada keadaan dimana penyebaran asap menjadi bahaya yang dominan. Dari visibilitas, parameter seperti konsentrasi asap, obskurasi, dan densitas optik dapat diperoleh sehingga peninjauan terhadap pergerakan asap dapat menghasilkan batasan kepada desain dari suatu stasiun untuk mengantisipasi peristiwa kebakaran.

Efek dari berkurangnya visibilitas dapat dirasakan pada lokasi yang relatif jauh dari lokasi sumber kebakaran. Oleh karena itu, pada lokasi dimana terdapat bahaya panas yang relatif kecil, bahaya terhadap berkurangnya visibilitas sudah relatif besar, tergantung pada faktor konversi bahan bakar yang terbakar. Dampak ini dapat diatasi dengan menghisap asap hasil pembakaran, yang merupakan agen utama terhadap berkurangnya visibilitas, dengan menggunakan suatu sistem ventilasi hisap.

Selain itu, bahaya toksik juga merupakan ancaman yang serius terhadap keselamatan jiwa penumpang. Disamping api yang menyebar atau bahaya termal yang merupakan dampak langsung dari api, efek toksik serta bahaya lainnya dari pergerakan asap (salah satunya adalah visibilitas) dapat menyebabkan puluhan sampai ratusan jiwa meninggal, seperti pada peristiwa kebakaran pada Stasiun Jungangno – Korea (198 korban jiwa), Stasiun King's Cross – Inggris (32 korban

jiwa), Kaprun – Austria (155 korban jiwa), Baku – Azerbaijan (289 korban jiwa), dan lainnya yang akan dijelaskan lebih mendetail pada bab selanjutnya (informasi peristiwa kebakaran tersebut diperoleh dari referensi [1] dan [20]). Dengan catatan, bahwa pada skripsi ini parameter visibilitas akan menjadi salah satu acuan utama dikarenakan keterukurannya yang setidaknya hampir proporsional dengan efek toksik dari asap, sesuai batasan standar yang ada.

Pergerakan asap juga dapat menimbulkan peningkatan temperatur pada kondisi kebakaran, disamping daerah sumber kebakaran yang dekat dengan api. Dengan kata lain, asap dapat meningkatkan temperatur pada kondisi yang jauh dari lokasi sumber kebakaran, relevan terhadap pergerakan dan konsentrasinya.

Berdasarkan pertimbangan terhadap pergerakan asap secara umum, kontrol volume zona asap dapat dikatakan sebagai penyebab terhadap berkurangnya visibilitas, relevan terhadap peningkatan ketebalan zona tersebut. Hal ini disebabkan karena dengan meningkatnya kontrol volume zona asap maka kontrol volume zona di bawahnya akan mengecil relatif terhadap volume keseluruhan ruangan. Sehingga diharapkan, dengan meningkatkan ketinggian ruangan, konsentrasi asap dan visibilitas pada ketinggian normal manusia, serta pergerakan asap dapat terjaga pada angka aman, untuk menunjang kegiatan evakuasi, disamping kontrol volume zona asap yang terus meningkat relatif terhadap reaksi oksidasi yang terjadi.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Kapasitas pembuangan asap relatif terhadap volume peron perlu untuk ditentukan agar kondisi kondusif evakuasi dapat tetap diperoleh pada saat kebakaran terjadi. Disamping itu, pendekatan penentuan kapasitas pembuangan asap berdasarkan luas permukaan lantai kompartemen atau volume kompartemen perlu untuk dipelajari dengan tujuan akhir untuk menentukan pendekatan yang lebih relevan terhadap kapasitas pembuangan asap yang dapat menjaga visibilitas, densitas optik, dan distribusi temperatur pada nilai aman.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, penyebaran asap, konsentrasi asap, penyebaran termal, dan reduksi visibilitas merupakan faktor bahaya yang ingin

ditekan seminimal mungkin. Oleh karena itu, klarifikasi desain keselamatan kebakaran berupa tinggi atap dan kecepatan laju ventilasi sistem penghisap asap perlu dilakukan untuk mengetahui bagaimana hubungannya dengan parameter – parameter tersebut jika kebakaran terjadi.

#### 1.4. Pembatasan Masalah

Pada simulasi yang dilakukan, terdapat desain laju produksi kalor yang diasumsikan mempunyai laju pembakaran bahan bakar maksimum dan konstan berdasarkan waktu, sebesar 5 MW dan 3 MW, selama bahan bakar tersebut mengalami proses pembakaran. Dengan demikian, sumber kebakaran didesain memiliki laju produksi kalor<sup>1</sup> yang konstan hingga bahan bakar habis. Hal ini tidak mungkin terjadi pada reaksi pembakaran aktual. Dimana pada reaksi pembakaran aktual, laju produksi kalor merupakan fungsi dari waktu dan akan melalui beberapa fase pembakaran dengan nilai laju produksi kalor dan gradiennya yang berbeda – beda. Untuk mengalokasikan laju pembakaran yang aktual, perlu dilakukan peninjauan mendalam terhadap reaksi pirolisis yang terjadi pada bahan bakar atau melakukan eksperimen dengan menggunakan kalorimeter untuk mencari nilai transien dari laju produksi kalor.

Hal ini didesain demikian, karena hal yang akan ditinjau berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan adalah pengaruh variasi laju ventilasi sistem penghisap asap dan ketinggian atap peron terhadap parameter pergerakan asap dan distribusi temperatur. Maka, akan sangat mencukupi jika kebakaran yang didesain adalah kebakaran dengan laju produksi kalor yang maksimum selama terbakar, atau dengan kata lain adalah merupakan kebakaran dengan laju produksi kalor yang paling berbahaya, relatif terhadap material bahan bakar yang digunakan sebagai sumber kebakaran.

Kemudian, ditetapkan material yang tidak mampu bakar pada daerah sekitar lokasi sumber kebakaran, sehingga api tidak menyebar. Hal ini tentunya tidak demikian pada kondisi aktual dimana terdapat banyak material mampu bakar yang akan membantu penyebaran api. Oleh karena itu, pembahasan pada skripsi ini difokuskan kepada penyebaran asap dibandingkan penyebaran api.

---

<sup>1</sup> Laju produksi kalor sering juga disebut sebagai HRR (*Heat Release Rate*) atau HRRPUA (*Heat Release Rate per Unit Area*) yang merupakan laju produksi kalor per satuan luas

Pada sistem pembuangan asap, desain mengenai detail spesifikasi saluran pembuangan tidak dilakukan. Hal yang ingin diperhatikan adalah pengaruh dari laju ventilasinya terhadap pergerakan asap, konsentrasinya, distribusi temperatur, dan visibilitas. Peninjauan mengenai desain teknis sistem pembuangan asap tidak dilakukan.

Alat – alat atau tindakan keselamatan kebakaran lainnya, seperti *sprinkler*, sistem kabut air, APAR, dan interferensi dari petugas pemadam kebakaran ataupun penumpang tidak dimodelkan. Sehingga distribusi temperatur, pergerakan asap, dan penyebaran hanya dipengaruhi oleh desain sumber kebakaran, kapasitas dan peletakan sistem pembuangan asap, serta ketinggian zona tempat kebakaran terjadi.

Geometri pada stasiun, misal ruangan pompa, kontrol, AHU (*Air Handling Unit*), tanki air pemadam kebakaran, dan sebagainya, yang tidak berpengaruh terhadap pergerakan asap tidak dimodelkan.

### **1.5. Metodologi Penelitian**

Prediksi terhadap pergerakan asap dan distribusi temperatur akibat adanya substansi mampu bakar, yang mengalami reaksi oksidasi, didapat dengan melakukan simulasi pada perangkat lunak FDS. Akan diperoleh data – data mengenai visibilitas, laju aliran massa, dan distribusi temperatur dengan sebelumnya menetapkan model geometri stasiun, kapasitas *smoke exhaust*, lokasi alat – alat pengukuran dan parameter laju produksi kalor sumber kebakaran pada pengaturan awal simulasi.

Beberapa studi literatur sebelumnya telah dilakukan untuk mencari data – data mengenai spesifikasi ventilasi hisap yang digunakan untuk mempertahankan konsentrasi dan massa asap, serta visibilitas pada kondisi yang dapat menunjang kegiatan evakuasi pada saat dimana penyebaran asap merupakan faktor bahaya yang utama. Literatur [2] – [5] cukup memberikan masukan terhadap nilai - nilai laju ventilasi yang akan digunakan sebagai parameter variasi dalam mengamati visibilitas, pergerakan asap, konsentrasi asap, dan distribusi temperatur pada kondisi kebakaran yang akan disimulasikan.

Berdasarkan pemodelan kebakaran pada kompartemen, persamaan – persamaan konservasi seperti massa, spesies, dan energi, bergantung terhadap

tinggi dari kompartemen tersebut yang secara tidak langsung merefleksikan besarnya tinggi atau tebal dari zona asap. Sedangkan laju ventilasi dari sistem penghisapan asap yang akan disimulasikan, dapat menjadi sebuah variabel evaluasi kontinuitas massa pada model yang telah disimulasikan sehingga pengaruh laju ventilasi terhadap massa asap, yang terikat terhadap waktu, pada model yang disimulasikan dapat diamati.

Peninjauan terhadap pemodelan kebakaran dengan berdasarkan zona - zona yang terbentuk (akibat adanya kebakaran) dapat diperoleh secara mendetail dari literatur [10] dan [11]. Namun, pembahasan yang tercantum pada pemodelan kebakaran di literatur tersebut, terbatas pada kompartemen sederhana dengan orientasi ventilasi/bukaan vertikal. Pada model simulasi yang dilakukan, geometri dari stasiun bawah tanah memiliki beberapa bukaan dengan orientasi horizontal serta beberapa sistem penghisap asap yang diintegrasikan untuk mempertahankan kondisi kondusif evakuasi, yang berbeda dengan model geometri pada literatur [10] dan [11].

Dengan demikian, pengaruh dari laju ventilasi dan ketinggian atap peron pada stasiun bawah tanah terhadap pergerakan asap, konsentrasi asap, dan distribusi temperatur pada kondisi dimana kebakaran dengan bahaya asap sebagai faktor yang dominan dapat diamati dengan melakukan simulasi terlebih dahulu. Setelah simulasi dilakukan, data – data yang diperoleh dari hasil simulasi dapat diamati untuk memperoleh batasan kuantitatif terhadap pengaruh laju ventilasi dan ketinggian atap peron. Setelah itu, evaluasi analitis berdasarkan persamaan – persamaan konservasi dapat memberikan batasan konseptual dan kuantitatif terhadap pengaruh laju ventilasi dan perbedaan ketinggian atap pada pergerakan asap, konsentrasinya, dan distribusi temperatur terhadap model yang telah disimulasikan, relatif terhadap geometri yang digunakan.

Simulasi untuk mengetahui pengaruh peletakan sistem pembuangan asap yang aktif selama kebakaran juga dilakukan dengan menonaktifkan sistem pembuangan asap pada zona *concourse*. Hal ini dilakukan karena pada saat sistem pembuangan asap pada *concourse* aktif, asap diprediksikan akan turut menyebar menuju zona *concourse*. Dalam simulasi untuk mengetahui pengaruh peletakan sistem pembuangan asap, sumber kebakaran juga divariasikan untuk mengetahui

pengaruh dari besarnya api terhadap pergerakan asap, serta dalam rangka mengintegrasikan skenario kebakaran yang, setidaknya, lebih realistis.

Variasi terhadap waktu aktivasi *smoke exhaust* juga perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi temperatur. Hal ini dilakukan dengan melakukan simulasi pada daerah sekitar lokasi kebakaran, tanpa meninjau pergerakan asap secara keseluruhan. Di samping variasi waktu, aktivasi sistem pembuangan asap pada simulasi ini juga dilakukan dengan menetapkan detektor panas pada langit – langit sekitar sumber kebakaran, yang akan mengaktifkan sistem pembuangan asap pada saat temperatur sudah mencapai nilai yang sudah ditetapkan sebelumnya.

Berdasarkan data – data yang diperoleh dari prediksi simulasi, analisa dapat dilakukan dengan mengamati pola grafis nilai – nilai visibilitas, distribusi temperatur, dan laju aliran massa pada lokasi – lokasi yang telah ditetapkan sebelumnya terhadap waktu, laju ventilasi, dan ketinggian atap peron. Dari data visibilitas, dapat diperoleh nilai konsentrasi asap dan densitas optik. Dengan selanjutnya menggunakan persamaan konservasi massa untuk meninjau secara analitik, dari data hasil simulasi, massa asap yang berada pada zona peron berdasarkan waktu

Kemudian, beberapa batasan – batasan yang terdapat pada standar yang berlaku, NFPA 130, akan digunakan untuk mengevaluasi konsentrasi asap, distribusi temperatur, dan visibilitas yang diperoleh sebagai hasil dari simulasi yang dilakukan.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Skripsi ini disusun berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut,

- Pendahuluan

Membahas secara singkat mengenai isi dan tujuan dari skripsi secara keseluruhan serta batasan – batasan yang ada. Bagian ini meliputi latar belakang dilakukannya studi dan pengamatan, perumusan terhadap permasalahan yang ingin diamati karakteristiknya, tujuan penulisan yang membahas secara singkat fenomena yang ingin/telah diamati serta manfaat dari pengamatan tersebut, pembatasan terhadap permasalahan yang ingin diamati, metodologi penelitian



yang membahas secara singkat mengenai langkah – langkah yang ditempuh selama penyusunan skripsi ini, serta sistematika penulisan ini sendiri.

- Studi Literatur

Membahas mengenai dasar – dasar teori serta tinjauan literatur – literatur lain yang turut berkontribusi terhadap penyusunan skripsi ini. Hal ini meliputi seperti studi literatur beberapa penelitian – penelitian lain, teori pembakaran bahan bakar cair, teori model kebakaran zona, sifat dan produksi asap, fluks panas yang dihasilkan api, dan sekilas mengenai perangkat lunak FDS yang digunakan untuk simulasi.

- Metodologi Penelitian

Menjelaskan secara mendetail langkah – langkah yang dilakukan selama penyusunan skripsi ini. Seperti langkah – langkah dalam pengaturan awal simulasi, desain geometri, kalkulasi teoritis laju produksi kalor bahan bakar, variasi parameter, serta beberapa masukan variabel termofisik material – material yang digunakan dalam simulasi.

- Hasil dan Analisa

Data – data dari hasil simulasi, berdasarkan aparatus – aparatus pengukur yang telah ditetapkan di berbagai lokasi, akan diamati secara sistematis dengan mengamati pola grafis yang dihasilkan dari data – data seperti visibilitas, distribusi temperatur, dan laju aliran massa pada lokasi – lokasi tertentu berdasarkan waktu, laju ventilasi, ketinggian atap peron, dan lokasi itu sendiri.

- Kesimpulan dan Saran

Setelah analisa dari hasil simulasi dan evaluasi analitis dilakukan, beberapa kesimpulan dan saran dari studi yang telah dilakukan, akan dijabarkan pada bagian ini.

## BAB 2

### Tinjauan Pustaka

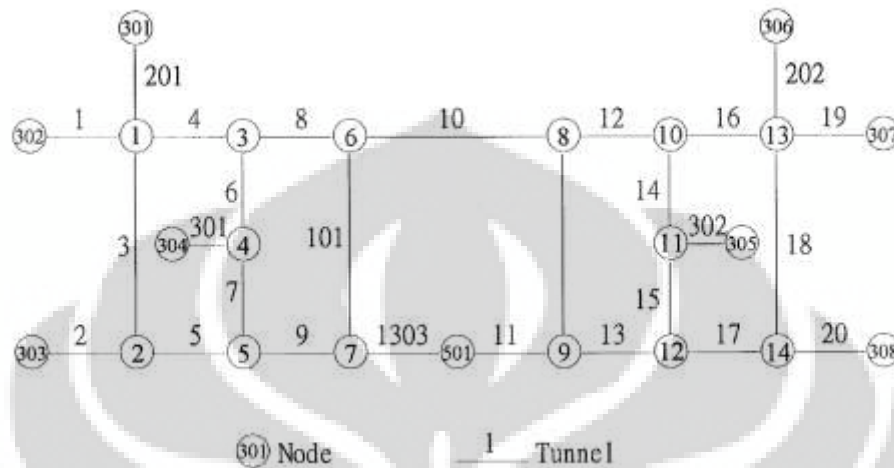
#### 2.1. Studi referensi penelitian

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mempelajari dampak fisik dan termal yang dihasilkan dari fenomena kebakaran. L. H. Cheng et al [2] mengamati arah dan laju dari aliran udara, distribusi temperatur, dan respon dari sistem ventilasi darurat pada saat kebakaran terjadi pada fasilitas bawah tanah. Sistem ventilasi darurat yang digunakan pada penelitian merupakan sistem ventilasi longitudinal yang dapat beroperasi untuk menarik atau menekan fluida yang terdapat pada struktur bawah tanah pada saat kebakaran terjadi. Sistem ini dialokasikan untuk mengeluarkan asap, yang diproduksi oleh kebakaran, secara efisien sesuai dengan skenario kebakaran yang ditetapkan pada penelitian. Fasilitas bawah tanah yang menjadi ruang lingkup penelitian yang dilakukan oleh L. H. Cheng et al adalah merupakan sistem jaringan bawah tanah yang meliputi jaringan transportasi sistem MRT<sup>2</sup> Taipei. Singkatnya, penelitian ini menekankan perhatian kepada performa ventilasi mekanikal pada kondisi kebakaran yang terjadi pada sistem jaringan transportasi. Prediksi terhadap laju aliran fluida, distribusi temperatur, dan konsentrasi asap didapatkan dengan menggunakan perangkat lunak MFIRE dan metode eksperimental. Dapat diperhatikan pada gambar 2.1, model fisik dari jaringan transportasi yang digunakan pada penelitian. Dapat diperhatikan pada gambar 2.1, kode – kode nomor yang digunakan untuk inisiasi terowongan dan node pada model fisik. Dengan mengalokasikan node 501 sebagai tempat terjadinya kebakaran dan ventilasi darurat (laju aliran 8.5 m<sup>3</sup>/menit) yang berada pada terowongan 302 (arah ventilasi dari node 305 ke node 304), dapat diperhatikan pada gambar 2.2 dan 2.3, distribusi nilai temperatur dan performa ventilasi pada beberapa lokasi, dimana pengaktifan ventilasi darurat dilakukan setelah kebakaran terjadi.

---

<sup>2</sup> Merupakan jaringan transportasi yang merupakan singkatan dari *Mass Rapid Transit*. Dengan menggunakan kereta sebagai kendaraan pengangkutnya. Dikatakan alat transportasi massal cepat, dikarenakan lintasan transportasinya yang diusahakan sefleksibel mungkin (meliputi darat, bawah tanah, dan jalan layang)

Sedangkan efek dari kondisi pembukaan pintu penahan peron terhadap penyebaran asap pada saat kebakaran di stasiun bawah tanah MRT terjadi, diamati oleh YANG Jun – Tao et al [3]. Pada referensi [3], prediksi dari pergerakan asap diperoleh dengan menggunakan metode CFD.

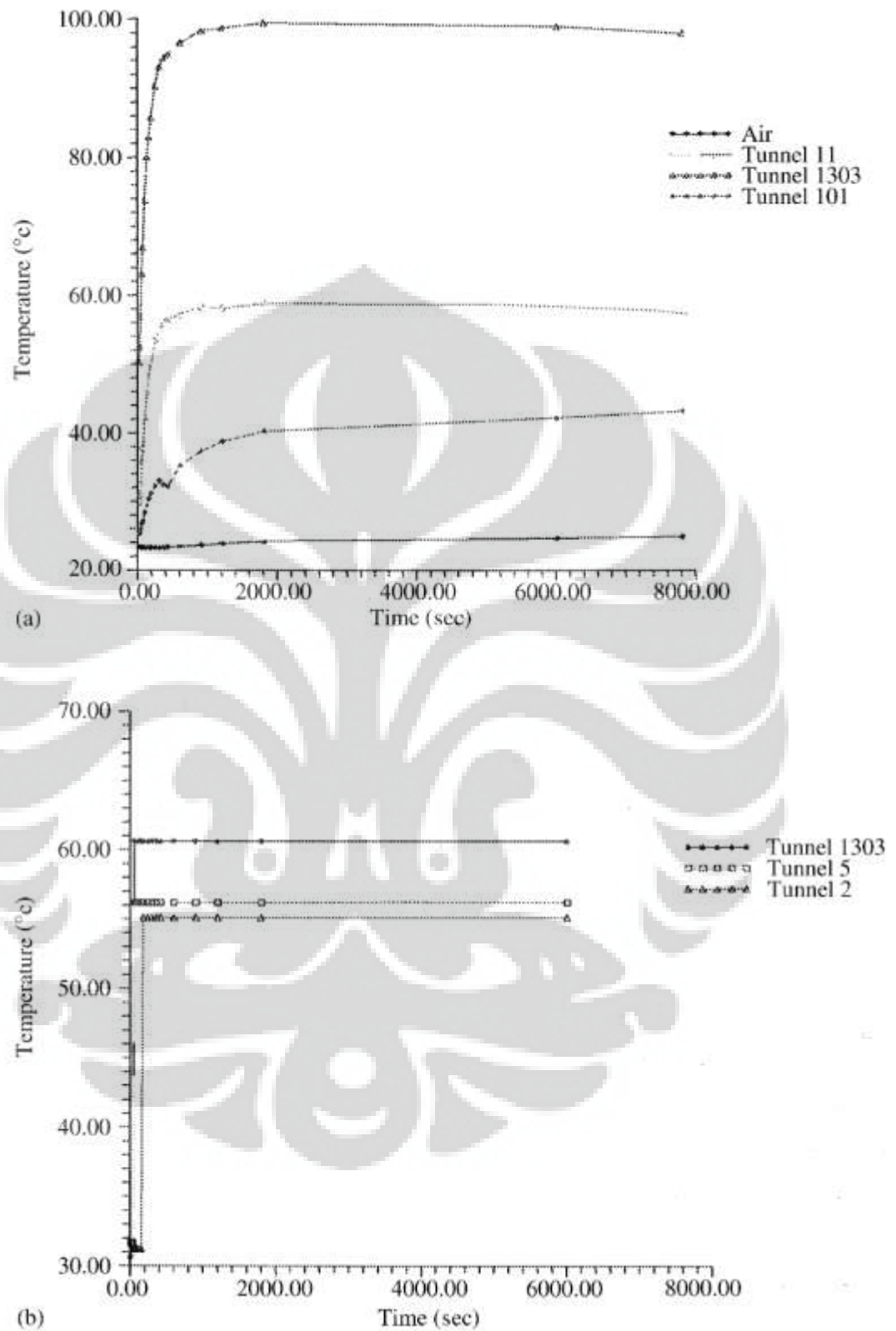


Gambar 2.1. Model fisik yang digunakan oleh L. H. Cheng et al [1]

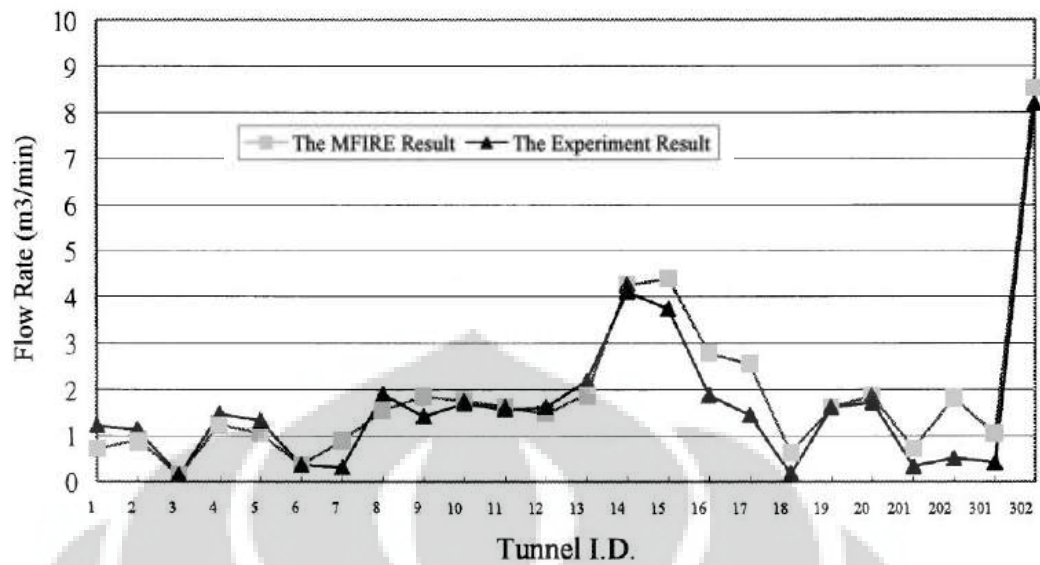
Berdasarkan skenario yang ditetapkan oleh YANG Jun – Tao et al [3], kondisi kebakaran terjadi dengan HRR api sebesar 36 MW yang pertumbuhannya sesuai dengan kuadrat terhadap waktu atau yang sering disebut dengan *t – squared fire*<sup>3</sup>. Dengan disertai kapasitas sistem ekstraksi asap yang sebesar 129600 m<sup>3</sup>/jam pada area publik dan 341000 m<sup>3</sup>/jam pada area lintasan kereta, serta letak kebakaran yang terjadi pada lintasan kereta, visualisasi penyebaran asap dari hasil simulasi yang diperoleh YANG Jun – Tao et al [3], berdasarkan variasi kondisi pembukaan pintu penahan, dapat diperhatikan pada gambar 2.4.

Relevan terhadap pembahasan sebelumnya, efek dari instalasi pintu penahan dan sistem ventilasi terhadap keselamatan jiwa penumpang pada kebakaran kereta, yang terjadi di stasiun bawah tanah, telah diamati oleh Jae Seong Roh. Kurva HRR yang ditetapkan berdasarkan Ingason et al (1994). Dimana sumber kebakaran berada pada

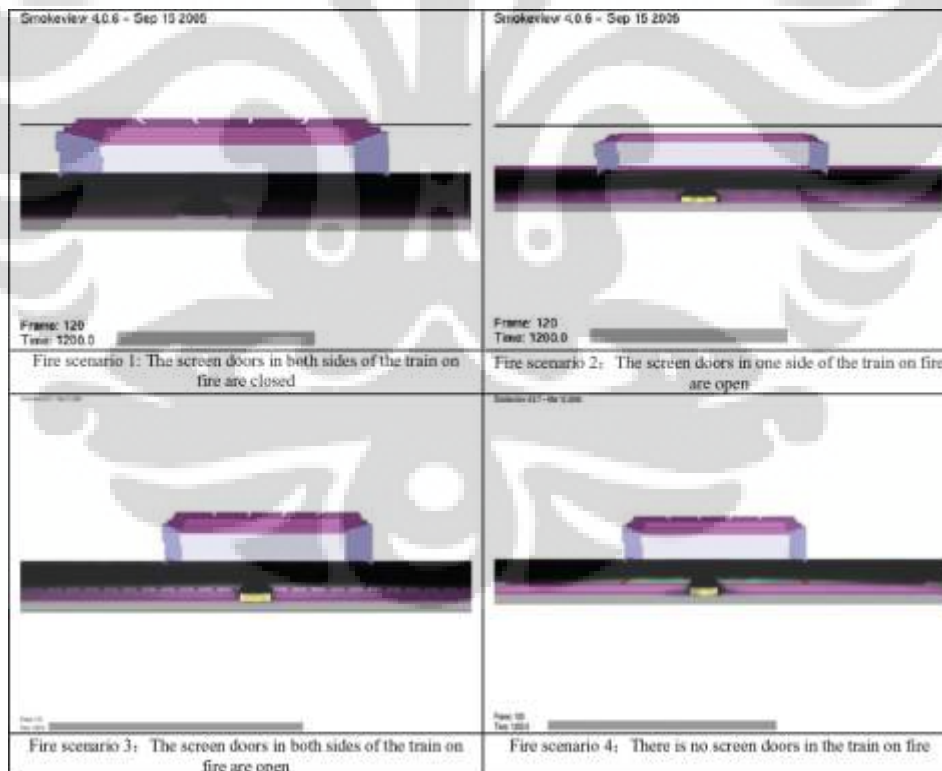
<sup>3</sup> Persamaan HRR untuk *t – squared fire* adalah  $\dot{Q} = \alpha t^2$ . Dengan koefisien  $\alpha$  sebagai penentu laju pertumbuhan api berdasarkan satuan MW/k<sup>2</sup>, dimana k adalah waktu. Referensi mengenai konstanta  $\alpha$  dapat diperoleh dari berbagai referensi.



Gambar 2.2. Distribusi temperatur dari hasil eksperimen (a) dan simulasi (b) pada beberapa lokasi (diambil dari L. H. Cheng et al [2])

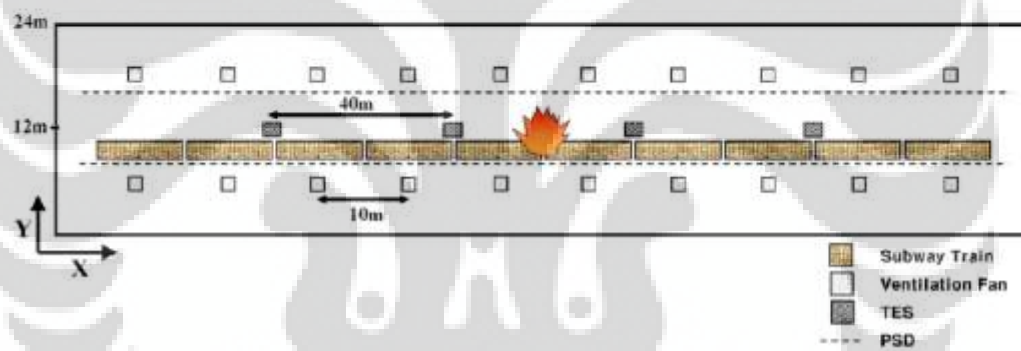
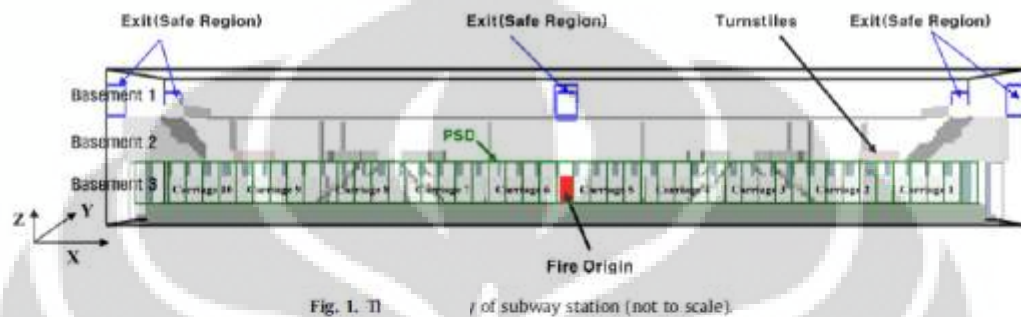


Gambar 2.3. Laju ventilasi pada beberapa lokasi di jaringan transportasi MRT berdasarkan L. H. Cheng et al [1]



Gambar 2.4. Visualisasi pergerakan asap pada detik ke 120 berdasarkan Jun – Tao et al [3]

kereta yang sedang berada di lintasan bawah tanah pada stasiun. Berdasarkan geometri stasiun, desain skenario kebakaran, kondisi batas aman evakuasi yang ditunjukkan pada gambar 2.5, tabel 2.1, dan tabel 2.2, dan dengan menggunakan data – data hasil simulasi, lamanya waktu yang aman dari mulainya kebakaran sampai kondisi pada tabel 2.2 tercapai untuk setiap skenario berdasarkan jarak dari sumber kebakaran diperoleh oleh Jae Seong Roh et al [4], yang dapat diperhatikan pada gambar 2.6.



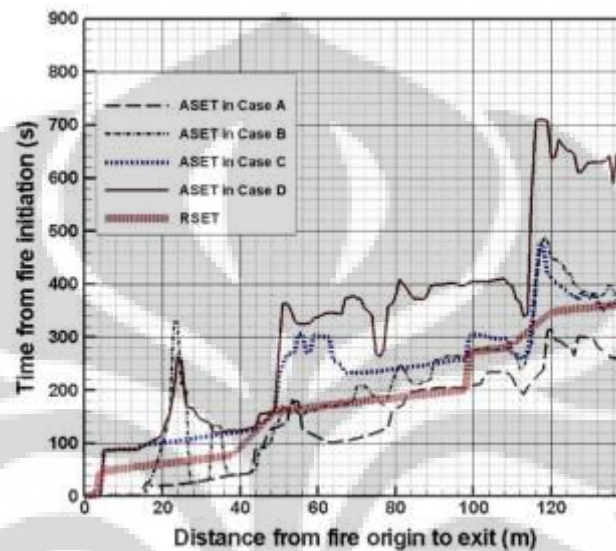
Gambar 2.5. Geometri stasiun yang disimulasikan oleh Jae Seong Roh et al [4].

Tabel 2.1. skenario kebakaran yang ditetapkan oleh Jae Seong Roh et al [4]

Skenario Kebakaran	
Case A	Tidak ada PSD dan ventilasi
Case B	Tidak ada PSD dan ada ventilasi ( 3000 m <sup>3</sup> /menit untuk peron ( <i>ventilation fan</i> ) dan lintasan kereta (TES))
Case C	Ada PSD dan tidak ada ventilasi
Case D	Ada PSD dan ventilasi ( 3000 m <sup>3</sup> /menit untuk peron ( <i>ventilation fan</i> ) dan lintasan kereta (TES))

Tabel 2.2. Kondisi tidak aman terhadap evakuasi berdasarkan Purser (1988) dan Scherfig (1993)

Kondisi	Nilai
Radiasi	2.5 kW/m <sup>2</sup>
Temperatur	80°C pada ketinggian 1.8 m di atas lantai
Visibilitas	10 m pada ketinggian 2.1 m di atas lantai

Gambar 2.6. ASET<sup>4</sup> dan RSET<sup>5</sup> yang diperoleh oleh Jae Seong Roh et al [4]

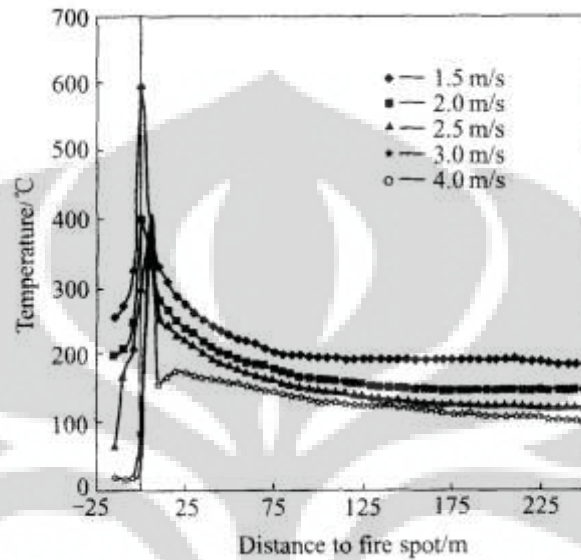
Namun, desain skenario kebakaran yang ditetapkan pada literatur [4] tidak mengikutsertakan variasi terhadap kapasitas sistem ventilasi mekanikal. Dimana pada penelitian ini, kapasitas ventilasi darurat pada peron dan lintasan kereta telah ditetapkan sebesar 3000 m<sup>3</sup>/menit.

Sementara itu, efek dari ventilasi longitudinal pada distribusi temperatur dan konsentrasi asap pada kebakaran yang terjadi di terowongan, telah diamati oleh YANG Gao – Shang et al [5]. Pada penelitian ini, prediksi terhadap penyebaran asap diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak CFD komersial PHOENIX 3.5. Pengamatan utama ditekankan terhadap pola penyebaran asap, karakteristik konsentrasi asap, dan distribusi temperatur pada kapasitas ventilasi longitudinal yang divariasikan. Dapat diperhatikan pada gambar 2.7 dan 2.8,

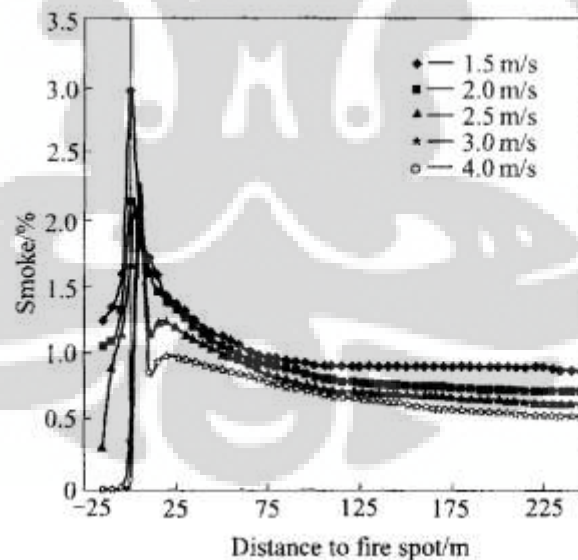
<sup>4</sup> ASET merupakan akronim dari *Available Safety Egress Time* yang merupakan lamanya waktu dari mulainya kebakaran sampai kondisi tidak aman berdasarkan tabel 2.2 tercapai

<sup>5</sup> RSET merupakan akronim dari *Required Safety Egress Time* yang merupakan lamanya waktu dari kesadaran bahaya api sampai beberapa waktu tertentu sebelum kondisi batas tercapai untuk semua penghuni sampai ke tempat aman

grafik distribusi temperatur dan konsentrasi asap pada ketinggian 6 m dari lantai terowongan, berdasarkan variasi kecepatan ventilasi longitudinal, dengan HRR sumber kebakaran yang sebesar 20 MW. Sebagai catatan sebelumnya, arah ventilasi longitudinal dapat dikatakan dari kiri ke kanan, relatif terhadap gambar 2.7 dan 2.8.



Gambar 2.7. Distribusi temperatur pada ketinggian 6 m dari lantai terowongan (referensi [5])



Gambar 2.8. Distribusi konsentrasi asap pada ketinggian 6 m dari lantai terowongan (referensi [5])

Berdasarkan studi literatur yang telah dijelaskan, maka pengamatan mengenai pengaruh dari variasi ketinggian atap peron dan laju ventilasi mekanikal terhadap visibilitas pada kondisi kebakaran, dengan HRR sebesar 50 MW, di



tipikal geometri stasiun bawah tanah MRT, akan dijelaskan pada skripsi ini. Dengan tanpa mengesampingkan batasan – batasan yang ada.

## 2.2. Stasiun Bawah Tanah Metro/MRT (*Mass Rapid Transit*)

Metro atau *Mass Rapid Transit* adalah sistem transportasi massal modern yang beroperasi pada kecepatan tinggi dengan jalur transportasi darat, layang, dan bawah tanah. Pada sistem Metro, kereta listrik digunakan sebagai kendaraan pengangkutnya. Relevan dengan skripsi ini, perhatian difokuskan pada stasiun bawah tanah yang merupakan persinggahan sementara kereta listrik untuk mengangkut dan menurunkan penumpang.

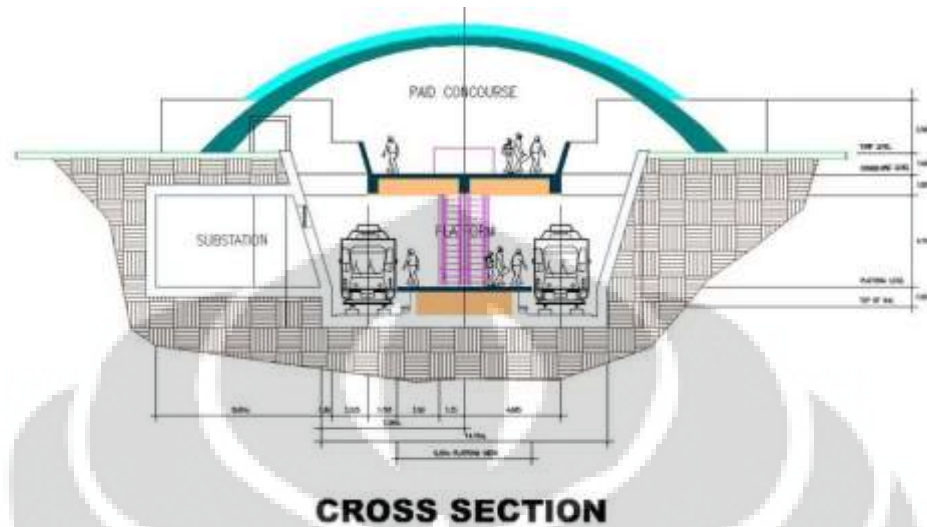
Dewasa ini, terdapat bermacam – macam desain stasiun bawah tanah Metro. Sebagai pengantar dalam menjelaskan daerah – daerah yang terdapat pada stasiun bawah tanah, stasiun bawah tanah MRT LRT7 Quezon Memorial Underground Station – Filipina pada Gambar 2.9 dapat menjadi acuan. Umumnya, stasiun bawah tanah Metro terbagi dalam dua daerah, yaitu *concourse* dan *platform* (peron). Dengan *concourse* terbagi lagi menjadi *free concourse* dan *paid concourse*.

*Free concourse* merupakan tempat dimana para pengunjung tidak memiliki akses untuk menaiki kereta listrik MRT. Untuk dapat mengakses kereta listrik MRT, pengunjung harus melalui *paid concourse* terlebih dahulu untuk kemudian menaiki kereta listrik MRT di daerah *platform*. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, *paid concourse* adalah daerah laluan bagi para pengunjung untuk mengakses *platform* dengan *platform* sebagai tempat bagi para penumpang untuk menunggu dan menaiki kereta listrik MRT.

Pada daerah *platform*, sebagai pengaman bagi para penumpang terhadap lintasan kereta listrik MRT, *Platform Screen Door* (PSD) diintegrasikan pada beberapa stasiun bawah tanah Metro. Dapat diperhatikan pada Gambar 2.10, PSD yang diintegrasikan pada stasiun bawah tanah Metro Sunny Bay – Hongkong.

Selain sebagai pengaman untuk mencegah terjadinya kecelakaan terhadap penumpang, PSD juga berfungsi untuk memungkinkan kereta memasuki stasiun (*platform*) pada kecepatan yang lebih tinggi (yang pada akhirnya akan meningkatkan kecepatan rata – rata/keseluruhan kereta), mengurangi tekanan udara yang disebabkan oleh kereta, memperkecil beban pendinginan pengkondisi

udara pada cuaca yang panas, mencegah penumpang untuk membuang sampah pada lintasan kereta yang pada akhirnya akan tercegahnya kebakaran pada lintasan kereta.



Gambar 2.9. stasiun bawah tanah MRT LRT7 Quezon Memorial Underground Station – Filipina



Gambar 2.10. PSD yang diintegrasikan pada stasiun bawah tanah Metro Sunny Bay, Hongkong

### **2.3. Beberapa peristiwa kebakaran pada sistem transportasi bawah tanah**

Telah disebutkan sebelumnya secara singkat, pada bab 1.1, beberapa peristiwa kebakaran yang pernah terjadi pada sistem transportasi bawah tanah, khususnya yang berkaitan dengan jalur kereta bawah tanah. Pada bagian ini, akan dijelaskan secara komprehensif peristiwa kebakaran sistem transportasi bawah tanah atau terowongan yang pernah terjadi sebelumnya.

#### **2.3.1. Stasiun Jungangno (Daegu – Korea)**

Kebakaran pada stasiun Jungangno, Daegu – Korea, terjadi pada tanggal 18 Februari 2003 dan disebabkan secara sengaja oleh pria berumur 56 tahun yang membawa dua kotak susu dari bahan karton yang berisikan cairan mampu bakar (mungkin tiner cat atau gasoline sekitar 4 liter, referensi [21]) di dalam tasnya dengan kemudian memantik cairan mampu bakar tersebut dengan menggunakan korek api. Dua menit kemudian api sudah menyebar ke 6 gerbong. Operator kereta yang bertugas saat itu, gagal menginformasikan kebakaran secepatnya ke petugas stasiun. Keadaan diperparah dengan api yang menyebar ke kereta sebelahnya yang tiba pada stasiun beberapa menit kemudian setelah kebakaran terjadi. Menyebarnya api ke kereta di sebelahnya mengatakan secara tidak langsung bahwa rel kereta pada stasiun yang berdekatan atau tidak dipisahkan dengan peron dapat menyebabkan ukuran api yang semakin besar, relatif terhadap penyebarannya dan kandungan material mampu bakar di dalam kereta.

Kebakaran terjadi pada sekitar pukul 9.53 (waktu Korea) dan baru padam pada sekitar pukul 13.25 waktu Korea. Berdasarkan referensi [20], korban meninggal berjumlah 198 dengan 147 korban cedera atau luka parah.

#### **2.3.2. Stasiun King's Cross (London – Inggris)**

Pada 18 November 1987, peristiwa kebakaran stasiun King's Cross, London – Inggris terjadi sekitar pukul 19.25 waktu London. Diprediksi, pemicunya adalah korek api menyala yang terjatuh dan membakar akumulasi lemak dan detritus di bawah tangga (referensi [20]). Kebakaran dapat dipadamkan sekitar 4 jam kemudian oleh petugas pemadam kebakaran. Detail kejadian dapat diperoleh pada referensi [20].

Proses pemadaman yang lambat, salah satunya juga disebabkan olehantisipasi yang buruk dan lambat dari petugas stasiun terhadap gejala awal kebakaran ditambah dengan penyebaran asap dan bahaya panas yang menghambat proses penyelamatan dan pemadaman oleh petugas kebakaran (referensi [1]).

Dari periode tahun 1976 sampai 1987, terdapat sembilan kebakaran yang diindikasikan oleh korek api menyala yang dibuang sembarangan. Oleh karena itu, peristiwa kebakaran ini, yang menyebabkan 31 korban jiwa dan sekitar 100 luka – luka, mengawali tindakan pembaharuan terhadap material – material yang mampu bakar (seperti kayu) pada stasiun dengan material yang tidak mampu bakar.

### **2.3.3. Kaprun (Austria)**

Terowongan pada Kaprun – Austria merupakan penghubung antara Kaprun dengan Kitzsteinhorn yang bertujuan untuk mengantarkan para pemain ski ke gletser Kitzsteinhorn. Perjalanan dari Kaprun menuju gletser Kitzsteinhorn, melalui terowongan Kaprun, menanjak dengan gradien kira – kira sebesar  $43^{\circ}$  (referensi [1]). Panjang terowongan sebesar 3300 m dengan luas penampang sirkular berdiameter 3.4 – 3.6 m. Bencana kebakaran pada terowongan Kaprun terjadi pada 11 November 2000.

Sumber kebakaran terdapat pada kabin bagian belakang yang disebabkan oleh fan radiator yang tersumbat (sehingga terjadilah pemanasan berlebih pada fan) dan memicu pembakaran pada oli hidrolik yang bocor (referensi [1]). Dikarenakan kebakaran yang terjadi, kereta berhenti setelah berjalan 600 m di dalam terowongan.

Korban jiwa dari peristiwa kebakaran ini adalah sebanyak 155 dengan 12 penumpang yang berhasil menyelamatkan diri. Penumpang lain, sebanyak 155 orang, memilih untuk melarikan diri dengan menanjak ke atas sejauh, kurang lebih, 2700 m menuju gletser Kitzsteinhorn dikarenakan ancaman panas pada bagian belakang kabin kereta yang berperan sebagai sumber kebakaran. Namun, mengingat gradien yang sebesar  $43^{\circ}$ , peristiwa kebakaran pada terowongan ini merepresentasikan pergerakan asap pada cerobong asap sederhana. Sehingga menyebabkan penumpang yang melarikan diri, dengan menanjaki terowongan, mati oleh efek toksik dari asap hasil proses pembakaran. Sedangkan 12

penumpang yang berhasil melarikan diri dalam kondisi hidup adalah mereka yang memilih untuk menuruni terowongan dan melewati kabin belakang (sumber kebakaran) dengan melalui tangga terjal selebar 0.7 m yang didesain untuk petugas terowongan. Disebutkan pada referensi [1] bahwa kebakaran pada terowongan Kaprun diprediksi sebesar 15 – 50 MW, dengan mempertimbangkan material mampu bakar yang mungkin terdapat pada kereta serta ventilasi pada terowongan.

#### **2.3.4. Baku (Azerbaijan)**

Bencana kebakaran yang terjadi pada lintasan bawah tanah Baku, terjadi pada tanggal 28 Oktober 1995. Kebakaran terjadi pada lintasan bawah tanah yang menghubungkan stasiun Uldus dan Narimanov, dengan sumber kebakaran yang terdapat pada kereta yang berangkat dari Uldus.

Kereta bawah tanah yang menjadi sumber kebakaran mempunyai panjang sebesar 100 m, dengan terdiri dari 5 kabin yang masing – masing sepanjang 19.2 m. Kebakaran dipicu oleh kegagalan elektrik pada kabin keempat kereta. Sistem ventilasi yang terdapat pada kereta menyebabkan asap hasil kebakaran pada kabin keempat terhisap ke kabin kelima, sehingga penumpang pada kabin kelima yang menyadari adanya kebakaran. Hal ini menyebabkan masinis kereta sedikit lambat untuk menyadari adanya kebakaran dan memberhentikan kereta 200 m dari stasiun Uldus.

Pada awal peristiwa kebakaran, sistem ventilasi longitudinal dioperasikan mengarah dari Narimanov menuju Uldus. Hal ini menyebabkan kebakaran pada kabin keempat menyebar menuju kabin kelima. Disebutkan pada referensi [1], bahwa 20 menit setelah kereta berhenti, laju produksi kalor maksimum pada kebakaran di kabin keempat tercapai. Dengan 30 – 45 menit setelah kereta berhenti, laju produksi kalor maksimum untuk kabin keempat dan kelima tercapai dan mencapai nilai, kurang – lebih, sebesar 100 MW.

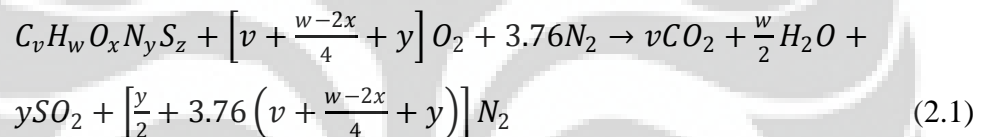
Beberapa saat pada fase perkembangan api, sistem ventilasi longitudinal berubah arah, yang semula dari Narimanov menuju Uldus, menjadi sebaliknya. Hal ini menyebabkan substansi toksik hasil pembakaran ataupun material yang baru mengalami penguapan parsial, bergerak searah dengan pergerakan evakuasi

penumpang. Disebutkan pada referensi [20], bahwa kebakaran pada peristiwa ini menyebabkan 289 orang meninggal dan 256 orang luka berat.

Berdasarkan penjelasan di atas dan rekaman kejadian kebakaran lainnya, banyaknya korban jiwa yang meninggal disebabkan oleh pergerakan asap yang tidak dapat ditekan sehingga mengurangi kemampuan evakuasi penumpang melalui bahaya toksik, iritan, dan panas yang dibawa oleh asap.

#### 2.4. Pembakaran bahan bakar cair

Pada dasarnya, pembakaran merupakan reaksi oksidasi antara bahan bakar dengan oksidator yang difasilitasi oleh panas sebagai pemicu, sehingga terproduksi energi panas, nyala api (atau pijaran untuk beberapa material), dan gas – gas hasil pembakaran. Dapat diperhatikan pada persamaan 2.1, contoh reaksi pembakaran dengan udara pada kondisi stoikiometrik, khusus untuk substansi bahan bakar yang mengandung Karbon, Hidrogen, Oksigen, Nitrogen, dan Sulfur.



Relevan dengan studi yang dilakukan, yang akan dibahas pada bagian ini adalah fenomena pembakaran khusus untuk bahan bakar cair. Fenomena pembakaran yang terjadi pada bahan bakar cair dikategorikan menjadi dua kelompok berdasarkan geometri bahan bakar yang terbakar, yaitu *pool fire* dan *spill fire*.

Dikatakan *pool fire*, pada saat kebakaran terjadi pada bahan bakar yang tergenang dengan kedalaman lebih daripada 1 cm dan disertai penyebaran fisiknya yang dibatasi oleh suatu wadah tertentu. Misalnya pembakaran bahan bakar cair yang terdapat pada tanki, botol, kaleng, dan lain – lain. Sedangkan *spill fire* adalah pembakaran yang terjadi pada bahan bakar yang tertumpah pada suatu substrat (contohnya lantai, beton, air), disertai dengan penyebaran fisiknya yang tidak dibatasi oleh suatu wadah tertentu.

Langkah – langkah yang dilakukan dalam evaluasi pembakaran bahan bakar cair adalah menentukan ukuran bahan bakar, pertumbuhan api, dan ukuran api. Pada *pool fire*, geometri bahan bakar yang terbakar dapat dengan mudah diperoleh berdasarkan geometri wadah yang menampungnya. Sedangkan pada

*spill fire*, banyak parameter yang harus dipertimbangkan. Antara lain adalah sumber pelepasan bahan bakar, waktu dan titik pengapian, dan permukaan tempat bahan bakar tertumpah. Oleh karena itu, estimasi kedalaman bahan bakar ( $\delta$ ) untuk *spill fire* diperlukan. Penjelasan empiris yang mendetail, mengenai *spill fire* dan *pool fire*, dapat dilihat pada referensi [12].

#### 2.4.1. Ukuran bahan bakar *spill* dan *pool*

Disampaikan pada literatur [12], berdasarkan data – data yang terbatas untuk *spill fire*, pada saat diperlukan untuk memperkirakan ukuran api maksimum, aproksimasi bahwa luas penampang api adalah 155% luas penampang bahan bakar dapat digunakan. Hal ini disebabkan oleh pengamatan Gottuk et al. dan Chambers (literatur [12]) yang menyatakan, bahwa setelah dilakukan pengapian pada bahan bakar, api meningkatkan luas penampang bahan bakar, 22 sampai 89% untuk volume pelepasan bahan bakar sebesar 2 sampai 190 l. Implikasi dari fenomena ini menyatakan bahwa luas penampang api yang diakibatkan oleh bahan bakar yang tertumpah (*spill*) akan lebih besar dibandingkan luas penampang bahan bakar sebelum dilakukan pengapian.

$$A_f = 1.55A_s \quad (2.2)$$

Berdasarkan data – data yang ada, mengenai *spill fire*, dan disampaikan dengan mendetail pada literatur [12], pendekatan konservatif dapat digunakan dengan mempertimbangkan bahwa kedalaman minimum bahan bakar akan menghasilkan luas maksimum permukaan bahan bakar. Pendekatan konservatif ini didasari oleh Gambar 2.12 yang merupakan resiprokal dari Gambar 2.11. Pada Gambar 2.12, ditunjukkan bahwa untuk volume bahan bakar yang kecil (< 8 liter), kedalaman bahan bakar untuk berbagai fluida (JP – 4, JP – 8, 6% AFF, dan air) sangat bervariasi. Hal ini disebabkan oleh ketinggian sumber fluida, sifat permukaan substrat<sup>6</sup> (misal porositas dan kekasaran), dan sifat fluida (misal kekentalan dan tegangan permukaan) yang sangat berpengaruh untuk volume pelepasan bahan bakar yang kecil (kira – kira < 7.6 liter). Sedangkan untuk volume bahan bakar yang lebih besar lagi, nilai resiprokal  $\delta$  untuk berbagai fluida cenderung untuk menuju nilai minimum yang sama, yaitu nilai yang mewakili

---

<sup>6</sup> Merupakan tempat bahan bakar ditumpahkan

ketebalan antara 2.8 mm sampai 4 mm untuk volume pelepasan bahan bakar > 95 liter.

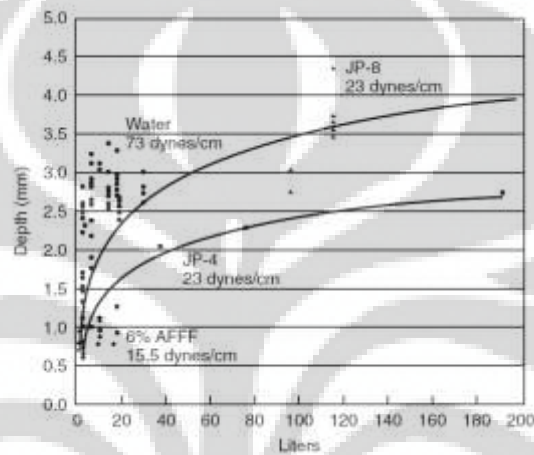
$$\text{Spill} < 95 \text{ l (25 gal)} \quad \delta = 0.7 \text{ mm}$$

$$\text{Spill} > 95 \text{ l (25 gal)} \quad \delta = 2.8 \text{ mm}$$

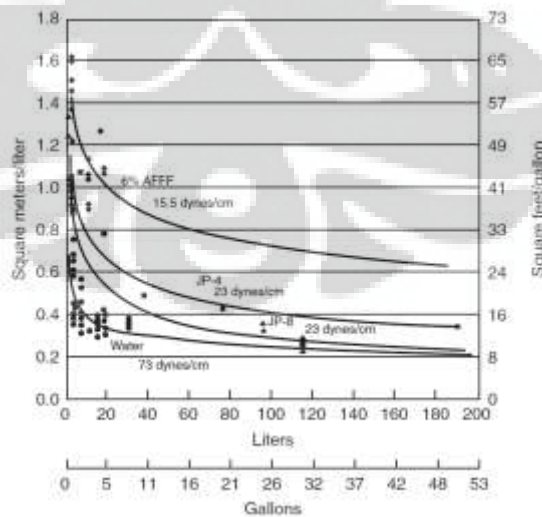
Dengan menggunakan persamaan resiprokal dari kedalaman bahan bakar ( $\delta$ ), maka

$$\text{Spill} < 95 \text{ l (25 gal)} \quad A/V = 1.4 \text{ m}^2/\text{l (57 ft}^2/\text{gal)}$$

$$\text{Spill} > 95 \text{ l (25 gal)} \quad A/V = 0.36 \text{ m}^2/\text{l (14.5 ft}^2/\text{l)}$$



Gambar 2.11. Grafik kedalaman bahan bakar berdasarkan volume pelepasan bahan bakar untuk JP – 4, JP – 8, 6% AFFF, dan air (literatur [12])



Gambar 2.12. Resiprokal dari grafik pada Gambar 2.11 (literatur [12])

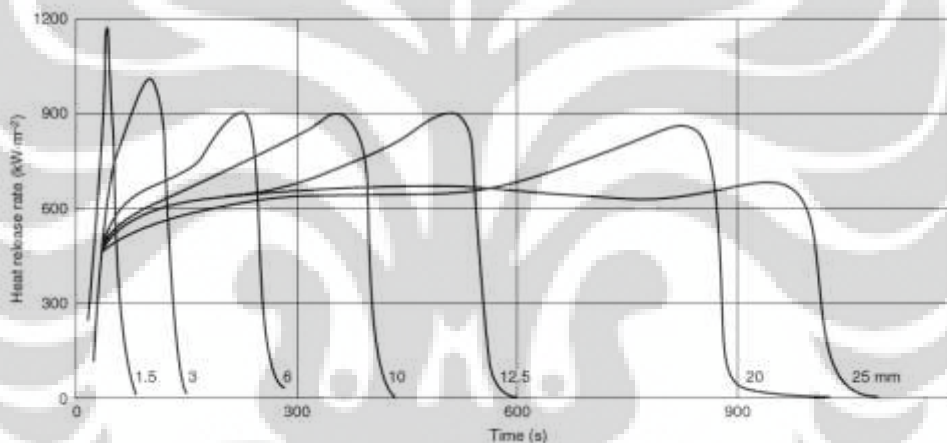


#### 2.4.2. Laju produksi kalor (HRR)

Ukuran dari api dapat direpresentasikan oleh besarnya laju produksi kalor atau *heat release rate* (HRR). Dapat diperhatikan pada persamaan 2.3, bahwa HRR ( $\dot{Q}$ ) tergantung pada besar laju pembakaran massa ( $\dot{m}$ ) dan entalpi pembakaran ( $\Delta h_c$ ). Dengan  $\dot{m}$  yang dapat juga diekspresikan berdasarkan persamaan 2.4 dan 2.5, dimana  $A$ ,  $\dot{m}''$ ,  $\dot{y}$ , dan  $\rho$  adalah luas penampang api, laju pembakaran massa per satuan luas, laju regresi pembakaran bahan bakar, dan densitas bahan bakar.

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h_c \quad (2.3)$$

Berdasarkan literatur [12] dan [13], disebutkan bahwa  $\dot{m}''$ ,  $\dot{y}$ , dan  $\Delta h_c$ , sampai saat ini merupakan parameter berbasis empiris. Dapat diperhatikan pada Gambar 2.13, HRR untuk PMMA pada berbagai ketebalan (mm).



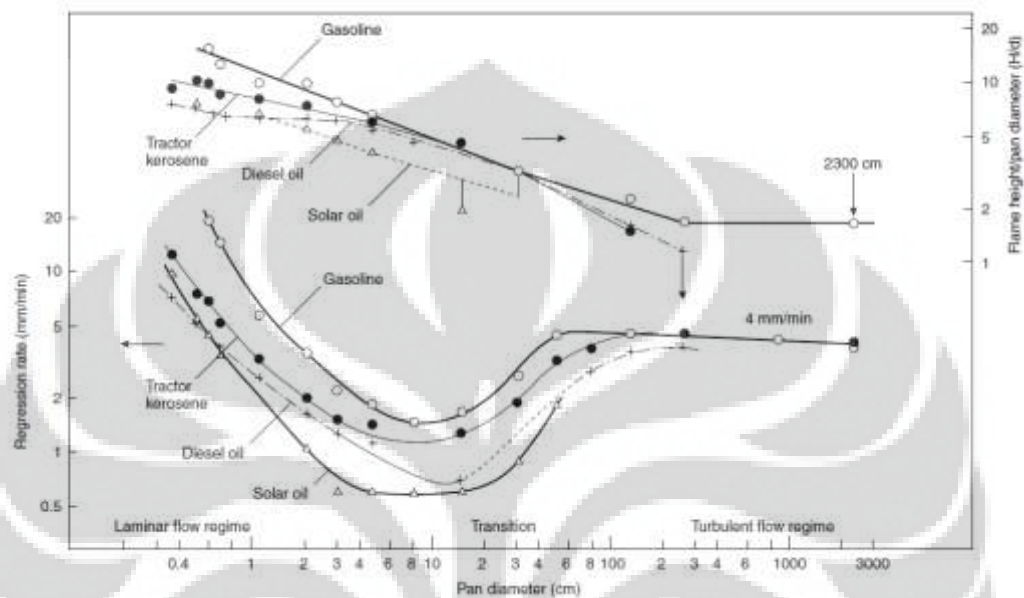
Gambar 2.13. Kurva HRR berdasarkan waktu untuk material PMMA pada berbagai ketebalan (mm) (literatur [13])

Laju regresi bahan bakar adalah laju permukaan bahan bakar menurun pada arah vertikal pada saat pembakaran terjadi. Dapat diperhatikan pada Gambar 2.14, laju regresi dan normalisasi tinggi api untuk beberapa bahan bakar berdasarkan diameter wadah bahan bakar.

Berdasarkan Gambar 2.14, dapat diperhatikan bahwa laju regresi sangat bervariasi (namun memiliki pola yang sama) untuk diameter wadah kurang dari 1 m. Namun, untuk diameter yang lebih besar dari pada 1 m, laju regresi cenderung untuk menuju nilai konstan,  $\dot{y}_{max}$ .

Zebetakis dan Burgess (1961), seperti yang disampaikan pada literatur [12], menunjukkan bahwa laju pembakaran massa untuk diameter wadah lebih besar dari 0.2 m dan lebih kecil dari 1 m, dapat diekspresikan dalam bentuk seperti yang ditunjukkan persamaan 2.4.

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{max} [1 - \exp(-k\beta D)] \quad (2.4)$$



Gambar 2.14. Laju regresi dan normalisasi tinggi api untuk beberapa bahan bakar berdasarkan diameter wadah bahan bakar (literatur [13])

Sedangkan jika wadah bahan bakar tidak berbentuk lingkaran, maka diameter efektif dapat digunakan untuk menghitung laju massa pembakaran pada persamaan 2.4. Dimana diameter efektif diekspresikan oleh persamaan 2.5. Dengan A dan D adalah luas penampang wadah bahan bakar dan diameter efektif, secara berurutan.

$$D = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Seperti yang telah disampaikan sebelumnya, dan juga telah ditunjukkan dari Gambar 2.13, bahwa laju pembakaran massa dan entalpi pembakaran bervariasi terhadap waktu. Sebagai pendekatan konservatif untuk menghitung waktu pembakaran, entalpi pembakaran dapat diasumsikan sebagai konstan dan pembakaran dapat diasumsikan terjadi pada laju pembakaran massa maksimumnya (atau sesuai dengan persamaan 2.4 untuk  $0.2 \text{ m} < D < 1 \text{ m}$ ) selama bahan bakar mengalami reaksi oksidasi. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada

persamaan 2.6 dimana waktu pembakaran ( $t_b$ ) tergantung pada volume bahan bakar ( $V$ ), densitas ( $\rho$ ), laju pembakaran massa ( $\dot{m}''$ ), dan luas penampang wadah ( $A$ ).

$$t_b = \frac{V\rho}{\dot{m}'' A} \quad (2.6)$$

## 2.5. Sifat dan produksi asap

Pada bagian ini, akan coba untuk dijelaskan mengenai sifat dan produksi asap yang relevan terhadap fokus skripsi ini yang lebih menekankan pembahasan mengenai dampak dari bahaya asap yang disebabkan oleh kebakaran. Efek dari asap yang diproduksi oleh api tergantung pada jumlah dan sifat asap yang dihasilkan. Berdasarkan literatur [14], asap yang dihasilkan dari pembakaran yang menghasilkan nyala api cenderung memiliki elemen karbon (grapit) yang lebih banyak. Disebutkan juga bahwa walaupun saat ini tidak memungkinkan untuk memprediksi emisi asap berdasarkan sifat kimia bahan bakar dan kondisi pembakaran, telah diketahui bersama bahwa polimer aromatik, seperti polystyrene, memproduksi lebih banyak asap dibandingkan hidrokarbon yang hanya memiliki ikatan karbon – karbon tunggal, seperti polypropylene.

Telah disinggung bahwa kondisi pembakaran yang menghasilkan emisi asap adalah *flaming*<sup>7</sup>, pirolisis, dan *smoldering* (bara). Pembakaran *flaming* cenderung menghasilkan asap yang memiliki lebih banyak elemen karbon (grapit). Sedangkan pada pirolisis, pembakaran terjadi dikarenakan adanya fluks panas eksternal yang meningkatkan temperatur pada permukaan bahan bakar. Uap yang dihasilkan dari meningkatnya temperatur pada permukaan bahan bakar dapat meliputi monomer bahan bakar, produk pembakaran yang hanya mengalami oksidasi parsial, dan rantai polimer. Selama uap mengalir ke atas, uap dengan tekanan yang rendah dapat berkondensasi dan membentuk *droplet*<sup>8</sup> asap yang memiliki warna terang. Pada kasus pembakaran membara (*smoldering*), *droplet* asap juga terbentuk dan mempunyai tipikal temperatur antara 600 sampai 1100 K. Beberapa material yang dapat mengalami pembakaran membara meliputi material selulosa (kayu, kertas, dan lain – lain) dan busa polyurethane fleksibel . Dapat

<sup>7</sup> Merupakan kondisi pembakaran yang menghasilkan nyala api

<sup>8</sup> Terjemahan: titik kecil. Dapat diartikan sebagai titik - titik kecil yang dibentuk oleh terkondensasinya uap – uap bertekanan kecil hasil dari pirolisis, khusus untuk *droplet* asap

diperhatikan pada tabel 2.3, faktor konversi asap ( $\epsilon$ ) untuk beberapa material yang sering ditemui pada bangunan. Dimana  $\epsilon$  merupakan fraksi antara massa asap dengan massa dari bahan bakar yang terbakar.

Tabel 2.3 diambil dari referensi 2.3 dan penjelasan mendetail mengenai kondisi pembakaran untuk setiap material terdapat pada referensi – referensi yang disebutkan pada referensi [14]. Kondisi – kondisi pembakaran ini meliputi pengukuran pada rentang fluks radiasi tertentu, konsentrasi oksigen, orientasi benda uji, dan temperatur lingkungan.

Tabel 2.3. Nilai  $\epsilon$  untuk beberapa material (diambil dari referensi [14])

Type	Smoke Conversion Factor, $\epsilon$	Combustion Conditions	Fuel Area, m <sup>2</sup>
Douglas fir	0.03–0.17	Pyrolysis	0.005
Douglas fir	< 0.01–0.025	Flaming	0.005
Hardboard	0.0004–0.001	Flaming <sup>a</sup>	0.0005
Fiberboard	0.005–0.01	Flaming <sup>a</sup>	0.0005
Polyvinylchloride	0.03–0.12	Pyrolysis	0.005
Polyvinylchloride	0.12	Flaming	0.005
Polyurethane (flexible)	0.07–0.15	Pyrolysis	0.005
Polyurethane (flexible)	< 0.01–0.035	Flaming	0.005
Polyurethane (rigid)	0.06–0.19	Pyrolysis	0.005
Polyurethane (rigid)	0.09	Flaming	0.005
Polystyrene	0.17 ( $m_{O_2} = 0.30$ ) <sup>b</sup>	Flaming	0.0005
Polystyrene	0.15 ( $m_{O_2} = 0.23$ )	Flaming	0.07
Polypropylene	0.12	Pyrolysis	0.005
Polypropylene	0.016	Flaming	0.005
Polypropylene	0.08 ( $m_{O_2} = 0.23$ )	Flaming	0.007
Polypropylene	0.10 ( $m_{O_2} = 0.23$ )	Flaming	0.07
Polymethylmethacrylate	0.02 ( $m_{O_2} = 0.23$ )	Flaming	0.07
Polyoxymethylene	~0	Flaming	0.007
Cellulosic insulation	0.01–0.12	Smoldering	0.02

Pada dasarnya, terdapat dua tinjauan penting mengenai sifat dan produksi asap. Dua tinjauan ini adalah distribusi ukuran asap dan sifat asap itu sendiri. Sifat asap dipengaruhi oleh distribusi ukurannya, yang pembahasan empiris secara ringkas dapat dilihat pada referensi [14].

Sifat dari asap yang utama dan penting adalah *light extinction*<sup>9</sup>, visibilitas, dan deteksi. Sifat asap yang paling sering diamati adalah koefisien *light extinction*. Hal ini dapat direpresentasikan oleh Hukum Bouguer yang dapat diperhatikan pada persamaan 2.7. Dengan  $I_0^\lambda$ ,  $I_\lambda$ ,  $L$ , dan  $K$  adalah, masing – masing, intensitas cahaya monokromatik dengan panjang gelombang  $\lambda$ , intensitas

<sup>9</sup> Terjemahan : peniadaan cahaya. Singkatnya, adalah kemampuan dari asap untuk mengurangi intensitas cahaya yang melewatinya.

cahaya yang ditransmisikan sejauh  $L$ , panjang lintasan intensitas, dan koefisien *light extinction*.

$$\frac{I_\lambda}{I_0^\lambda} = e^{-KL} \quad (2.7)$$

Dengan mengekspresikan persamaan 2.7 dalam basis 10 dan  $D = K/2.3$ , maka persamaan 2.7 dapat diekspresikan seperti pada persamaan 2.8. Dengan  $D$  adalah densitas optik per satuan panjang (meter).

$$\frac{I_\lambda}{I_0^\lambda} = 10^{-DL} \quad (2.8)$$

Pada persamaan 2.7 dan 2.8,  $K$  diekspresikan sebagai parameter ekstensif. Koefisien *light extinction* per satuan massa,  $K_m$ , dapat digunakan untuk mengekspresikan koefisien *light extinction* sebagai parameter intensif. Dengan  $m$  adalah konsentrasi massa dari asap aerosol, maka,

$$K = K_m m \quad (2.9)$$

Penjelasan empiris mengenai koefisien *light extinction* dapat dilihat pada referensi [14].

Disebutkan juga pada referensi [14], parameter yang sangat berguna dalam menghitung banyaknya jumlah asap terlihat yang diproduksi oleh api. Parameter tersebut adalah densitas optik spesifik ( $D_s$ ) dan densitas optik massa ( $D_m$ ). Parameter ini dapat diperhatikan pada persamaan 2.10 dan persamaan 2.11. Dengan  $D$  adalah densitas optik,  $V_c$  = volume ruang,  $A$  = luas penampang bahan bakar, dan  $\Delta M$  = rugi massa bahan bakar. Dapat dilihat pada lampiran 1, nilai densitas optik spesifik dan densitas optik massa yang diambil dari referensi [14].

$$D_s = \frac{DV_c}{A} \quad (2.10)$$

$$D_m = \frac{DV_c}{\Delta M} \quad (2.11)$$

Pendekatan yang kedua dalam mendefinisikan sifat asap adalah visibilitas. Visibilitas pada suatu objek dapat dikatakan sebagai jarak pada saat kontras untuk objek tersebut telah mencapai nilai batas sebesar -0.02. Kontras dapat diekspresikan seperti pada persamaan 2.12. Dengan  $B$  adalah pencahayaan objek dan  $B_0$  yang adalah pencahayaan latar. Nilai -0.02 merupakan nilai batas visibilitas dari suatu objek yang diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.12 untuk objek hitam dengan latar putih pada kondisi pencahayaan lingkungan siang hari.

$$C = \frac{B}{B_0} - 1 \quad (2.12)$$

Berdasarkan penelitian oleh Jin, yang disebutkan pada referensi [14], Hubungan antara visibilitas (S) dan koefisien *light extinction* (K) dapat diekspresikan berdasarkan persamaan 2.13 dan 2.14, masing – masing untuk objek yang mengeluarkan cahaya dan objek yang memantulkan cahaya.

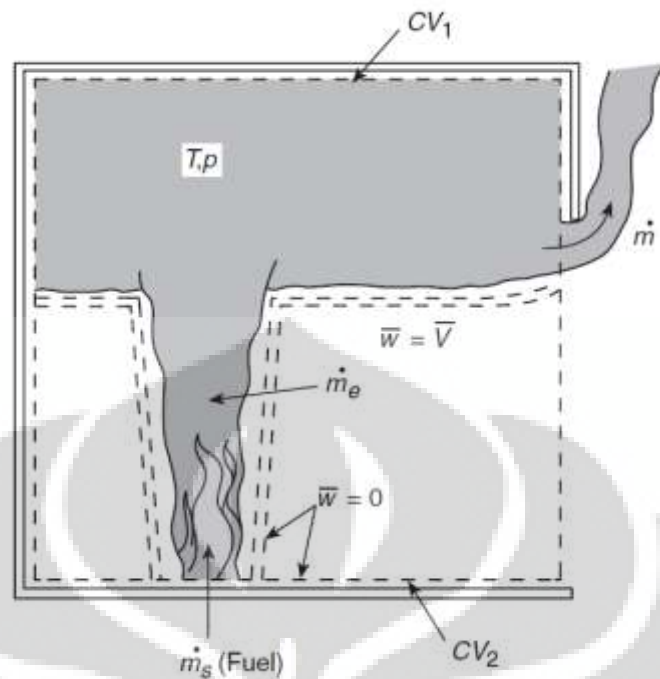
$$KS = 8 \quad (2.13)$$

$$KS = 3 \quad (2.14)$$

## 2.6. Model kebakaran zona

Kebakaran pada suatu kompartemen sederhana dapat dimodelkan relevan terhadap model kebakaran zona yang dibahas secara ringkas dan padat pada referensi [10]. Inti dari kebakaran zona adalah memodelkan suatu kebakaran pada kompartemen berdasarkan dua zona. Kedua zona ini direpresentasikan sebagai volume kontrol yang ada karena disebabkan oleh adanya stratifikasi temperatur akibat adanya kebakaran (Gambar 2.15). Api dimodelkan sebagai sumber energi dan massa yang juga berperan, seakan – akan, sebagai pompa, yang dikarenakan gaya apung pada aliran hasil pembakaran, memindahkan massa pada zona dibawahnya ke zona atas melalui proses yang disebut sebagai *entrainment*.

Dapat diperhatikan pada Gambar 2.15, pembagian zona dalam pemodelan zona kebakaran pada kompartemen. Dimana  $CV_1$  adalah zona bagian atas yang meliputi api serta produk hasil pembakarannya dan  $CV_2$  yang merupakan gas – gas selain hasil pembakaran pada kompartemen. Inti dari pemodelan ini adalah dengan mengaplikasikan persamaan – persamaan konservasi pada tiap volume kontrol ( $CV_1$  dan  $CV_2$ ). Dapat diperhatikan pada persamaan 2.15, 2.16, dan 2.17, persamaan konservasi massa, spesies, dan energi yang dituliskan kembali dari referensi [10].



Gambar 2.15. Model kebakaran zona (referensi [10])

$$A \frac{d}{dt} (\rho z_l) + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j = 0 \quad (2.15)$$

$$\rho z_l A \frac{dY_i}{dt} + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (Y_{ij} - Y_i) = \dot{\omega}_i \quad (2.16)$$

$$\rho c_p z_l A \frac{dY_i}{dt} - z_l A \frac{dp}{dt} + c_p \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (T_j - T) = \dot{\omega}_F \Delta H - \dot{Q}_{net\ loss} \quad (2.17)$$

Dimana,

$\rho$  = densitas gas pada kontrol volume

$z_l$  = ketinggian zona

$Y_{ij}$  = konsentrasi massa spesies i yang meninggalkan volume kontrol melalui pola aliran j

$\dot{\omega}_i$  = laju produksi massa spesies karena pembakaran

$T$  = temperatur gas di dalam kontrol volume

$T_j$  = temperatur gas pada pola aliran j yang melintasi batasan volume kontrol

$\dot{Q}_{net\ loss}$  = laju neto rugi perpindahan panas pada kondisi batas

$\Delta H$  = entalpi pembakaran

$\dot{\omega}_F$  = laju reaksi bahan bakar

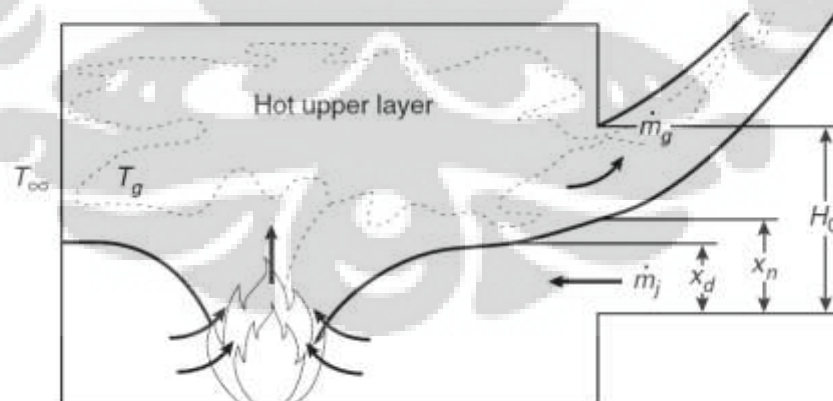
Model kebakaran zona juga digunakan oleh William D. Walton dan Philip H. Thomas (referensi [11]) sebagai basis dalam estimasi temperatur pada kebakaran kompartemen. Dapat diperhatikan model kebakaran kompartemen referensi [11] pada Gambar 2.16. Berdasarkan gambar ini dapat diekspresikan persamaan konservasi massa yang sesuai dengan persamaan 2.18. Dimana  $\dot{m}_g$ ,  $\dot{m}_f$ , dan  $\dot{m}_a$  adalah laju massa gas keluar kompartemen, laju massa bahan bakar terbakar, laju massa udara masuk ke dalam kompartemen.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_f + \dot{m}_a \quad (2.18)$$

Rocket, sebagaimana yang dituliskan kembali pada referensi [11], mendefinisikan laju massa gas keluar dan laju massa udara masuk ke dalam kompartemen seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.19 dan 2.20. Dengan beberapa variabelnya yang dapat diperhatikan pada Gambar 2.16 dan beberapa variabel seperti  $C_d$ ,  $W_0$ ,  $H_0$ ,  $\rho_\infty$ , dan  $g$  yang adalah koefisien penyempitan *orifice* (tipikal = 0.7), lebar bukaan (m), tinggi bukaan (m), kerapatan udara lingkungan ( $\text{kg/m}^3$ ), dan percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ ).

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_0 \rho_\infty \left[ 2g \frac{T_\infty}{T_g} \left( 1 - \frac{T_\infty}{T_g} \right) \right]^{1/2} (H_0 - X_N)^{2/3} \quad (2.19)$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W_0 \rho_\infty \left[ 2g \left( 1 - \frac{T_\infty}{T_g} \right) \right]^{1/2} (X_N - X_d)^{1/2} \left( X_N + \frac{X_d}{2} \right) \quad (2.20)$$



Gambar 2.16. Model kebakaran zona pada referensi [11]

Disebutkan dalam referensi [11], bahwa untuk kondisi kebakaran sesudah *flashover* atau mendekati *flashover*, laju massa udara masuk dapat diestimasi melalui persamaan 2.31. Dengan  $A_o$  yang adalah luas penampang bukaan.



$$\dot{m}_a = 0.5A_o\sqrt{H_o} \quad (2.21)$$

Pada referensi [11], disampaikan beberapa metode – metode kalkulasi yang dapat digunakan untuk memprediksi temperatur pada saat fase sebelum dan sesudah *flashover*. Metode – metode ini tidak akan dijelaskan pada bagian ini dan akan digunakan serta dijelaskan dengan singkat pada saat diperlukan.

## 2.7. Fluks panas api

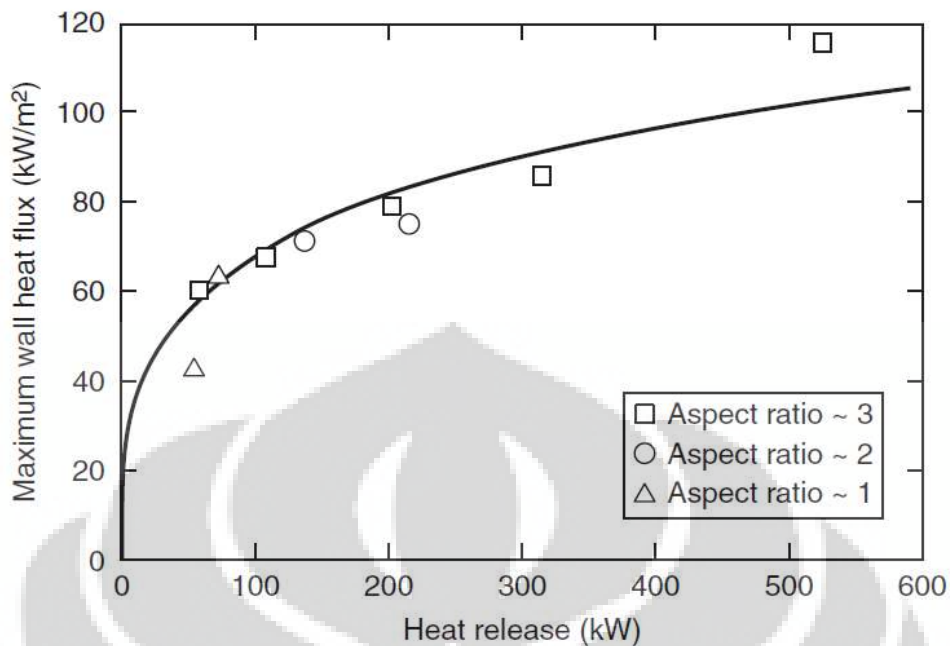
Pada bagian ini, akan disampaikan dengan singkat mengenai fluks panas yang dihasilkan oleh api ke permukaan yang berada di sekitar lokasi api. Beberapa persamaan empiris untuk berbagai geometri permukaan dan kondisi api dapat diperoleh dari referensi [15]. Berdasarkan Beck et al, yang dituliskan kembali pada referensi [15], fluks panas maksimum,  $q''_{peak}$  ( $\frac{kW}{m^2}$ ), pada dinding dengan geometri dimana api berdekatan dengan dinding dapat diekspresikan seperti pada persamaan 2.22. Dengan  $\dot{Q}$  adalah HRR api (kW).

$$q''_{peak} = 200 \left[ 1 - \exp\left(-0.09\dot{Q}^{\frac{1}{3}}\right) \right] \quad (2.22)$$

Persamaan 2.22 didasari oleh pengamatan dari Beck et al yang mengevaluasi distribusi fluks panas untuk nilai HRR api dari 50 kW sampai 520 kW. Dapat dilihat pada Gambar 2.17, fluks panas maksimum pada dinding untuk geometri yang telah disebutkan sebelumnya yang diperoleh pada rentang HRR dari 50 kW sampai 520 kW.

Fluks panas maksimum diukur/diestimasi berada di sekitar bagian bawah api ( $z/L_f \leq 0.4$ ) berdasarkan garis tengahnya. Dengan  $z$  yang adalah elevasi ketinggian dan  $L_f$  (m) yang merupakan panjang api. Merujuk kepada Heskestad (referensi [16]),  $L_f$  tergantung kepada diameter api (D (m)) dan HRR ( $\dot{Q}$  (kW)), seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.23.

Berdasarkan Gambar 2.18, fluks panas pada garis tengah api bervariasi dan mempunyai nilai yang akan semakin kecil pada saat  $z/L_f > 0.4$ . Hal ini direpresentasikan pada persamaan 2.24 – 2.26. Dengan  $q''_{cl}$  yang adalah fluks panas pada garis tengah api.



Gambar 2.17. Fluks panas maksimum pada dinding berdasarkan Back et al (referensi [15])

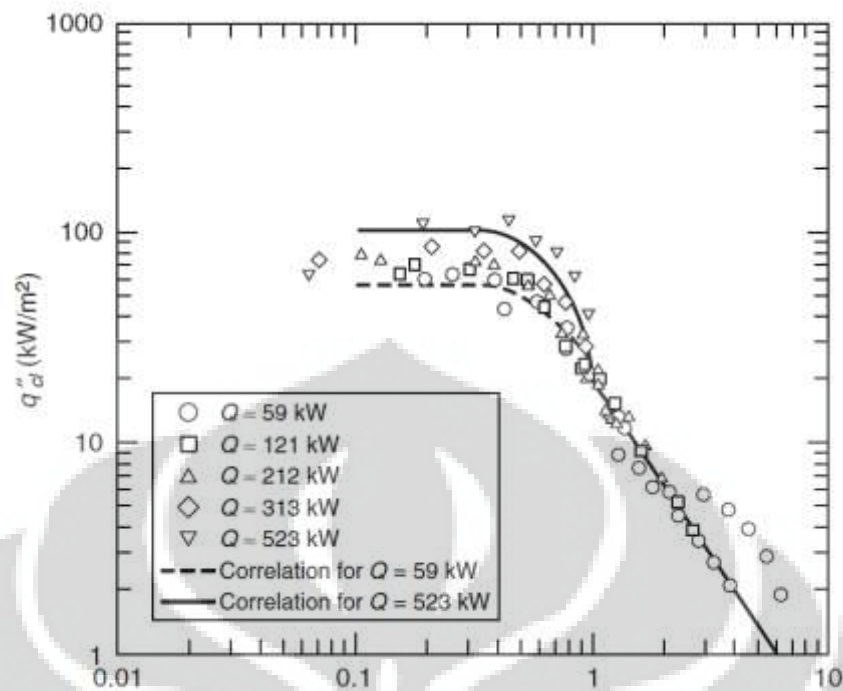
$$L_f = 0.23\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2.23)$$

$$q_{cl}'' = q_{peak}'' \quad z/L_f \leq 0.4 \quad (2.24)$$

$$q_{cl}'' = q_{peak}'' - \frac{5}{3} \left( \frac{z}{L_f} - \frac{2}{5} \right) (q_{peak}'' - 20) \quad 0.4 < z/L_f \leq 1 \quad (2.25)$$

$$q_{cl}'' = 20 \left( \frac{z}{L_f} \right)^{-5/3} \quad \frac{z}{L_f} > 1 \quad (2.26)$$

Setelah mempertimbangkan perubahan fluks dalam arah vertikal, perubahan fluks dalam arah horizontal dapat diekspektasi dengan menggunakan persamaan empiris yang diturunkan dari data eksperimen Back et al, yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Persamaan empiris tersebut dapat diperhatikan pada persamaan 2.27 dan 2.28. Dengan  $q''$  adalah fluks panas pada jarak horizontal dari api ( $x$ ) berdasarkan  $q_{cl}''$  pada  $z/L_f$  tertentu (persamaan 2.24 – 2.26).



Gambar 2.18. Fluks panas dalam arah vertikal pada garis tengah api berdasarkan referensi [15]

$$q'' = q''_{cl} \exp \left[ - \left( \frac{x}{0.5D} \right)^2 \right] \quad \frac{x}{0.5D} \leq 1 \quad (2.27)$$

$$q'' = 0.38 q''_{cl} \left( \frac{x}{0.5D} \right)^{-1.7} \quad \frac{x}{0.5D} > 1 \quad (2.28)$$

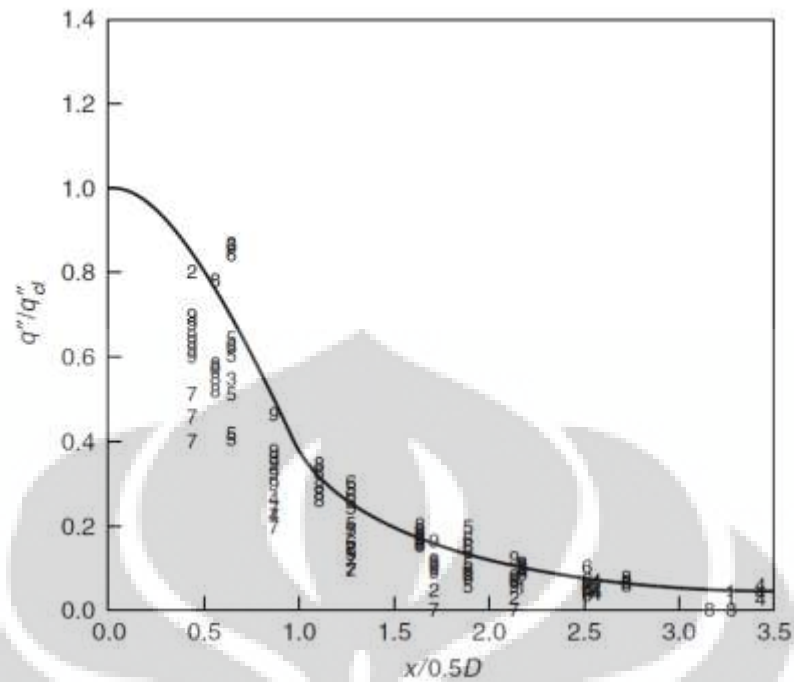
Dibahas juga secara ringkas pada referensi [15], persamaan empiris untuk mengestimasi fluks panas pada atap tidak – mampu – bakar berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Hasemi et al. Dengan HRR yang digunakan pada eksperimen diperkirakan sebesar 400 kW. Persamaan fluks panas api relevan terhadap atap dapat diperhatikan pada persamaan 2.29.

$$q'' = 518.8 e^{-3.7w} \quad (2.29)$$

dengan,

$$w = (r + H + z') / (L_H + H + z') \quad (2.30)$$

Dimana  $H$ ,  $r$ ,  $z'$ , dan  $L_H$ , masing – masing, adalah jarak antara api dengan atap, jarak radial titik atap dari api, lokasi sumber virtual, dan radius api.  $H$  dapat dihitung dengan mengurangi tinggi api dari tinggi atap. Dimana tinggi api,  $L_f = 3.5 Q_D^{*n} \cdot D$ , dengan,



Gambar 2.19. Distribusi fluks panas secara horizontal berdasarkan Back et al (referensi [15])

$$n = 2/5 \quad \text{pada } Q_D^* \geq 1.0$$

$$n = 2/3 \quad \text{pada } Q_D^* < 1.0$$

dan

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g} D^{5/2}} \quad (2.31)$$

Dengan demikian, fluks panas pada atap dapat diestimasi setelah mempertimbangkan parameter  $z'$ , yang pada referensi [15], diekspresikan sebagai,

$$z' = 2.4D(Q_D^{*2/3} - Q_D^{*2/5}) \quad Q_D^* < 1 \quad (2.32)$$

$$z' = 2.4D(1 - Q_D^{*2/5}) \quad Q_D^* \geq 1 \quad (2.33)$$

## 2.8. Fire Dynamic Simulator (FDS)

Secara singkat, FDS merupakan perangkat lunak yang beroperasi berdasarkan model komputasi dinamika fluida<sup>10</sup> untuk menyelesaikan persamaan – persamaan atur yang relevan dengan aliran massa, energi, dan momentum pada daerah komputasi, yang telah didiskritisasi, khusus untuk aliran fluida yang disebabkan adanya api. Secara numerik, FDS menyelesaikan persamaan Navier –

<sup>10</sup> CFD (Computational Fluid Dynamic)

Stokes untuk aliran yang terjadi karena adanya gradien termal pada kecepatan yang rendah dengan menitik – beratkan perhatian kepada asap dan perpindahan panas dari api.

Inti dari software ini adalah mensimulasikan suatu fenomena kebakaran dengan kondisi – kondisi batas yang sudah ditetapkan sebelumnya. Dapat diperhatikan pada Lampiran 2, pengaturan awal simulasi pada tipikal geometri stasiun bawah tanah. Penjelasan mendetail mengenai FDS dapat diperoleh dari referensi [6]. Sedangkan langkah – langkah untuk melakukan simulasi, secara singkat, dengan menggunakan FDS adalah sebagai berikut:

### 2.8.1. Pengaturan daerah komputasi

Pada langkah ini dilakukan penetapan dimensi komputasi dan volume diskrit. Volume diskrit adalah kontrol volume yang pada daerah ini diaplikasikan persamaan – persamaan atur diskrit, dan sering disebut sebagai *mesh* atau *cell*. Contoh pengaturan daerah komputasi dan volume diskrit adalah sebagai berikut:

```
"&MESH ID='MESH', IJK=151,118,78, XB=0.00,151.00,-1.00,21.30,0.00,15.45/"
```

Contoh di atas mengartikan bahwa daerah komputasi meliputi koordinat 0 m sampai 151 m pada sumbu x, -1 m sampai 21.3 m pada sumbu y, dan 0 m sampai 15.45 m pada sumbu z. Sedangkan “IJK=151,118,78” mengartikan bahwa pada sumbu x, y, dan z, masing – masing, dibagi menjadi 151, 118, dan 78 daerah diskrit, masing – masing pada arah x, y, dan z, yang disebut sebagai *mesh* atau *cell*. Dengan demikian ukuran dari daerah – daerah diskrit pada arah x, y, dan z dapat diperoleh dengan membagi ukuran daerah komputasi dengan banyaknya diskritisasi. Relevan terhadap contoh di atas, ukuran daerah diskrit (*cell*) pada arah x, y, dan z, masing – masing, adalah 1 m, 0.19 m, dan 0.2 m.

Ukuran dari daerah diskrit sangat berpengaruh terhadap keakuratan data – data yang dihasilkan dari simulasi. Dimana ukuran dari daerah diskrit dapat dihubungkan dengan diameter karakteristik api. Berdasarkan referensi [6], diameter karakteristik api diekspresikan dalam bentuk seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.34.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2.34)$$

Jika  $\delta x$  adalah ukuran daerah diskrit, maka rasio antara  $D^*$  dan  $\delta x$  menunjukkan seberapa besar resolusi terhadap aliran yang disebabkan oleh kebakaran.

### 2.8.2. Pengaturan geometri

Sebelum simulasi dilakukan, perlu dilakukan terlebih dahulu geometri dari benda padat yang ingin ditetapkan sebagai desain dari kompartemen atau gedung. Contoh pengaturan geometri adalah sebagai berikut:

```
"&OBST XB=0.00,151.00,0.00,20.30,0.00,1.50, COLOR='GRAY 60',
SURF_ID = 'BRICK' / Bottom Brick"
```

Contoh di atas mengartikan bahwa telah ditetapkan suatu obstruksi/geometri dengan dimensi pada arah x, y, dan z adalah 0 m sampai 151 m, 0 m sampai 20.3 m, dan 0 m sampai 1.5 m. "SURF\_ID = 'BRICK'" pada contoh di atas mengartikan bahwa obstruksi mempunyai permukaan dengan inisial 'BRICK', yang dimana pada permukaan ini telah ditetapkan material dari geometri tersebut. Sedangkan "Bottom Brick" hanya merupakan inisial dari geometri tersebut.

### 2.8.3. Pengaturan material dan permukaan geometri

Untuk menetapkan material dari suatu geometri padat, perlu ditetapkan terlebih dahulu permukaan yang akan berperan sebagai permukaan dari material tersebut. Jadi, permukaan yang akan berperan sebagai lapisan pada geometri, akan ditetapkan untuk terdiri dari material tertentu yang sudah ditetapkan. Berikut salah satu contoh penetapan brick disertai dengan sifat termofisiknya

```
&MATL ID='BRICK',
SPECIFIC_HEAT=0.84,
CONDUCTIVITY=0.69,
DENSITY=1.6000000E003/
```

Dengan satuan untuk Cp, Konduktivitas, dan densitas, masing – masing, adalah kJ/(kg.K), W/(m.K), dan kg/m<sup>3</sup>.

Setelah material dengan sifat termofisiknya ditetapkan, barulah pengaturan untuk lapisan yang akan berperan sebagai permukaan material dituliskan. Berikut

contoh pengaturan lapisan yang akan menjadi permukaan geometri padat dengan nama lapisan brick.

```
&SURF ID='BRICK',
    COLOR='BRICK',
    MATL_ID(1,1)='BRICK',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
    THICKNESS(1)=1.0000000E-003/
```

Pada contoh di atas, ditetapkan suatu lapisan permukaan yang terdiri dari material “BRICK” (MATL\_ID(1,1)='BRICK',) dengan ketebalan 0.001 m yang dimana fraksi material ‘BRICK’ pada lapisan ini dengan ketebalan seperti yang telah disebutkan adalah 1 (MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.00,).

Setelah itu, langkah terakhir yang harus dilakukan adalah menetapkan lapisan untuk menjadi permukaan geometri padat. Berikut contoh penetapan lapisan permukaan pada geometri padat.

```
&OBST XB = 0.00,151.00, 0.00,20.30, 0.00,1.50, COLOR = 'GRAY 60',
SURF_ID='BRICK' / Bottom Brick
```

Pada contoh di atas, ditetapkan suatu geometri padat (obstruksi) dengan ukuran pada arah x, y, dan z, masing adalah dari koordinat 0 m sampai 151 m, 0 m sampai 20.3 m, dan 0 m sampai 1.5 m. Dapat diperhatikan pada contoh di atas bahwa permukaan dari obstruksi tersebut ditetapkan sebagai ‘BRICK’ (SURF\_ID='BRICK') yang pada contoh sebelumnya sudah ditetapkan untuk terdiri dari material brick dengan ketebalan sebesar 0.001 m.

#### **2.8.4. Pengaturan kondisi pembakaran**

Terdapat dua pendekatan untuk mensimulasikan api pada FDS. Pendekatan yang pertama adalah mendefinisikan suatu reaksi dengan segala parameternya yang sesuai. Sedangkan pendekatan yang kedua adalah mendefinisikan HRR secara manual. Pada pendekatan pertama, HRR yang nantinya akan dihasilkan akan sesuai dengan parameter – parameter reaksi dan material yang digunakan. Sehingga perubahan HRR terhadap waktu akan tergantung kepada parameter reaksi, material, dan umpan palik panas dari api kepada material.

Pendekatan kedua, yang dimana HRR ditetapkan secara manual, dengan sendirinya mengeliminasi perhitungan reaksi yang harus dilakukan oleh FDS. Hal ini dilakukan dengan menetapkan perubahan nilai HRR terhadap waktu berdasarkan referensi tertentu, jika ada, atau melakukan tes cone calorimeter. Namun, jika tidak ada referensi yang dapat diperoleh atau tidak dilakukannya tes cone calorimeter, maka pendekatan teoritis mengenai HRR dapat dilakukan.

Pendekatan teoritis untuk menetapkan nilai HRR dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.3 dan 2.4. Dengan perhitungan lamanya waktu pembakaran dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.6. Penggunaan persamaan 2.4, harus didahului dengan mengevaluasi diameter efektif dari sumber kebakaran yang akan ditetapkan (persamaan 2.5). Jika diameter efektif dari sumber kebakaran tidak lebih besar dari 1 m, maka persamaan 2.5 harus digunakan. Sebagai catatan, kalkulasi teoritis ini disertai asumsi bahwa selama bahan bakar mengalami reaksi, laju pembakaran massa berada pada nilai maksimumnya.

Diameter efektif, dengan menggunakan persamaan 2.4, ditentukan berdasarkan luas dari sumber pembakaran. Pada FDS, khusus untuk pengaturan kebakaran dengan menggunakan pendekatan kedua, luas sumber kebakaran disebut sebagai burner. Berikut contoh penetapan permukaan burner sebagai sumber kebakaran.

```
&SURF ID='BURNER',
  COLOR='RASPBERRY',
  HRRPUA=2.4030000E003,
  RAMP_Q='BURNER_RAMP_Q'/
&RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=0.00, F=1.00/
&RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=53.82, F=1.00/
&RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=54.00, F=0.00/
```

Dapat diperhatikan pada contoh di atas, bahwa sumber kebakaran dengan tipe burner ditetapkan dengan HRRPUA (laju pelepasan kalor per satuan luas) sebesar 2403 kW/m<sup>2</sup>. Dengan perubahannya terhadap waktu direpresentasikan oleh kode &RAMP ID. Yang dimaksud dengan F pada &RAMP ID =



'BURNER\_RAMP\_Q',  $T = 0.00$ ,  $F = 1.00/$ , adalah fraksi HRRPUA dari HRRPUA maksimal ( $2403 \text{ kW/m}^2$ ) pada detik ke 0.

### 2.8.5. Pengaturan parameter simulasi

Pada bagian ini, parameter – parameter simulasi seperti lamanya simulasi dan kondisi lingkungan ditetapkan.

```
&TIME T_END=500.00/
```

```
&DUMP RENDER_FILE='1A_mesh0_37.ge1', DT_RESTART=300.00/
```

Dapat diperhatikan pada contoh di atas, bahwa lamanya simulasi yang ditetapkan adalah selama 500 detik ( $\&TIME \ T\_END=500.00$ ). Dengan penyimpanan memori, agar dapat melanjutkan simulasi jika simulasi dihentikan, setiap 300 detik ( $DT\_RESTART = 300.00$ ). Mengenai pengaturan – pengaturan lainnya, relevan terhadap parameter simulasi, referensi [6] dapat menjadi rujukan.

Telah dijelaskan secara singkat mengenai perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi. Sedangkan mengenai teori dasar perhitungan, model matematika, dan batasan – batasan yang terdapat pada perangkat lunak, referensi [7] dapat menjadi rujukan.

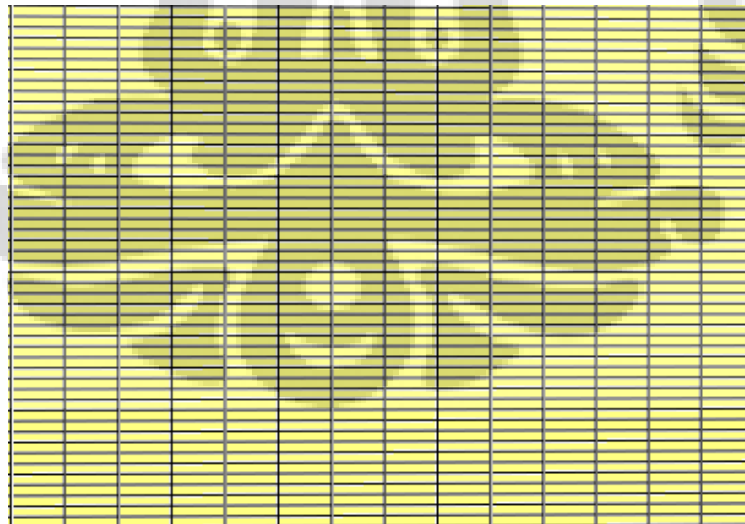
## BAB 3

### Metodologi Penelitian

Pada skripsi ini, studi mengenai kebakaran pada stasiun bawah tanah MRT dilakukan dengan bantuan perangkat lunak FDS. Penjelasan singkat mengenai FDS telah disampaikan pada BAB 2.6. Dengan demikian, simulasi yang dihasilkan oleh FDS dapat memberikan gambaran mengenai pergerakan dan konsentrasi asap, serta distribusi temperatur yang disebabkan oleh penyebaran asap, selain api pada lokasi yang dekat dengan lokasi sumber kebakaran.

#### 3.1. Daerah komputasi dan diskritisasi

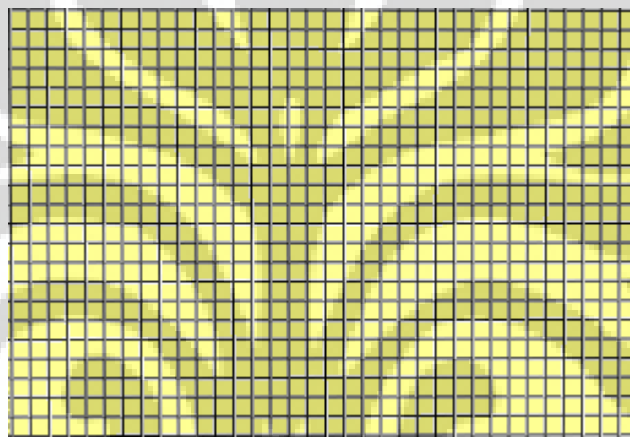
Pada simulasi yang dilakukan, ukuran daerah komputasi adalah sebesar, berdasarkan koordinat  $x - y - z$ , 0 m sampai 151 m pada sumbu  $x$ , -1 m sampai 21.3 m pada sumbu  $y$ , dan 0 m sampai 15.45 m pada sumbu  $z$ . Dengan diskritisasi pada arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ , adalah sebanyak 151, 118, dan 78. Banyaknya diskritisasi relevan dengan ukuran daerah diskrit, sehingga ukuran daerah diskrit pada simulasi adalah sebesar 1 m, 0.19 m, dan 0.2 m, masing – masing pada arah sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Diskritisasi daerah diskrit pada bidang  $x-z$  dan  $y-z$  dapat diperhatikan secara sederhana dan tanpa penyekalaan pada gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.1. Daerah diskrit pada bidang  $x - z$ .

Dengan merujuk kepada persamaan 2.34., dimana HRR yang ditetapkan adalah sebesar 5 MW, maka resolusi atau rasio  $D^*$  dan  $\delta x$  untuk arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ ,

masing – masing, adalah sebesar 1.95, 10.3, dan 9.75. Disebutkan pada referensi [6], bahwa rentang nilai 4 sampai 16 untuk rasio  $D^*$  dan  $\delta x$  dapat dijadikan panduan untuk menetapkan  $\delta x$ . Pada arah y dan z,  $D^*/\delta x$  berada pada rentang nilai tersebut. Namun tidak halnya pada arah x. Hal ini dikarenakan daerah komputasi pada arah x yang relatif besar (151 m), sehingga jika ukuran daerah diskrit pada arah x memberikan  $D^*/\delta x$  yang berada pada rentang nilai 4 sampai 16, maka daerah diskrit akan semakin kecil dan banyak. Dimana banyaknya daerah diskrit akan berdampak besar terhadap lamanya waktu komputasi yang diperlukan.



Gambar 3.2. Daerah diskrit pada bidang y – z.

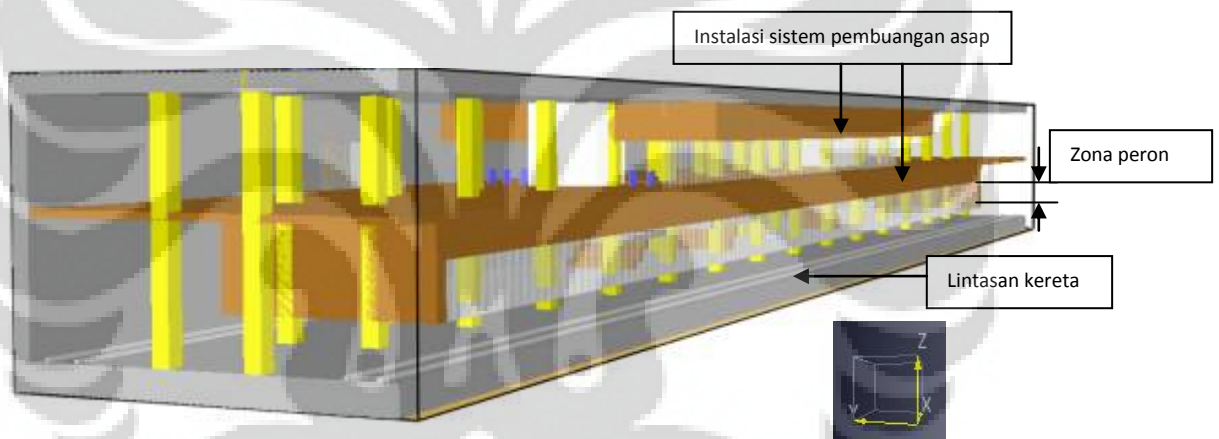
Sedangkan daerah komputasi sebesar 21 m, 3 m, dan 5.6 m, dalam arah x, y, dan z, juga ditetapkan untuk simulasi aktivasi *smoke exhaust* yang ditetapkan pada daerah sekitar lokasi kebakarannya saja tanpa meninjau pergerakan asap di dalam stasiun (gambar 3.4), dengan menetapkan batasan bidang terbuka pada sumbu maksimal x dan minimal x (gambar 3.4). Ukuran mesh ditetapkan sebesar 0.3 m yang relevan dengan resolusi ( $D^*/\delta x$ ) sebesar 5 untuk HRR 3 MW Gasoline *pool fire* (dijelaskan pada bab 3.4).

### 3.2. Geometri stasiun dan aktivasi sistem pembuangan asap

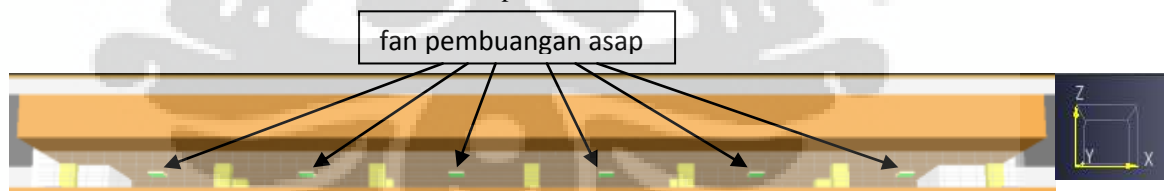
Desain geometri tipikal stasiun bawah tanah MRT yang digunakan pada simulasi dapat diperhatikan pada gambar 3.3. Penetapan desain geometri ini berdasarkan studi literatur referensi [2] – [5]. Pada simulasi, peletakan setiap fan

pembuangan asap pada zona *concourse* dan zona peron, ditunjukkan oleh gambar 3.4 dan 3.5.

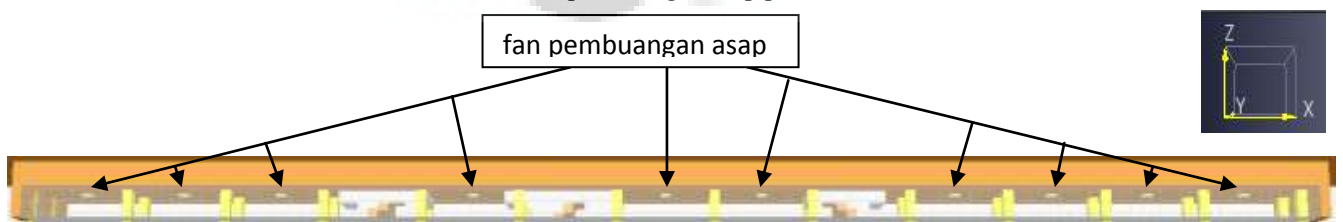
Seperti yang dapat diperhatikan pada gambar 3.3, geometri stasiun bawah tanah memiliki dua lantai. Dimensi keseluruhan dari stasiun bawah tanah yang didesain adalah sesuai dengan daerah komputasi yang ditetapkan sebelumnya, yakni 151 m pada sumbu x, 22.3 m pada sumbu y, dan 15.45 m pada sumbu z. Geometri seperti ruang pompa, tanki pemadam kebakaran, dan AHU (Air Handling Unit) tidak disertakan dalam model geometri guna menyederhanakan simulasi. Tujuh loket tiket dan ruang karyawan (geometri berwarna putih) berada pada kedua sisi paid concourse di lantai 1 (gambar 3.3), dengan tinggi lantai 1 sebesar 5.5 m. Sedangkan tinggi zona peron adalah besaran yang akan divariasikan sebagai 3 m dan 4 m. Sebagai asumsi awal, seluruh PSD tertutup selama kebakaran terjadi.



Gambar 3.3. Geometri tipikal stasiun bawah tanah MRT



Gambar 3.4. Alat pembuangan asap pada lantai 1



Gambar 3.5. Alat pembuangan asap pada zona peron

Aktivasi sistem pembuangan asap ditetapkan pada detik ke 60 s. Hal ini berdasarkan referensi [17] yang menyampaikan bahwa waktu untuk klarifikasi kecelakaan kebakaran pada bangunan dengan penghuni yang berada pada kondisi sehat dan familiar dengan tempat tersebut adalah, rata – rata, kurang dari 60 detik. Dengan artian bahwa setelah satu menit, maka tindakan evakuasi dan pemadaman kebakaran sudah harus dilakukan. Maka, didasarkan atas hal ini, sistem pembuangan asap yang merupakan alat pencegah bahaya asap hasil pembakaran dan diasumsikan harus diaktifkan secara manual oleh staff karyawan stasiun, akan aktif pada detik ke 60.

Sedangkan untuk simulasi dengan sumber kebakaran gasoline 5 liter dan kondisi *smoke exhaust* pada *concourse* yang tidak aktif (yang akan dijelaskan lebih lanjut pada bab 3.4), *smoke exhaust* ditetapkan untuk aktif pada detik ke 20. Hal ini ditetapkan demikian, untuk mengetahui pengaruh waktu aktivasi *smoke exhaust* terhadap pergerakan dan konsentrasi asap serta distribusi temperatur akibat pergerakan asap secara keseluruhan pada stasiun. Variasi terhadap waktu aktivasi *smoke exhaust* yang ditetapkan pada simulasi daerah kebakaran juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh waktu aktivasi *smoke exhaust* terhadap distribusi temperatur di daerah kebakaran (akan dijelaskan lebih lanjut pada bab 3.6)

### 3.3. Material

Material yang digunakan pada simulasi adalah *brick* dan *laminated safety glass*. Dimana *brick* ditetapkan pada dinding, pilar, dan lintasan kereta. Sedangkan *laminated safety glass* ditetapkan pada PSD dan pembatas *paid concourse*. Dapat dilihat pada tabel 3.1, nilai – nilai termofisik untuk kedua material tersebut.

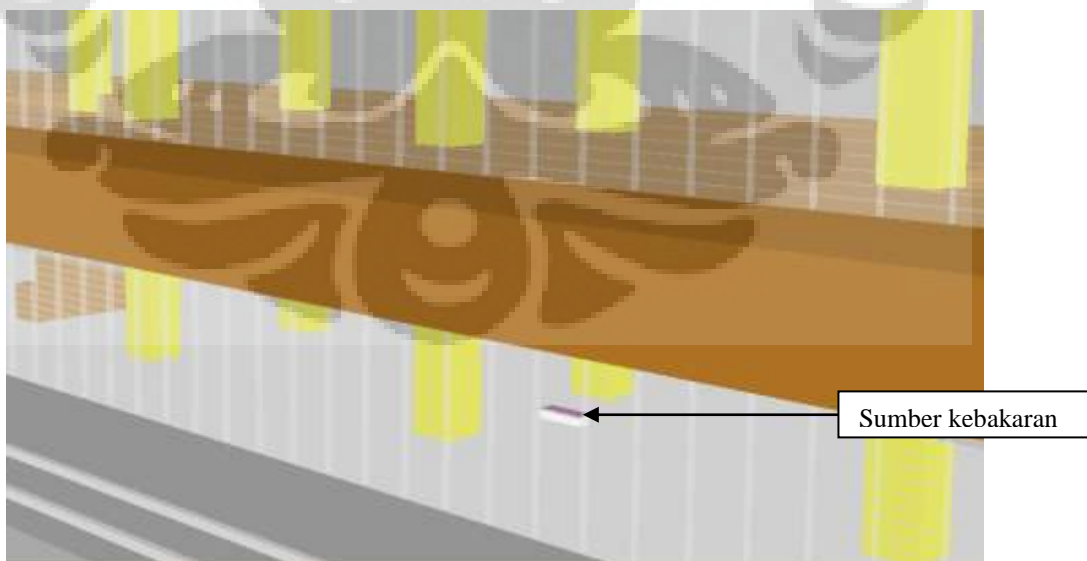
Tabel 3.1. Nilai termofisik material pada simulasi

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (W/(m.K))	$c_p$ (kJ/(kg.K))	Reference
Brick	1600	0.69	0.84	[8]
Laminated Safety Glass	1380	0.049	0.84	[9]

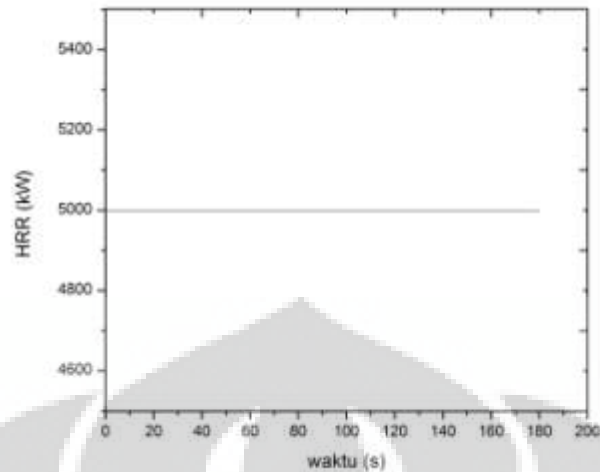
### 3.4. Model pembakaran

Pada simulasi ini, nilai HRR ditetapkan sebesar 5 MW dengan HRRPUA sebesar  $12500 \text{ kW/m}^2$  dan luas sumber kebakaran yang sebesar  $0.4 \text{ m}^2$ . Jika bahan bakar yang didesain adalah gasoline dengan laju pembakaran massa per satuan waktu ( $\dot{m}''$ ) sebesar  $0.055 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , entalpi pembakaran ( $\Delta H_c$ ) sebesar  $44100 \text{ kJ/kg}$ , dan waktu pembakaran selama 1800 detik dengan laju pembakaran per satuan massa maksimum selama proses kebakaran terjadi, maka luas permukaan pembakaran bahan bakar dan volume bahan bakar adalah sebesar  $2.06 \text{ m}^2$  dan  $3000 \text{ l}$ , dengan menggunakan persamaan 2.3 dan 2.6. Tentu hal ini tidak mungkin jika kebakaran adalah kebakaran yang disengaja. Namun, pendekatan bahan bakar gasoline dapat digunakan jika mengasumsikan bahwa kebakaran adalah kebakaran yang memang dilakukan khusus untuk mengamati performa *smoke exhaust* dan pengaruh ketinggian langit – langit peron, khusus untuk meninjau pergerakan asap, konsentrasi asap, dan penyebaran temperatur akibat asap, tanpa disertai propaganda api.

Peletakan sumber kebakaran berada pada bagian tengah zona peron diantara daerah 2\_3 dan 2\_4 (perhatikan gambar 3.5) atau koordinat  $85.8 \text{ m}$ ,  $10.15 \text{ m}$ , dan  $3.2 \text{ m}$ , masing – masing pada arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Dapat diperhatikan pada gambar 3.2 visualisasi sumber kebakaran. Dapat pula diperhatikan gambar 3.3, desain laju produksi kalor yang ditetapkan pada simulasi.



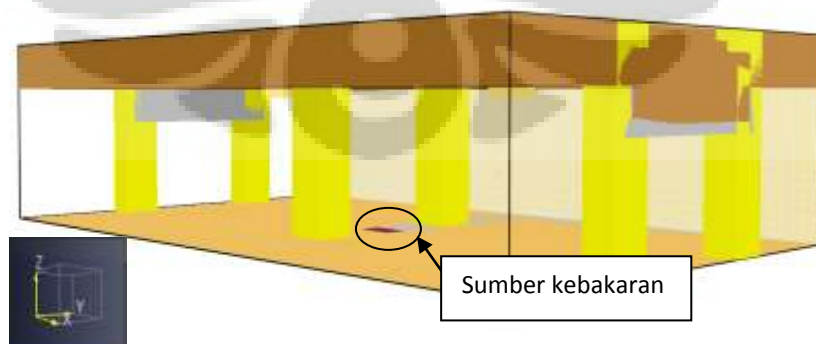
Gambar 3.2. Peletakan sumber kebakaran pada zona peron



Gambar 3.3. Grafik HRR yang digunakan pada simulasi (ganti grafik dengan grafik sederhana)

Pada simulasi dengan bahan bakar gasoline 5 liter *pool fire* dengan luas permukaan pembakaran sebesar  $1.25 \text{ m}^2$  dan tinggi 4 mm, dengan menggunakan persamaan 2.3 dan 2.6, kebakaran akan terjadi selama 53.82 detik dan HRR sebesar 3 MW. Sumber kebakaran ini, akan digunakan pada simulasi kebakaran dengan *smoke exhaust* pada zona *concourse* yang tidak dinonaktifkan dan pada simulasi variasi aktivasi *smoke exhaust*, yang akan dijelaskan pada bab 3.6. Simulasi kebakaran dengan menonaktifkan *smoke exhaust* pada zona *concourse* dilakukan untuk mengetahui kontribusi peletakan *smoke exhaust* (yang aktif) terhadap penyebaran dan pergerakan asap.

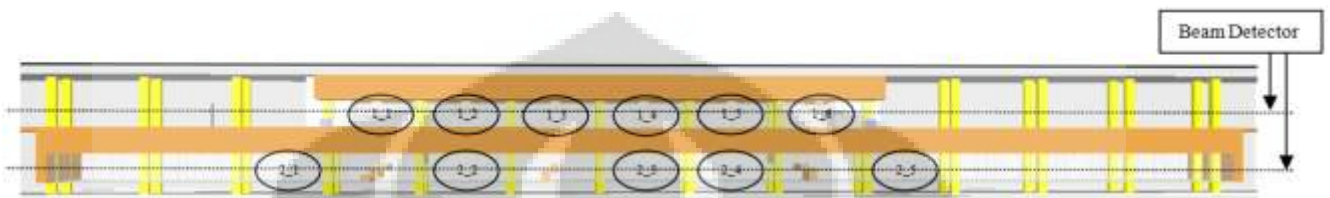
Dapat diperhatikan pada gambar 3.4, sumber bahan bakar gasoline 5 liter *pool fire* pada simulasi variasi aktivasi *smoke exhaust*.



Gambar 3.4. Geometri simulasi variasi aktivasi *smoke exhaust*

### 3.5. Alat ukur

Pada pengaturan awal simulasi, ditetapkan beberapa alat pengukuran seperti termokopel, pengukur visibilitas, pengukur aliran gas (*gas flow meter*), dan *beam detector*. Peletakan alat – alat pengukuran ini sesuai dengan pengkodean tempat yang dapat dilihat pada gambar 3.5. Dengan peletakan *gas flow meter* pada tiap kolom tangga yang dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.5. Lokasi termokopel, pengukur visibilitas, dan *beam detector*



Gambar 3.6. Lokasi pengukur aliran gas (*gas flow meter*)

Pada tiap kode tempat, peletakan alat pengukur (termokopel dan pengukur visibilitas) berdasarkan jarak vertikal dari lantai peron yakni 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m, dan 2.4 m. Sedangkan tiap *beam detector* diletakkan 1.8 m, dalam arah vertikal, relatif terhadap lantai peron dan lantai *concourse*.

### 3.6. Variasi parameter

Pengaruh kapasitas pembuangan asap dan ketinggian atap peron terhadap konsentrasi asap, visibilitas, distribusi temperatur, dan densitas optik perlu diamati untuk mengetahui besaran kapasitas pembuangan asap dan ketinggian atap peron yang cukup untuk menyediakan kondisi memungkinkan untuk berjalannya evakuasi pada saat kebakaran terjadi. Selain itu, kaitan antara kedua parameter tersebut juga perlu untuk dipelajari guna menetapkan kapasitas pembuangan asap yang sesuai dengan dimensi ruang tempat terjadinya kebakaran (dalam hal ini adalah peron).



Untuk kapasitas pembuangan asap, variasi yang ditetapkan adalah sebesar 3000 m<sup>3</sup>/jam, 4000 m<sup>3</sup>/jam, 5000 m<sup>3</sup>/jam, 6000 m<sup>3</sup>/jam, dan 7000 m<sup>3</sup>/jam. Sedangkan untuk ketinggian atap peron, variasi ditetapkan sebesar 3 m dan 4 m. Hal ini lebih jelasnya dapat diperhatikan pada tabel 3.1.

Dengan memperhatikan jumlah fan pembuangan asap yang dimodelkan pada peron, maka kapasitas pembuangan asap pada peron untuk skenario 1 sampai 5 adalah masing – masing, 30000 m<sup>3</sup>/jam, 40000 m<sup>3</sup>/jam, 50000 m<sup>3</sup>/jam, 60000 m<sup>3</sup>/jam, dan 70000 m<sup>3</sup>/jam. Dengan merujuk kepada volume peron, dapat diperhatikan bahwa pada skenario A, kapasitas pembuangan asap peron dari skenario 1 sampai 5, adalah 5.92 kali volume, 7.89 kali volume, 9.86 kali volume, 11.83 volume, dan 13.81 kali volume. Sedangkan untuk skenario B, adalah 4.44 kali volume, 5.92 kali volume, 7.4 kali volume, 8.88 kali volume, 10.4 kali volume. Besarnya nilai kapasitas pembuangan asap dalam orde ini berdasarkan pertimbangan studi referensi [3], yang menetapkan besar kapasitas pembuangan asap berdasarkan 1 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.min) area ruangan. Jika menggunakan pendekatan ini, maka kapasitas pembuangan asap yang harus digunakan pada geometri penelitian ini adalah sebesar 101400 m<sup>3</sup>/jam untuk zona peron.

Relevan terhadap besar kapasitas ekstraksi asap dan luas penampang pada setiap fan (gambar 3.4 dan 3.5), maka kecepatan ekstraksi asap pada setiap lokasi yang ditunjukkan pada gambar 3.5 adalah sebesar 0.83 m/s, 1.1 m/s, 1.39 m/s, 1.67 m/s, dan 1.94 m/s relevan terhadap kapasitas ekstraksi asap sebesar 3000 m<sup>3</sup>/jam, 4000 m<sup>3</sup>/jam, 5000 m<sup>3</sup>/jam, 6000 m<sup>3</sup>/jam, dan 7000 m<sup>3</sup>/jam.

Berdasarkan NFPA 130, toleransi terhadap kecepatan udara pada stasiun bawah tanah adalah antara 0.82 m/s sampai 12 m/s. Dengan demikian, rentang kecepatan udara yang relevan terhadap setiap besaran variasi kapasitas ekstraksi asap masih di dalam toleransi standar NFPA 130.

Sedangkan jika dengan menggunakan pendekatan terhadap luas lantai peron, kapasitas pembuangan asap peron untuk skenario 1 sampai 5, baik untuk skenario A ataupun B, sebesar 17.75, 23.67, 29.6, 35.5, 41.42 kali luas lantai peron, dengan satuan adalah m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.jam). Dengan merubah satuan menjadi m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.min), maka besaran di atas menjadi 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, dan 0.7. Jika melakukan pendekatan terhadap luas lantai peron, ketinggian zona peron seakan –

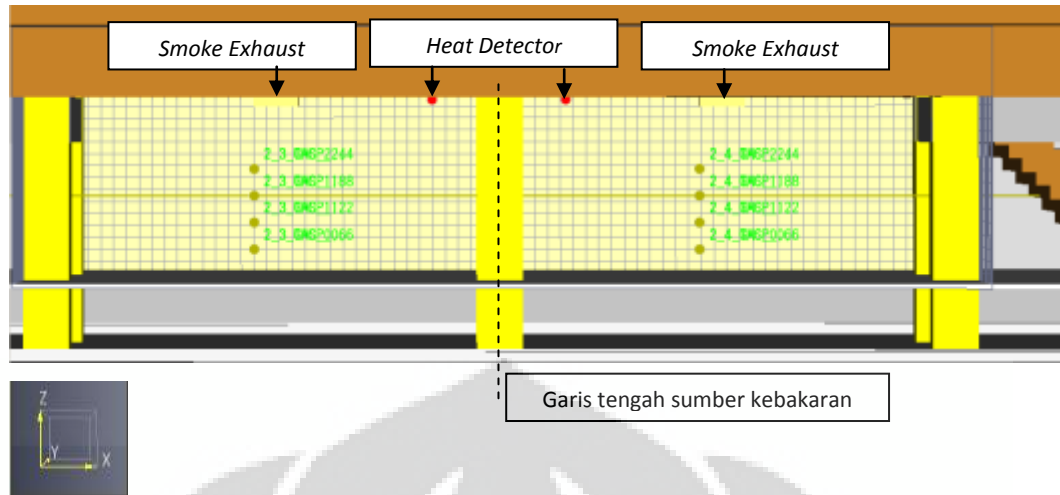
akan tidak menjadi perhitungan pada pertimbangan pengamatan. Namun, dapat diamati bahwa dengan pertimbangan terhadap volume peron, ketinggian zona peron menjadi pertimbangan pengamatan. Dengan konflik yang ada, pada kapasitas pembuangan asap yang sama, ketinggian peron yang lebih kecil menghasilkan rasio kapasitas dan volume yang lebih besar dibandingkan dengan rasio kapasitas dan volume pada ketinggian zona peron yang lebih besar. Dengan demikian, skenario yang disampaikan pada tabel 3.2, dapat menjadi acuan pengamatan terhadap pendekatan yang harus diambil dalam menentukan kapasitas pembuangan asap pada suatu kompartemen (atau peron dalam skripsi ini).

Simulasi juga dilakukan dengan menonaktifkan *smoke exhaust* pada zona *concourse* dan meninjau pergerakan asap, konsentrasi asap, dan penyebaran temperatur akibat asap pada simulasi ini dengan sumber kebakaran adalah gasoline 5 liter *pool fire*. Untuk sumber kebakaran gasoline 5 liter *pool fire*, luas permukaan pembakaran dan waktu pembakaran, sudah dijelaskan pada bab 3.4.

Tabel 3.2. Variasi parameter pada simulasi

Kode	Kapasitas fan pembuangan asap (m <sup>3</sup> /h)	Ketinggian atap peron (m)/Volume peron (m <sup>3</sup> )
1A	3000	3/5070
2A	4000	
3A	5000	
4A	6000	
5A	7000	
1B	3000	4/6760
2B	4000	
3B	5000	
4B	6000	
5B	7000	

Sedangkan untuk mengetahui pengaruh aktivasi *smoke exhaust* terhadap distribusi temperatur, yang disimulasikan pada lokasi daerah pembakaran (gambar 3.4), variasi waktu pengaktifan *smoke exhaust* ditetapkan sebesar 10 s, 20 s, 30 s, 40 s, 50 s, dan pada temperatur 74°C. Untuk mendeteksi temperatur 74°C, ditetapkan *heat detector* pada langit – langit yang berada pada jarak -1.5 dan 1.5 dari garis tengah sumber kebakaran.



Gambar 3.7. Lokasi heat detektor pada simulasi variasi aktivasi *smoke exhaust*

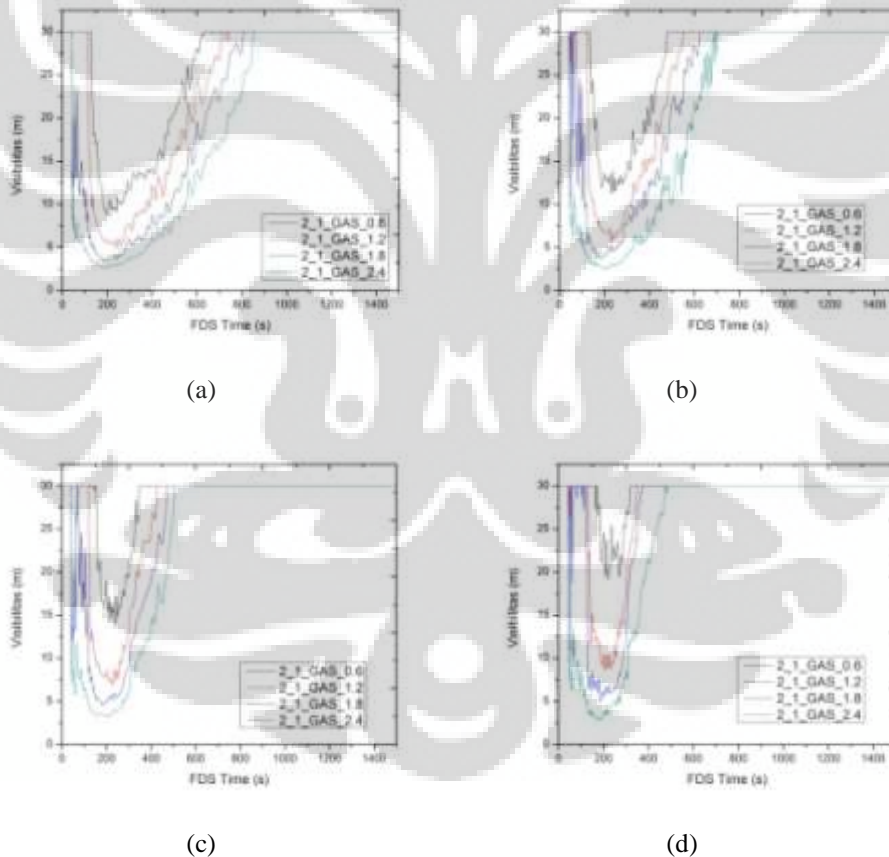


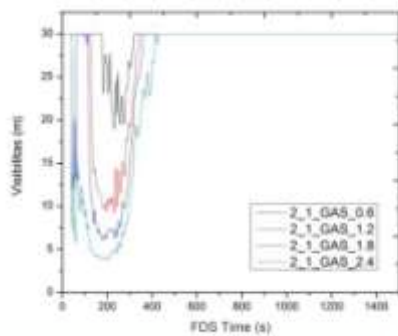
## BAB 4

### Hasil dan Analisa

#### 4.1. Pengaruh laju ventilasi terhadap visibilitas

Visibilitas terhadap laluan atau sarana jalan keluar menjadi salah satu faktor penting dalam sudut pandang keselamatan kebakaran. Sesuai dengan letak sumber kebakaran yang berada pada lantai peron, maka visibilitas akan ditinjau pada setiap tangga akses dari peron menuju *paid concourse*. Dapat diperhatikan pada gambar 4.1, perubahan visibilitas pada ketinggian 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m, dan 2.1 m di lokasi 2\_1 (perhatikan gambar 3.4) relevan terhadap perubahan laju ventilasi sistem pembuangan asap dengan volume peron sebesar 5070 m<sup>3</sup>.





(e)

Gambar 4.1. Visibilitas pada ketinggian 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m, dan 2.4 m pada lokasi 2\_1 sesuai dengan perubahan laju visibilitas, (a) 3000 m<sup>3</sup>/jam, (b) 4000 m<sup>3</sup>/jam, (c) 5000 m<sup>3</sup>/jam, (d) 6000 m<sup>3</sup>/jam, (e) 7000 m<sup>3</sup>/jam

Dapat diperhatikan bahwa dengan membesarnya kapasitas ventilasi maka waktu dimana visibilitas tereduksi semakin berkurang secara signifikan, yang berarti bahwa kondisi aman semakin cepat tercapai. Hal ini dapat diperhatikan dengan memperhatikan waktu dimana visibilitas kembali menjadi 30 m pada, misal ketinggian 1.8 m yang sesuai dengan ketinggian pandangan rata – rata penumpang. Dengan waktu visibilitas kembali menjadi normal adalah 800, 650, 450, 390, dan 310 detik, relevan terhadap kapasitas ventilasi sebesar 3000, 4000, 5000, 6000, dan 7000 m<sup>3</sup>/jam.

Namun, waktu kembalinya visibilitas menjadi normal kembali kiranya tidak cukup untuk menjadi peninjauan utama keselamatan kebakaran. Hal ini relatif dengan lamanya kebakaran yang terjadi. Dengan memperhatikan gambar 3.3, dapat diperhatikan bahwa kebakaran sebesar 5 MW terjadi selama 180 detik. Sehingga pengamatan mengenai visibilitas haruslah merujuk kepada minimum visibilitas yang terdapat pada tiap kapasitas sistem pembuangan asap. Relevan terhadap gambar 4.1, minimum visibilitas kurang lebih sama untuk setiap kapasitas sistem pembuangan asap pada ketinggian 1.8 m – lokasi 2\_1, yaitu 3.46 m, 3.72 m, 4.64 m, 4.99 m, dan 6.07 m pada kapasitas sistem pembuangan asap sebesar 3000, 4000, 5000, 6000, dan 7000 m<sup>3</sup>/jam. Dengan demikian, dapat diambil kesimpulan sementara bahwa peningkatan kapasitas sistem pembuangan asap berkontribusi minim terhadap besarnya visibilitas yang dapat dipertahankan selama kebakaran terjadi.

Jika peninjauan ditekankan pada waktu reduksi visibilitas, peningkatan kapasitas visibilitas dapat dikatakan berkontribusi cukup besar dalam mengurangi waktu reduksi visibilitas. Hal ini tentunya sesuai dengan kesepakatan bersama bahwa semakin besar kapasitas ventilasi maka semakin besar juga volumetrik asap yang terbang per satuan waktu (gambar 4.2). Besarnya kontribusi laju volumetrik sistem pembuangan asap terhadap lamanya waktu reduksi visibilitas dapat ditunjukkan dengan menetapkan luasan yang terdapat pada daerah reduksi visibilitas. Hal ini dapat dilakukan dengan mengintegrasikan nilai visibilitas pada data visibilitas dari hasil simulasi. Lebih jelasnya, konsep ini dapat diperhatikan pada gambar 4.3.

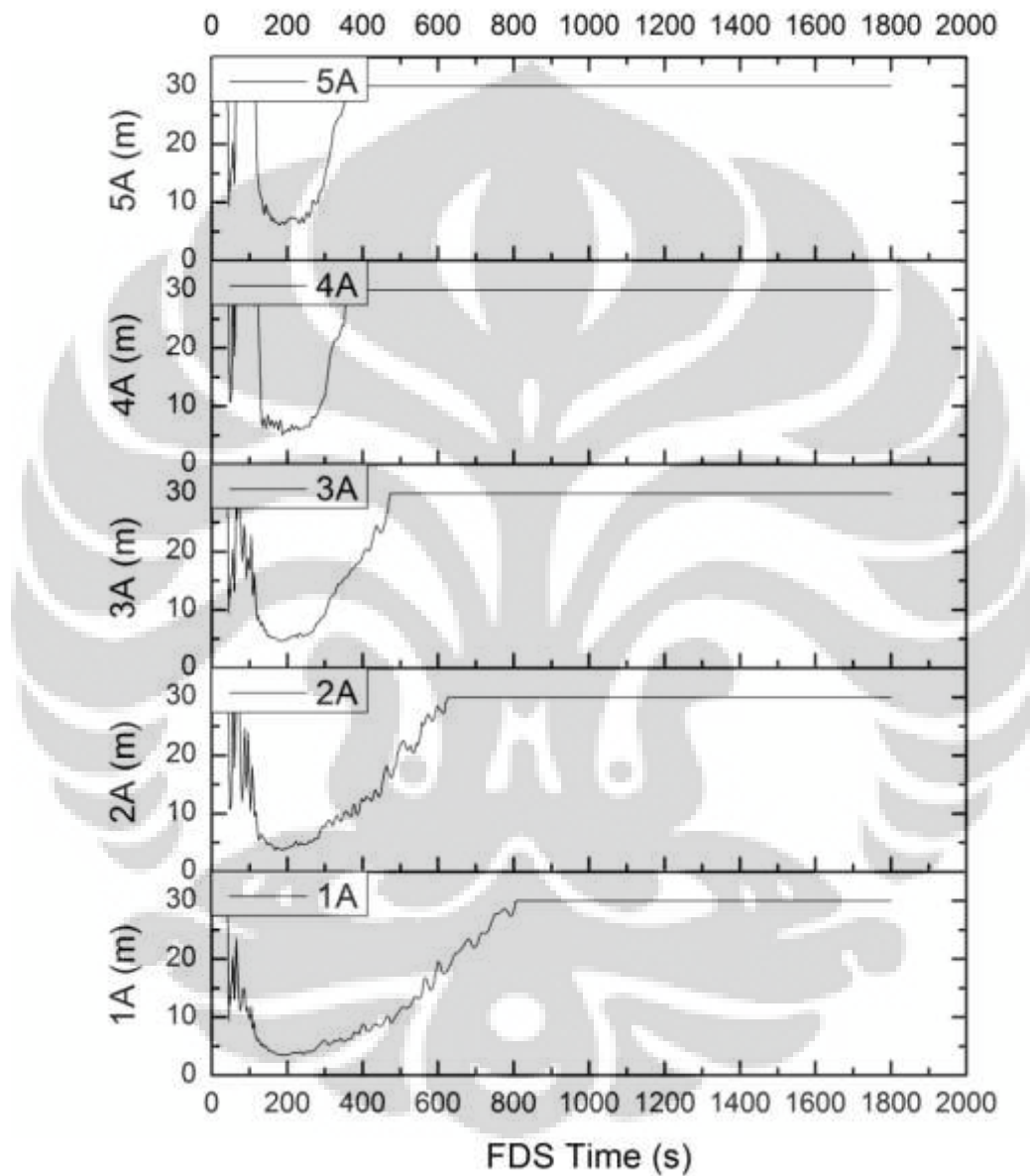
Dapat diperhatikan juga pada gambar 4.2, bahwa penurunan visibilitas terjadi pada detik – detik pertama kebakaran terjadi. Dengan aktifnya sistem pembuangan asap pada detik ke 60, visibilitas kembali meningkat dengan selanjutnya kembali menurun dikarenakan pembakaran yang terus berlangsung dan berakhir pada detik ke 180.

Dengan demikian, dapat diperhatikan pada gambar 4.4, luasan reduksi visibilitas pada tiap kapasitas volumetrik pada lokasi 2\_1 dengan volume daerah peron sebesar  $5070 \text{ m}^3$  (skenario A).

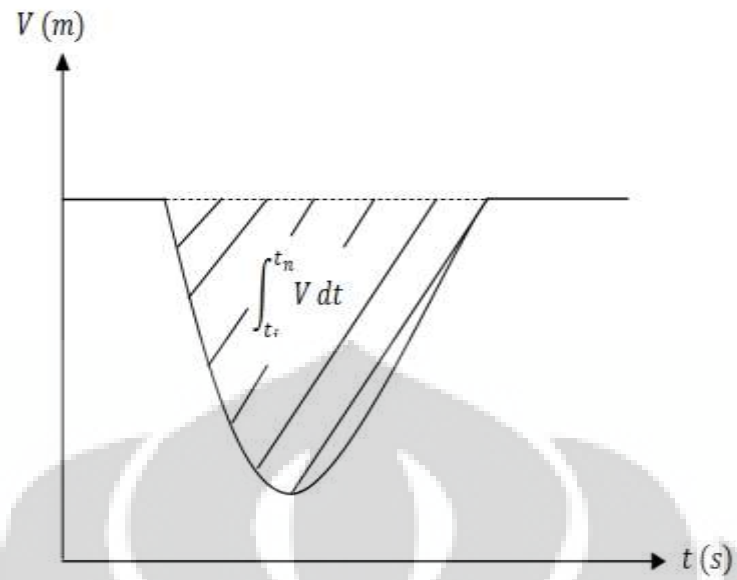
Sedangkan untuk lokasi – lokasi yang lainnya, 2\_2, 2\_3, 2\_4, dan 2\_5, pola perubahan visibilitas kurang lebih sama dengan penjelasan sebelumnya. Perbedaan yang mendasar hanya terdapat pada perbedaan minimum visibilitas yang tidak terlalu signifikan dan dapat diperhatikan pada gambar 4.5 yang menunjukkan perubahan visibilitas berdasarkan waktu pada tiap lokasi relatif terhadap sumber kebakaran (d) untuk kapasitas volumetrik pembuangan asap dan ketinggian, masing – masing  $3000 \text{ m}^3/\text{jam}$  dan 1.8 m.

Dapat pula diperhatikan pada gambar 4.6, visibilitas berdasarkan waktu dan lokasi relatif terhadap sumber kebakaran pada kapasitas volumetrik pembuangan asap sebesar  $5000 \text{ m}^3/\text{jam}$  dan ketinggian 1.8 m. Jika dibandingkan dengan gambar 4.5, maka dapat diambil kesimpulan sementara, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, bahwa peningkatan kapasitas volumetrik pembuangan asap tidak terlalu mempengaruhi nilai minimum visibilitas pada saat kebakaran sebesar 5 MW terjadi. Kontribusi terbesar dari peningkatan kapasitas

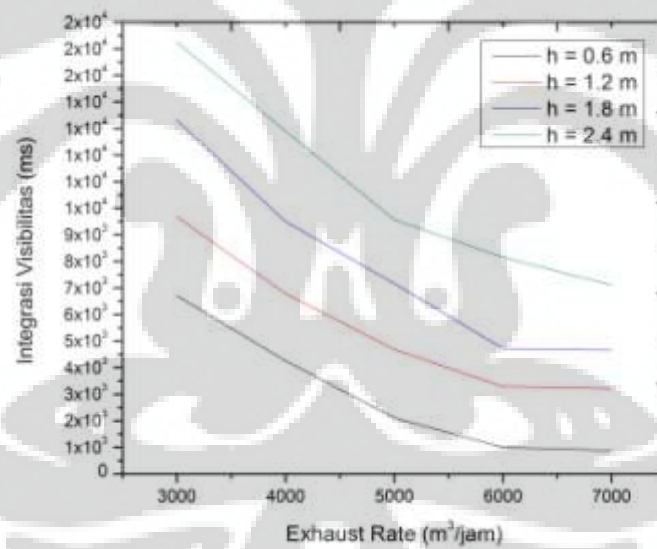
volumetrik pembuangan asap terlihat dengan sangat jelas berada pada pengurangan daerah reduksi visibilitas. Hal ini telah dijelaskan sebelumnya, dan dapat diperhatikan pada gambar 4.4, serta dipertegas dengan membandingkan gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.2. Visibilitas relevan terhadap peningkatan kapasitas sistem pembuangan asap pada ketinggian 1.8 m – lokasi 2\_1 – skenario A

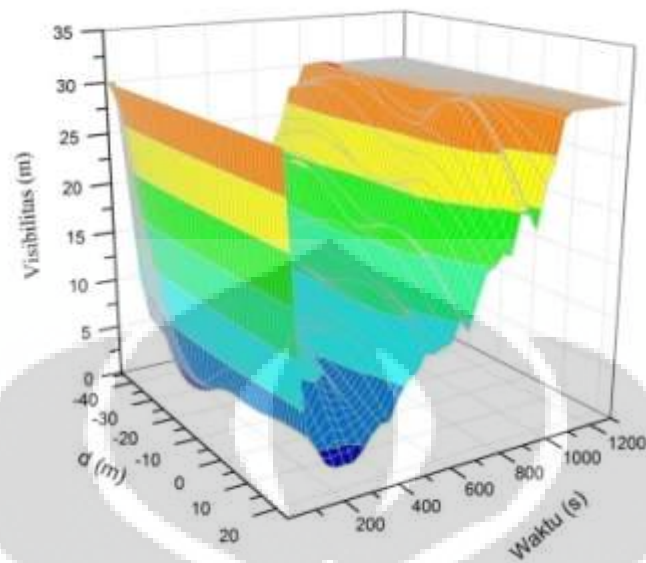


Gambar 4.3. Integral nilai visibilitas

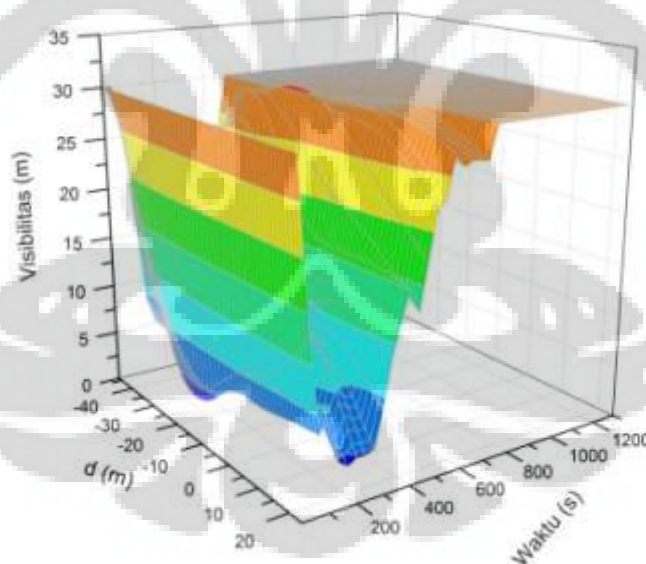


Gambar 4.4. Luasan daerah reduksi visibilitas berdasarkan kapasitas volumetrik pembuangan asap pada skenario A - lokasi 2\_1





Gambar 4.5. Visibilitas berdasarkan waktu dan lokasi relatif terhadap sumber kebakaran untuk kapasitas volumetrik pembuangan asap 3000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian 1.8 m

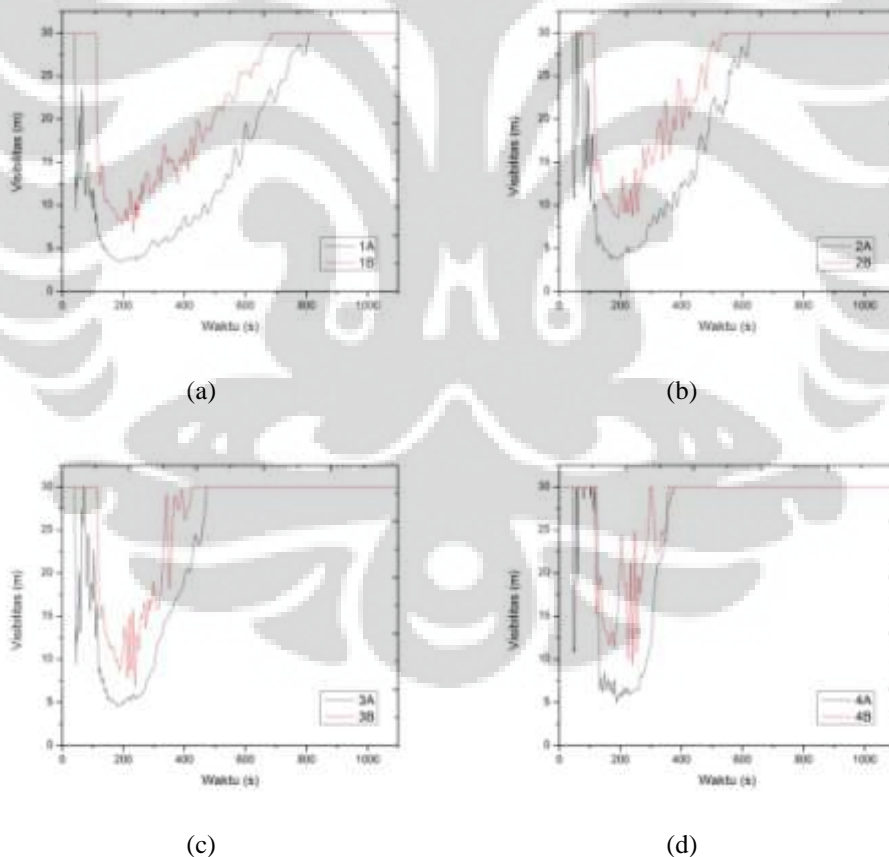


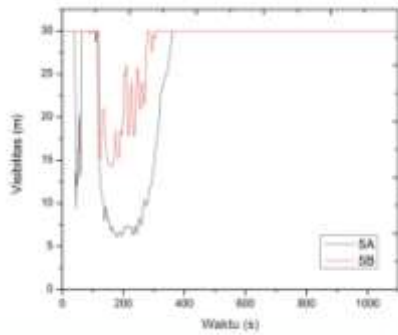
Gambar 4.6. Visibilitas berdasarkan waktu dan lokasi relatif terhadap sumber kebakaran untuk kapasitas volumetrik pembuangan asap 5000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian 1.8 m

#### 4.2. Pengaruh volume *platform* terhadap visibilitas

Pada subbab sebelumnya, telah disampaikan penjelasan mengenai pengaruh dari perubahan kapasitas pembuangan asap terhadap visibilitas. Berikutnya, perlu juga untuk diamati secara eksak mengenai pengaruh dari perubahan volume peron terhadap visibilitas pada saat kebakaran sebesar 5 MW terjadi selama 180 detik. Perubahan volume peron, dilakukan dengan mengubah ketinggian atap peron seperti yang telah dijelaskan pada bab metodologi.

Pada gambar 4.7, dapat diperhatikan bahwa penambahan volume *platform* sebesar  $1690 \text{ m}^3$  (dengan menambahkan ketinggian zona *platform* sebesar 1 m) berkontribusi terhadap bertambahnya minimum visibilitas pada saat kebakaran 5 MW terjadi dan berkurangnya waktu reduksi visibilitas yang menyebabkan berkurangnya luasan daerah reduksi visibilitas terhadap waktu.



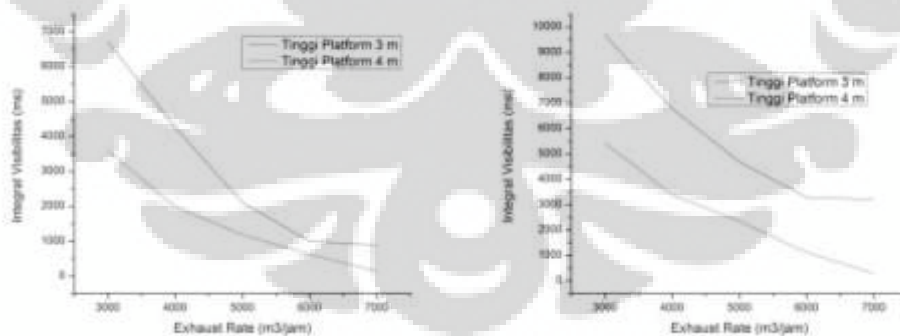


(e)

Gambar 4.7. Perbandingan visibilitas volume *platform* 5070 m<sup>3</sup> dan 6760 m<sup>3</sup> pada ketinggian 1.8 m – lokasi 2\_1 untuk kapasitas pembuangan asap 3000 m<sup>3</sup>/jam (a), 4000 m<sup>3</sup>/jam (b), 5000 m<sup>3</sup>/jam (c), 6000 m<sup>3</sup>/jam (d), dan 7000 m<sup>3</sup>/jam (e)

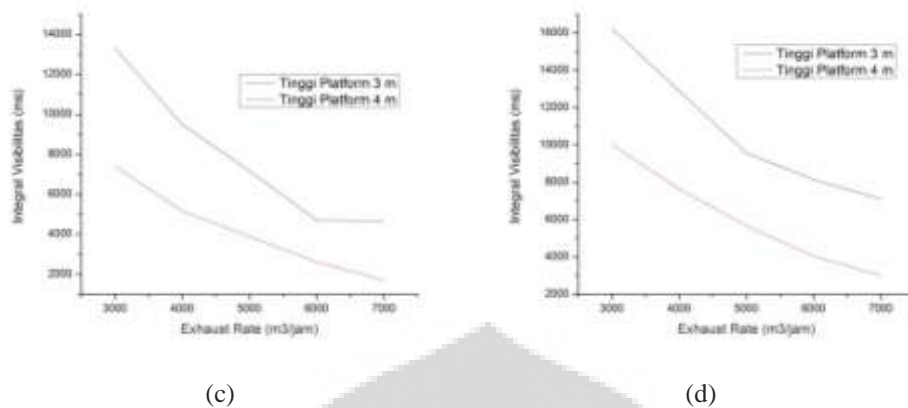
Dengan integrasi data visibilitas seperti yang dijelaskan oleh gambar 4.3, maka dampak perubahan volume *platform* terhadap reduksi visibilitas untuk lokasi 2\_1 pada volume *platform* 5070 m<sup>3</sup> dan 6760 m<sup>3</sup> di ketinggian 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m, dan 2.4 m dapat diperhatikan pada gambar 4.8.

Perbedaan yang sangat signifikan dengan berubahnya volume *platform* mengartikan bahwa perubahan volume kompartemen lebih signifikan dalam memberikan dampak pengurangan reduksi visibilitas. Hal ini dapat diperhatikan pada gambar 4.8, dimana terdapat perbedaan daerah reduksi visibilitas yang signifikan dengan berubahnya volume *platform*.



(a)

(b)

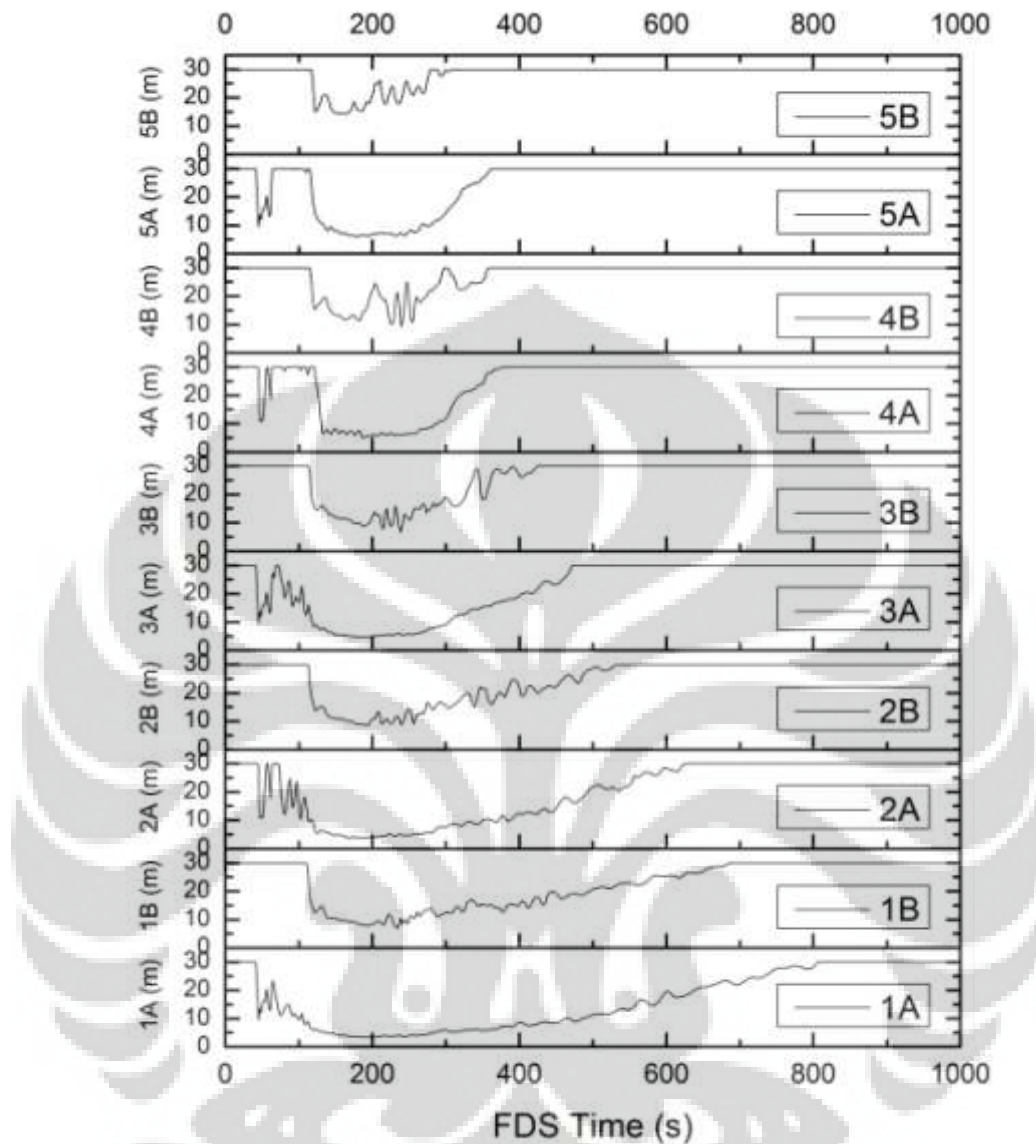


Gambar 4.8. Reduksi visibilitas pada volume *platform* 5070 m<sup>3</sup> dan 6760 m<sup>3</sup> pada lokasi 2\_1 untuk (a) ketinggian 0.6 m, (b) ketinggian 1.2 m, (c) ketinggian 1.8 m, dan (d) ketinggian 2.4 m

#### 4.3. Ringkasan pengaruh kapasitas volumetrik pembuangan asap dan volume *platform* terhadap visibilitas

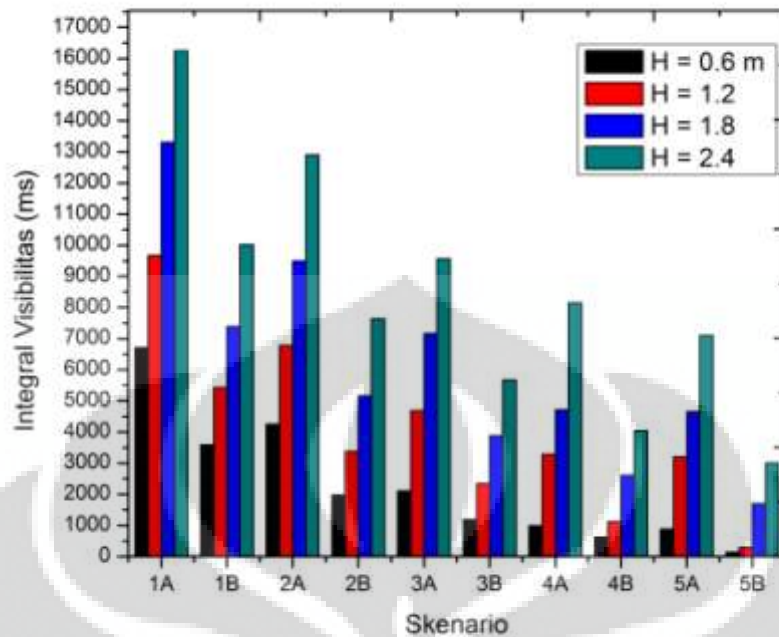
Dampak dari perubahan kapasitas volumetrik pembuangan asap dan volume *platform* dapat diperhatikan secara keseluruhan, berdasarkan skenario – skenario kebakaran yang telah disimulasikan, untuk ketinggian 1.8 m – lokasi 2\_1 pada gambar 4.9. Pada gambar 4.9, dapat diperhatikan bahwa untuk skenario A (volume *platform* 5070 m<sup>3</sup>), selalu terdapat reduksi visibilitas yang lebih awal sebelum sistem pembuangan asap aktif pada detik ke 60. Hal ini menandakan bahwa untuk ketinggian atap *platform* sebesar 3 m, asap sudah mulai turun menuju ketinggian 1.8 m yang merupakan tinggi pandang rata – rata penumpang. Sedangkan pada skenario B (ketinggian atap *platform* sebesar 4 m), reduksi visibilitas sebelum sistem pembuangan asap aktif, tidak pernah terjadi.

Dengan kembali mengintegrasikan data visibilitas untuk mengetahui luas daerah reduksi visibilitas dan membandingkannya untuk semua skenario simulasi, nilai reduksi visibilitas pada lokasi 2\_1 untuk semua skenario dapat diperhatikan pada gambar 4.10.



Gambar 4.9. Visibilitas pada lokasi 2\_1 – ketinggian 1.8 m untuk semua skenario simulasi

Pada gambar 4.10, dapat diperhatikan bahwa peningkatan ketinggian atap *platform* jauh lebih mengurangi daerah reduksi visibilitas, pada kapasitas volumetrik pembuangan asap yang sama, jika dibandingkan dengan peningkatan kapasitas volumetrik pembuangan asap pada ketinggian atap *platform* yang sama. Hal ini dapat diperhatikan dengan memperhatikan grafik luas daerah reduksi visibilitas pada skenario 1A, 1B, dan 2A pada ketinggian 1.8 m. Dapat diperhatikan bahwa pengurangan luas reduksi visibilitas dari 1A dan 1B lebih besar dibandingkan dari 1A dan 2A.

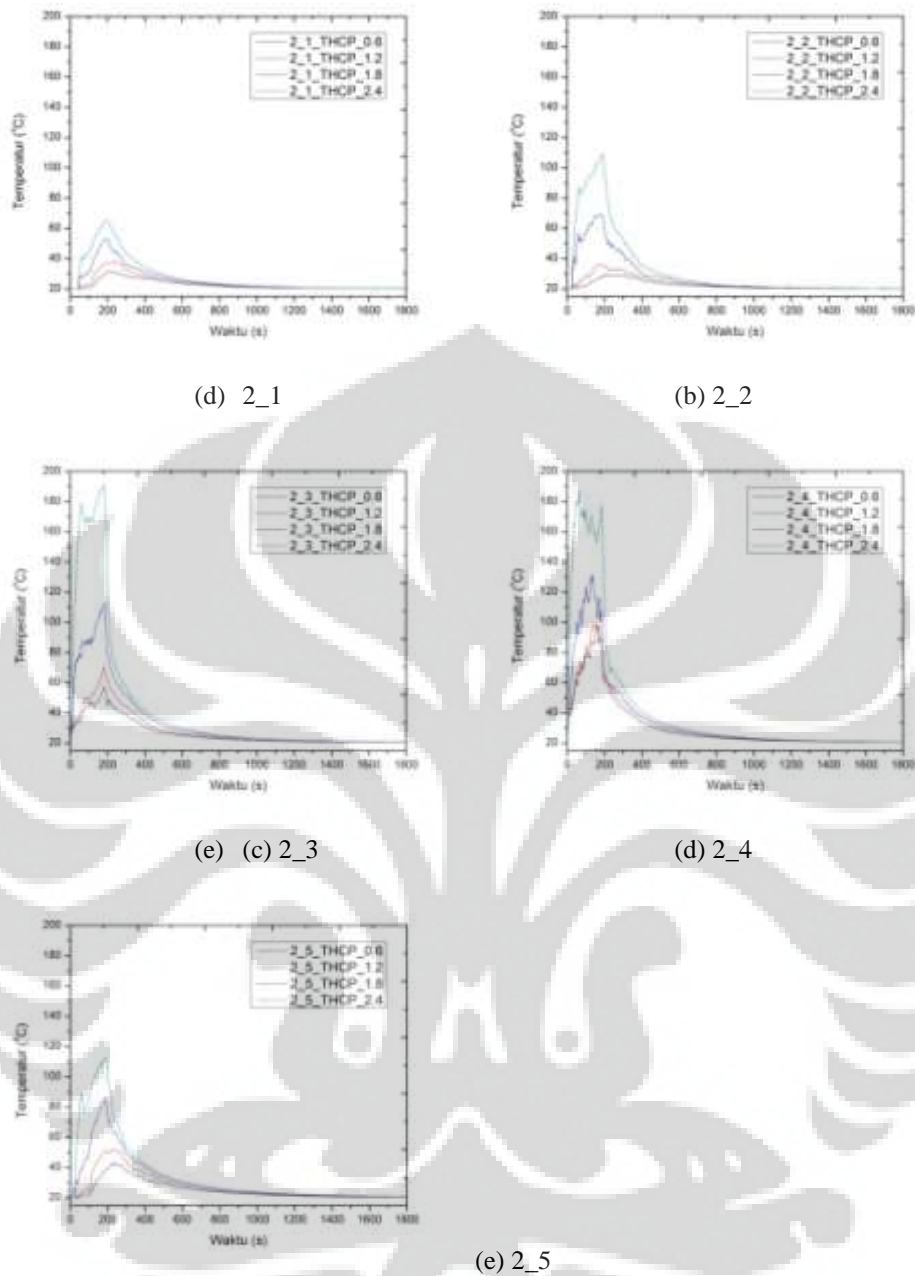


Gambar 4.10. Luas daerah reduksi visibilitas pada semua skenario simulasi untuk lokasi 2\_1

#### 4.4. Distribusi temperatur

Selain visibilitas, distribusi temperatur juga berpengaruh besar terhadap keselamatan penumpang pada saat kebakaran terjadi. Variasinya terhadap waktu, yang relevan terhadap besar dan lamanya kebakaran terjadi serta peran dari beberapa peralatan pemadaman kebakaran, baik manual maupun otomatis, perlu ditinjau untuk memperkirakan seberapa lama waktu yang tersedia bagi penumpang untuk menyelamatkan diri.

Distribusi temperatur terhadap waktu pada saat kebakaran terjadi juga dapat menjadi acuan spesifikasi teknis terhadap peralatan keselamatan kebakaran yang diinstalasi pada lokasi kebakaran, misal *sprinkler*, fan pembuangan asap, datektor asap, dan lain – lain. Sederhananya, misal ingin ditinjau reliabilitas fan pembuangan asap, maka distribusi temperatur dapat menjadi acuan spesifikasi teknis terhadap fan tersebut agar dapat beroperasi pada temperatur maksimum pada rentangan waktu tertentu.



Gambar 4.11. Distribusi temperatur zona peron pada skenario 1A

Dapat diperhatikan pada gambar 4.11, distribusi temperatur pada ketinggian 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m, dan 2.4 m untuk lokasi 2\_1, 2\_2, 2\_3, 2\_4, dan 2\_5 pada kapasitas pembuangan asap dan volume peron sebesar  $3000 \text{ m}^3/\text{jam}$  dan  $5070 \text{ m}^3$  (skenario 1A).

Dari gambar 4.11 dan rincian data hasil simulasi, dapat diamati bahwa waktu untuk menyelamatkan diri, dengan merujuk kepada tabel 2.2, yaitu sebelum temperatur pada ketinggian 1.8 m sebesar  $80^\circ\text{C}$  adalah 55.8 detik, 32.4 detik, dan

162 detik untuk lokasi 2\_3, 2\_4, dan 2\_5. Dapat diamati bahwa pada ketinggian 1.8 m, lokasi 2\_1 dan 2\_2 tidak mengalami kondisi yang mengkhawatirkan.

Namun, jika peninjauan mengenai keselamatan penumpang ditinjau pada ketinggian 2.4 m, maka waktu yang tersedia untuk menyelamatkan diri adalah selama 55.8 detik, 16.2 detik, 14.4 detik, dan 50.4 detik untuk lokasi 2\_2, 2\_3, 2\_4, dan 2\_5.

Dapat diperhatikan pada tabel 4.1, waktu dimana temperatur sebesar  $80^{\circ}\text{C}$  tercapai untuk semua skenario pada ketinggian 1.8 m pada zona peron. Dengan  $d(\text{m})$  adalah jarak relatif lokasi terhadap sumber kebakaran dan “-” yang menunjukkan bahwa pada lokasi tersebut, temperatur  $80^{\circ}\text{C}$  tidak tercapai. Jika peninjauan hanya berdasarkan temperatur, dapat diamati bahwa lokasi 2\_1, 2\_2, dan 2\_5 pada skenario A, relatif aman terhadap temperatur sebesar  $80^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan untuk skenario B, semua lokasi pada  $H = 1.8 \text{ m}$ , aman terhadap temperatur sebesar  $80^{\circ}\text{C}$ .

Tabel 4.1.  $t_{80^{\circ}\text{C}}$  pada  $H = 1.8 \text{ m}$  – zona peron

Zona Peron										
$t_{80^{\circ}\text{C}}$ pada ketinggian 1.8 m (s)										
d(m)	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
-46.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-26.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6.3	55.05	39.2	55.05	56.4	57	-	-	-	-	-
3.7	31.6	22.7	33.4	22.7	33.4	-	-	-	-	-
23.7	161	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pada tabel 4.2, waktu dimana temperatur  $80^{\circ}\text{C}$  tercapai pada ketinggian 2.4 m pada zona peron dapat diamati. Dari tabel ini, dapat diperhatikan bahwa pada lokasi yang paling dekat dengan sumber kebakaran, temperatur sebesar  $80^{\circ}\text{C}$  relatif cepat untuk tercapai. Bahkan untuk skenario B, dimana volume peron sebesar  $6760 \text{ m}^3$  dengan ketinggian atap peron sebesar 4 m, temperatur sebesar  $80^{\circ}\text{C}$  pada ketinggian 2.4 m tercapai, dimana hal ini tidak terjadi pada ketinggian 1.8 m. Hal ini dapat dimengerti dengan mengacu kepada akumulasi asap yang terjadi pada atap peron sehingga distribusi temperatur pada daerah yang semakin dekat dengan daerah akumulasi asap akan memiliki besaran temperatur yang lebih besar.



Tabel 4.2.  $t_{80^{\circ}C}$  pada H = 2.4 m – zona peron

Zona Peron										
$t_{80^{\circ}C}$ pada ketinggian 2.4 m (s)										
d(m)	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
-46.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-26.3	56.4	104.6	56.4	51.4	157.6	-	-	-	-	-
-6.3	17.1	13.9	17.1	13.9	17.1	178.3	134.8	164.1	160.8	-
3.7	14.1	11.4	14.1	11.4	14.1	123.6	116	116	153	-
23.7	49.3	42.7	49.3	42.7	49.3	-	-	-	-	-

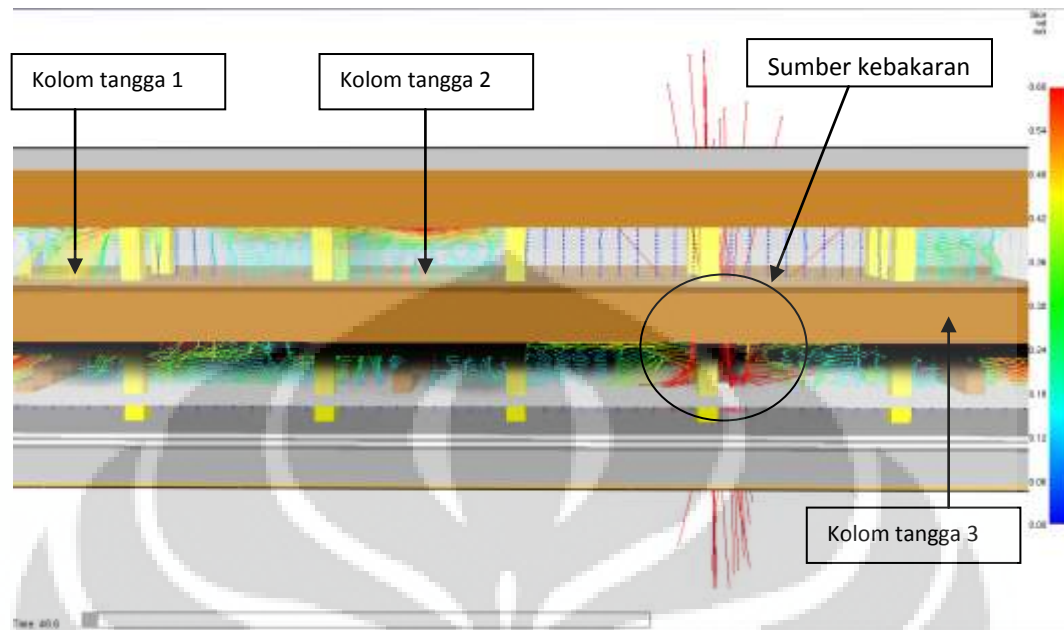
Dari pembahasan di atas, dapat diambil kesimpulan sementara bahwa asap memiliki kontribusi yang relatif besar terhadap penyebaran temperatur, disamping api sebagai sumber kebakaran. Oleh karena itu, peninjauan mengenai lamanya waktu yang tersedia sebelum temperatur  $80^{\circ}C$  tercapai, belum cukup jika yang ditinjau hanyalah zona peron. Pengamatan juga perlu dilakukan terhadap penyebaran asap secara keseluruhan pada stasiun.

Secara keseluruhan, asap menyebar sampai ke zona *concourse* pada detik kelima puluh setelah kebakaran. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.12, dengan vektor aliran massa, untuk skenario 1A. Dapat diperhatikan bahwa penyebaran asap yang mencapai zona *concourse*, dapat pula disebabkan oleh instalasi *smoke exhaust* di setiap zona *concourse* yang bertepatan dengan kolom setiap tangga<sup>11</sup>. Setidaknya, instalasi *smoke exhaust* pada setiap kolom tangga pada zona *concourse*, membantu penyebaran asap untuk mencapai zona tersebut. Dikarenakan hal itu juga, *dropwall* yang diinstalasi di setiap kolom tangga pada bagian langit – langit zona peron, tidak memiliki performa seperti yang diinginkan (yaitu untuk menahan penyebaran asap menuju zona lainnya).

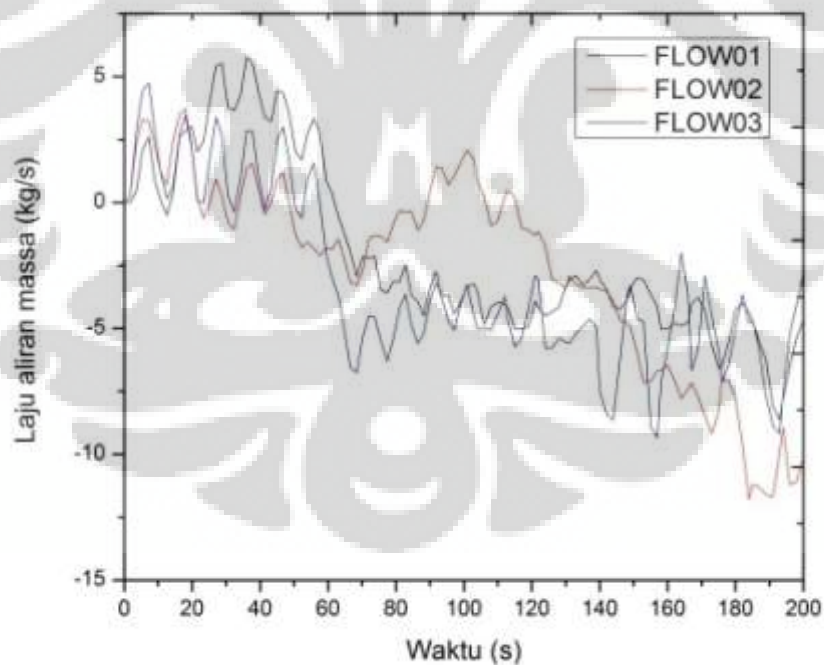
Pada gambar 4.13, penyebaran asap menuju zona *concourse* pada kebakaran untuk skenario 1A dapat diperhatikan. Dari grafik ini, penyebaran asap dapat lebih jelas diperhatikan, khususnya untuk detik – detik awal kebakaran terjadi. Pola grafik yang jelas terlihat adalah, bahwa *mass flow* untuk ketiga kolom tangga sama – sama menurun pada saat detik ke – 60, atau pada saat *smoke*

<sup>11</sup> Demi kesederhanaan penjelasan, kolom pertama, kedua, dan ketiga adalah secara berurutan dari kiri ke kanan relatif terhadap gambar 4.12.

*exhaust* aktif. Sebelum *smoke exhaust* aktif, asap bahkan sudah mulai menuju zona *concourse* dengan pola yang membesar dan mengecil.

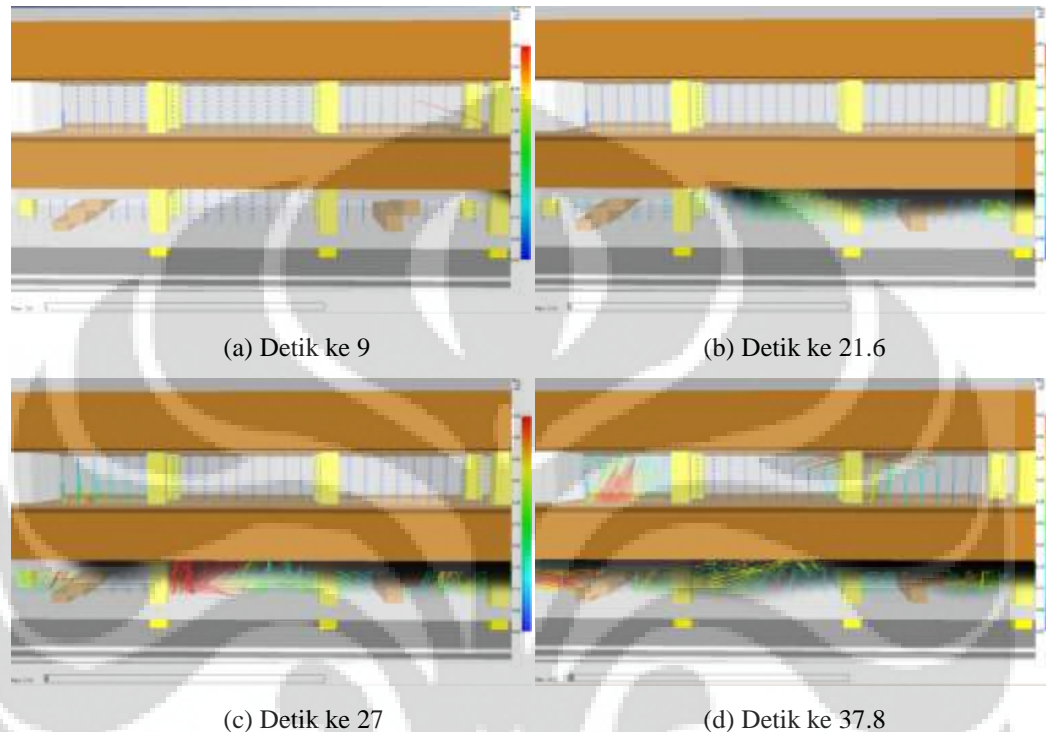


Gambar 4.12. Penyebaran asap pada detik ke - 50 kebakaran skenario 1A



Gambar 4.13. Laju aliran massa pada setiap kolom tangga skenario 1A

Terlihat bahwa laju aliran massa, untuk detik – detik awal kebakaran terjadi, paling besar pada kolom tangga pertama stasiun. Sedangkan dari pengamatan visual, asap pertama kali menyebar menuju zona *concourse* melalui kolom kedua stasiun. Pengamatan secara visual, pada detik – detik awal kebakaran terjadi, dapat dilakukan dengan memperhatikan gambar 4.14.

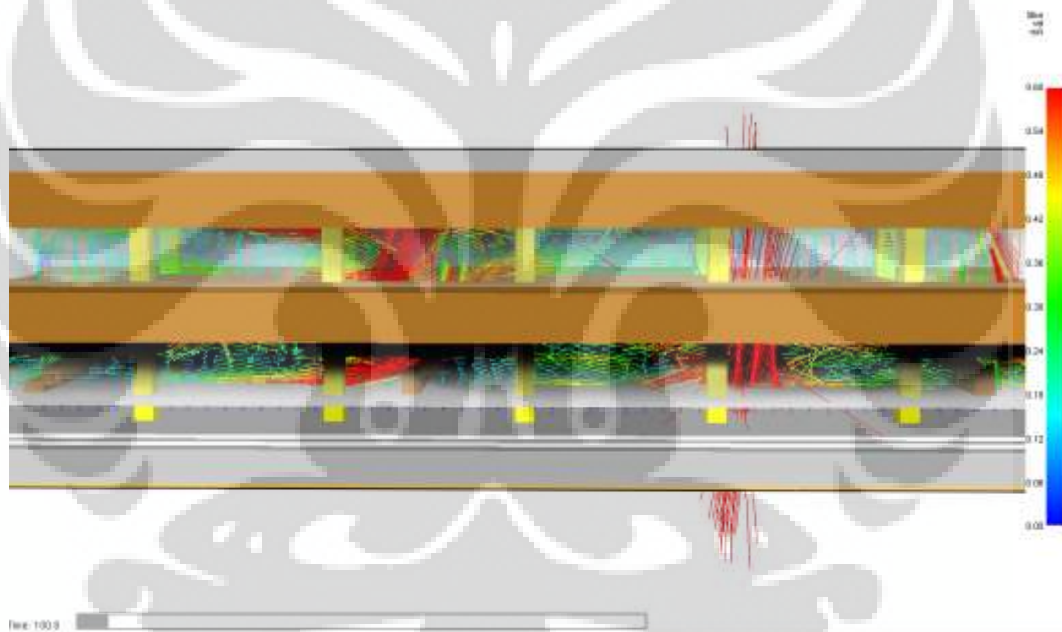


Gambar 4.14. Penyebaran asap dan laju aliran massa pada setiap kolom tangga skenario 1A

Pada gambar 4.14, dapat dijelaskan bahwa hasil rekaman data yang didapatkan pada simulasi untuk laju aliran massa di setiap kolom tangga, tidak hanya merepresentasikan penyebaran asap menuju zona *concourse*. Hal ini dijelaskan sebagai berikut. Pada detik ke 9, kebakaran baru saja terjadi dan penyebaran asap belum mencapai kolom tangga pertama dan kedua. Pada detik ke 21.6, asap sudah menuju kolom tangga pertama namun belum memasuki zona *concourse* melalui kolom tangga kedua, yang mengartikan bahwa sampai saat ini *dropwall* masih melaksanakan perannya dalam menahan penyebaran asap. Pada detik ke 27, mulai terlihat bahwa laju aliran massa pada kolom tangga pertama mulai membesar, yang dimana hal ini diartikan oleh vektor aliran pada kolom tersebut. Jika dibandingkan dengan kolom kedua, representasi visual yang barusan dijelaskan tentunya sepakat dengan pola grafik pada gambar 4.13, yang dimana kolom pertama memiliki laju aliran massa yang lebih besar dibandingkan dengan

kolom tangga kedua. Hal ini dapat disebabkan oleh banyaknya udara yang tertekan oleh pergerakan asap, yang pada akhirnya menuju zona *concourse*. Pada detik ke 37.8, dapat diperhatikan bahwa asap sudah mulai menyebar menuju zona *concourse* melalui kolom tangga kedua. Namun, jika melihat besaran vektornya, dapat diperhatikan bahwa meskipun kolom tangga pertama masih dapat mempertahankan asap untuk tetap berada pada zona peron, namun laju aliran massa pada kolom pertama lebih besar jika dibandingkan dengan kolom tangga kedua.

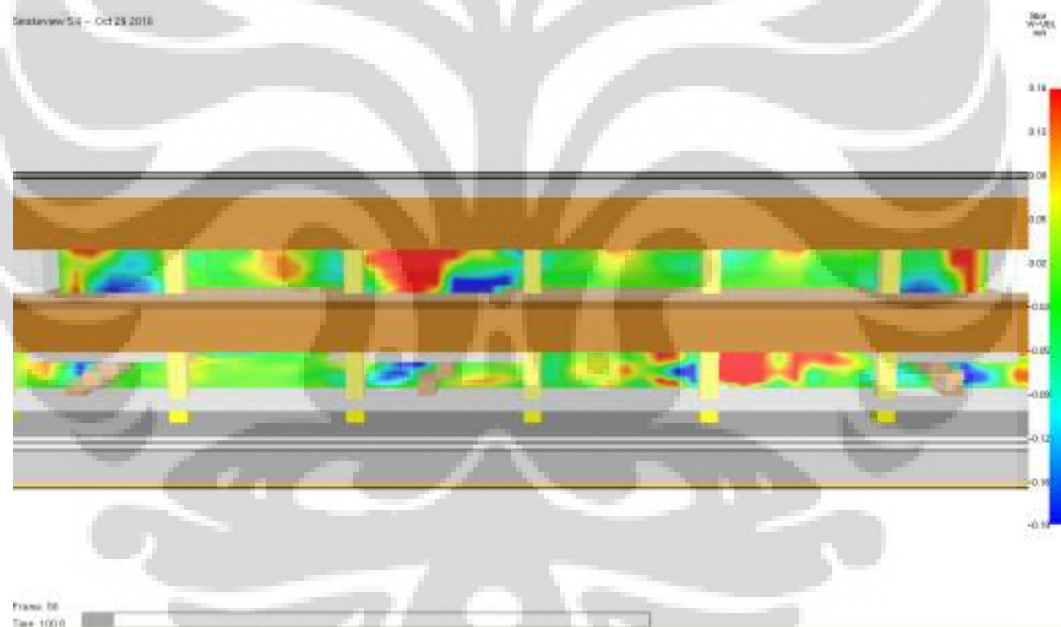
Sedangkan untuk laju aliran massa pada detik ke 100, dapat diperhatikan dari gambar 4.13 dan 4.15, yang dimana pada rentang waktu tersebut, kolom tangga kedua memiliki laju aliran massa yang paling besar di antara kedua kolom tangga lainnya.



Gambar 4.15. Vektor aliran massa untuk setiap kolom tangga pada skenario 1A detik ke 100.8

Nilai laju aliran massa yang kurang dari pada nol, dapat dijelaskan dengan meninjau persamaan kontinuitas pada kebakaran kompartemen, yaitu persamaan 2.15. Dari persamaan tersebut, terdapat  $\sum_{j=1}^J \dot{m}_j$  yang merupakan laju aliran netto fluida keluar dari zona kontrol volume. Jadi, jika  $\sum_{j=1}^J \dot{m}_j = \dot{m}_{out} - \dot{m}_e - \dot{m}_s$ , dengan  $\dot{m}_{out}$ ,  $\dot{m}_e$ , dan  $\dot{m}_s$  adalah, masing – masing, laju aliran asap keluar dari kontrol volume, laju aliran massa fluida lingkungan memasuki aliran asap (*entrainment*), dan laju pembakaran bahan bakar, maka jika kontrol volume

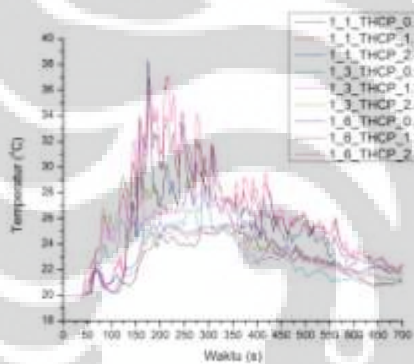
adalah keseluruhan dari zona peron, nilai hasil pengukuran laju aliran massa yang kurang dari nol mengartikan bahwa laju aliran asap keluar dari zona peron lebih kecil dibandingkan laju udara masuk ke zona peron dan laju pembakaran bahan bakar. Hal ini dapat diperhatikan sekilas dengan membandingkan gambar 4.16 dan 4.13. Pada gambar 4.13, dengan memperhatikan laju aliran massa untuk setiap kolom tangga pada detik ke 100, dapat diperhatikan bahwa kolom tangga pertama dan ketiga memiliki nilai yang jauh lebih kecil dari pada nol dibandingkan dengan nilai laju aliran massa pada kolom kedua. Hal ini dapat ditunjukkan juga dengan gambar 4.16, dimana pola yang sesuai dengan gambar 4.13 pada detik ke 100 dapat dilihat yang mengartikan bahwa laju asap keluar dari zona peron dan menuju zona *concourse*, untuk kolom pertama dan kedua, lebih kecil dibandingkan dengan laju aliran massa udara masuk ke dalam zona peron, begitu juga sebaliknya dengan kolom kedua.



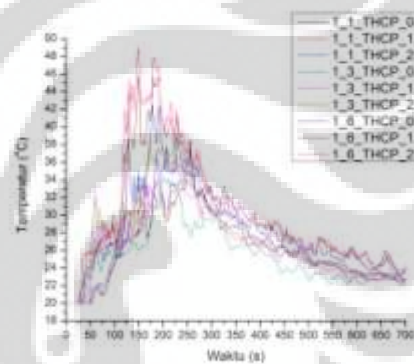
Gambar 4.16. nilai kecepatan fluida dalam arah z untuk skenario 1A

Dari penjelasan singkat di atas, dapatlah diambil kesimpulan bahwa asap menyebar menuju zona *concourse* sehingga peninjauan terhadap waktu kritis sebelum temperatur mencapai  $80^{\circ}\text{C}$  perlu juga dilakukan pada zona *concourse*. Peninjauan terhadap sudut pandang evakuasi dapat dilakukan hanya dengan memperhatikan perubahan temperatur terhadap waktu pada setiap zona *concourse* yang bertepatan dengan kolom tangga, yaitu lokasi 1\_1, 1\_3, dan 1\_6. Jadi, jika

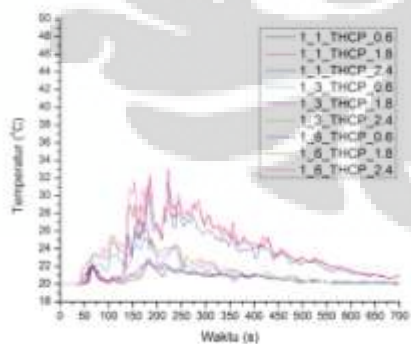
temperatur pada zona *concourse* yang bertepatan dengan kolom tangga sudah mencapai  $80^{\circ}\text{C}$ , maka evakuasi yang harus dilakukan melalui tangga sudah tidak memungkinkan lagi. Maka, parameter waktu yang berkaitan dengan kapan evakuasi melalui tangga tidak memungkinkan lagi, akan ditinjau. Hal ini dapat diperhatikan dengan singkat melalui gambar 4.17 (pada gambar ini hanya ditunjukkan distribusi temperatur pada skenario 1A, 1B, 3A, 3B, 5A, dan 5B, dengan ilustrasi selanjutnya dapat diperhatikan pada Apendix ...). Dari gambar tersebut dapat diperhatikan bahwa zona peron, untuk lokasi 1\_1, 1\_3, dan 1\_6 yang bertepatan dengan kolom tangga pada ketinggian 0.6 m, 1.8 m, dan 2.4 m, tidak mencapai kondisi temperatur  $80^{\circ}\text{C}$ . Namun, hal menarik yang dapat diperhatikan adalah kondisi dimana skenario B memberikan distribusi temperatur yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan skenario A pada kapasitas smoke exhaust yang sama.



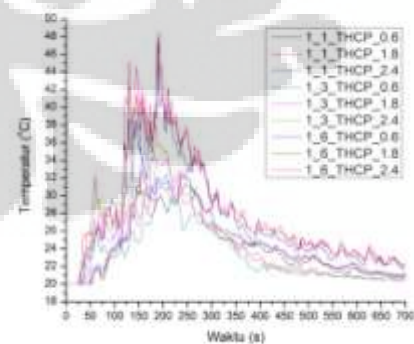
(a) 1A



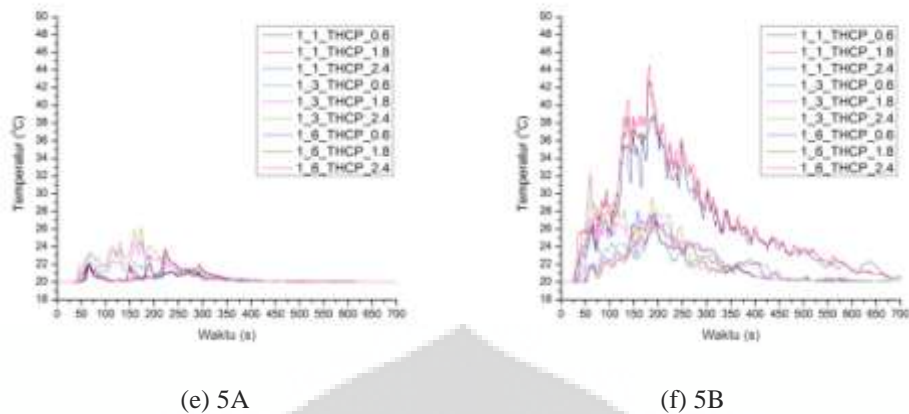
(b) 1B



(c) 3A



(d) 3B



Gambar 4.17. Distribusi temperatur zona *concourse*

Jika merujuk kepada batas nilai temperatur pada tabel 2.2, kolom tangga masih dapat digunakan selama kebakaran terjadi sampai selesai. Namun, peninjauan terhadap batas temperatur berdasarkan standar yang berlaku, misal NFPA 130, perlu juga untuk dilakukan. Kemudian, jika hanya berdasarkan temperatur, mungkin zona *concourse* relatif aman. Namun, peninjauan terhadap keselamatan tidak cukup hanya dengan berdasarkan temperatur, tapi juga harus berdasarkan konsentrasi asap dan tingkat obskurasi. Hal ini akan disampaikan, dengan merujuk kepada batas aman yang dituliskan pada NFPA 130 Apendix B, pada bab – bab selanjutnya.

#### 4.5. Analisa kontinuitas

Pada bab sebelumnya, sudah dijelaskan sedikit mengenai kontinuitas untuk menjelaskan penyebaran asap menuju zona *concourse*. Melalui persamaan kontinuitas (2.15), dapat dihitung massa asap yang terdapat di dalam zona peron berdasarkan laju aliran massa asap keluar zona peron dan laju aliran udara masuk ke dalam zona peron. Namun, peran dari smoke exhaust harus diikutsertakan pada detik ke 60, relevan terhadap waktu aktivasinya.

$$\Delta(\rho z_l) = m_{asap} = \int (-\sum_{j=1}^J \dot{m}_j) dt, \quad \text{detik ke } 0 - 59 \quad (4.1)$$

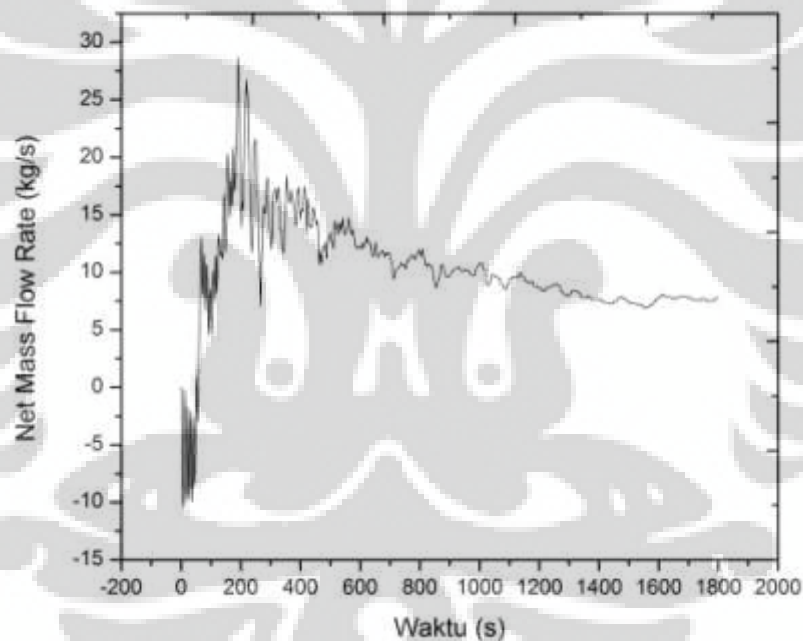
$$\Delta(\rho z_l) = m_{asap} = \int (-\sum_{j=1}^J \dot{m}_j) dt - \dot{V} \int \rho dt, \text{detik ke } 60 - 1800 \quad (4.2)$$

Dapat diperhatikan pada gambar 4.18, laju netto massa masuk menuju zona peron untuk skenario 1A. Dengan,

$$\sum_{j=1}^J \dot{m}_j = \dot{m}_{FLOW01} + \dot{m}_{FLOW02} + \dot{m}_{FLOW03} - \dot{m}_s,$$

Dimana  $\dot{m}_s$  adalah laju pembakaran bahan bakar yang bernilai 0.114 kg/s, relevan terhadap pembakaran gasoline yang menghasilkan laju produksi kalor sebesar 5 MW.

Terlihat bahwa terdapat nilai minus untuk awal – awal kebakaran terjadi. Nilai minus ini relevan dengan  $(-\sum_{j=1}^J \dot{m}_j)$  pada persamaan 3.2. Hal ini mengartikan bahwa pada detik – detik awal kebakaran terjadi, laju aliran massa keluar lebih banyak dibandingkan laju aliran massa masuk kedalam zona peron disertai laju pembakaran bahan bakar. Peristiwa ini sepakat dengan gambar 4.14, yang menunjukkan visualisasi pada detik – detik awal kebakaran yaitu detik ke 9, 21.6, 27, dan 37.8, yang dimana fluida lingkungan terdorong keluar zona peron akibat adanya pergerakan asap pada zona peron.



Gambar 4.18. Laju netto aliran massa masuk menuju zona peron (skenario 1A)

Kemudian, untuk mengetahui massa asap pada zona peron, perlu untuk mengetahui densitas dari asap yang diproduksi oleh pembakaran. Hal ini diperlukan untuk mengetahui pengaruh dari *smoke exhaust* terhadap jumlah massa asap yang terdapat pada zona peron dari detik aktivasinya sampai simulasi selesai. Densitas asap dapat diperoleh dengan menggunakan data visibilitas yang telah diperoleh. Dikarenakan yang akan ditinjau adalah kontribusi *smoke exhaust*



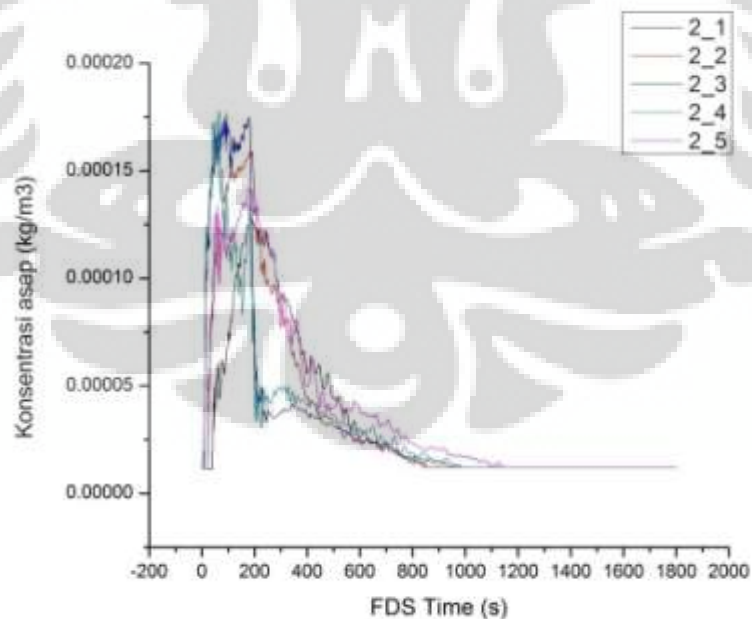
terhadap ekstraksi massa asap, maka yang akan dihitung adalah data visibilitas yang diperoleh pada ketinggian 2.4 m zona peron pada semua lokasi peron. Setelah densitas asap untuk semua lokasi zona peron pada ketinggian 2.4 m diperoleh, densitas asap di rata – ratakan untuk dengan kemudian digunakan pada perhitungan massa asap pada peron dengan menggunakan persamaan 3.2.

Banyaknya asap yang terakumulasi pada volume kontrol asap berdasarkan visibilitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13 atau 2.14. Dikarenakan nilai bawaan pada FDS untuk KS adalah 3, maka yang digunakan adalah persamaan 2.14. Setelah itu, dengan menggunakan persamaan 2.9, dimana nilai bawaan untuk  $k_m$  adalah 8700 disertai  $m$  (konsentrasi asap) yang adalah massa partikulat yang dihasilkan pada kompartemen dan berkumpul pada volume kontrol asap ( $\text{kg/m}^3$ ). Dengan demikian,

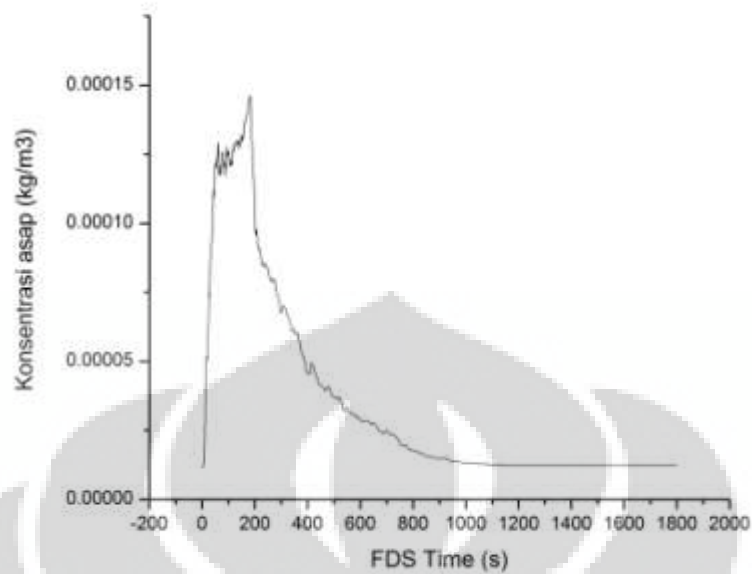
$$m = \frac{1}{2900 \cdot S}$$

dengan S adalah visibilitas.

Nilai densitas asap pada ketinggian 2.4 m semua zona peron pada lokasi 2\_1, 2\_2, 2\_3, 2\_4, dan 2\_5, dapat diperhatikan pada gambar 4.19. Dengan rata – ratanya yang dapat diperhatikan pada gambar 4.20.

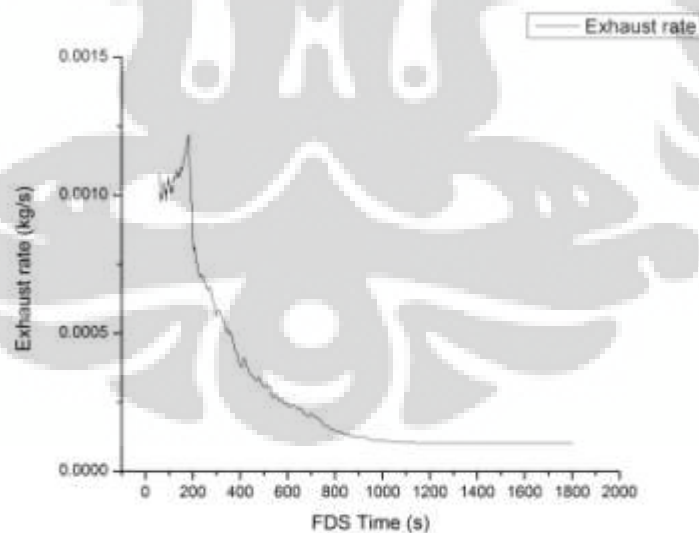


Gambar 4.19. Densitas asap pada ketinggian 2.4 m zona peron (skenario 1A)

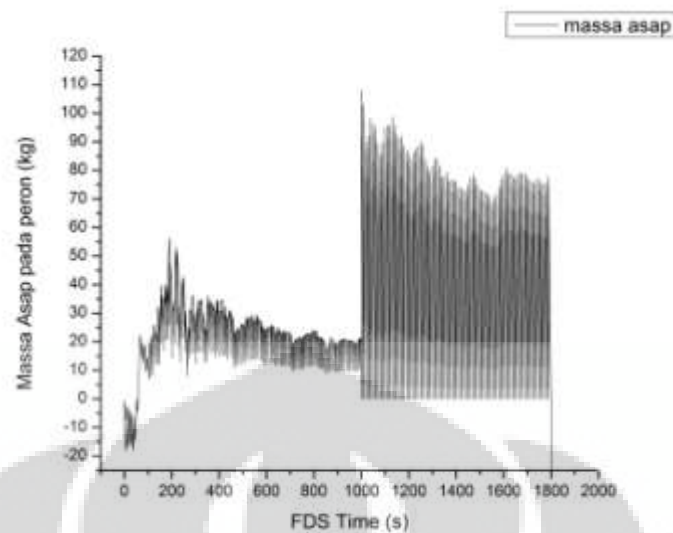


Gambar 4.20. Rata – rata densitas asap pada ketinggian 2.4 m zona peron (skenario 1A)

Setelah nilai konsentrasi asap rata – rata diperoleh, maka laju pembuangan massa asap oleh *smoke exhaust* dapat diperoleh dengan mengalikan antara kapasitas *smoke exhaust* dengan konsentrasi asap pada tiap waktunya. Hal ini dapat diperhatikan pada gambar 4.21.



Gambar 4.21. laju pembuangan massa asap oleh *smoke exhaust* peron pada skenario 1A



Gambar 4.22. Massa asap dalam peron (skenario 1A) berdasarkan persamaan 4.1 dan 4.2.

Dapat diperhatikan bahwa gambar 4.22 merepresentasikan nilai sangat tidak stabil. Hal ini juga ditambah dengan nilai minus yang terdapat pada massa asap dalam peron. Nilai minus ini disebabkan oleh *Net Mass Flow Rate* yang lebih kecil dibandingkan laju pembuangan massa *smoke exhaust* serta kondisi pertama – tama kebakaran terjadi dimana banyak dari udara pada peron terdorong menuju zona *concourse* akibat adanya pergerakan asap (gambar 4.13). Hal ini dapat disebabkan oleh nilai konsentrasi asap yang digunakan adalah nilai rata – rata, serta persamaan konservasi massa yang merupakan penurunan dari pemodelan kondisi tunak kebakaran pada kompartemen (Gambar 2.15). Sehingga, kondisi transien yang terdapat pada kondisi kebakaran tidak terepresentasi dengan baik. Kemudian, ketidak – stabilan nilai yang terdapat pada detik ke 1000 dan setelahnya disebabkan oleh rentang waktu iterasi/pengambilan data oleh FDS yang tidak seragam sehingga menyebabkan integrasi pada kalkulasi persamaan 4.1 dan 4.2 tidak seragam.

#### 4.6. Kondisi batas pada kondisi kebakaran

Pada saat kebakaran terjadi, terdapat beberapa faktor fisik yang harus diperhatikan untuk meninjau performa keselamatan kebakaran dari suatu bangunan. Berdasarkan NFPA 130 appendix B, terdapat beberapa batasan – batasan mengenai temperatur udara, konsentrasi karbon monoksida (CO), tingkat obskurasi asap, fluks kalor radiasi, kecepatan udara pada jalur kereta, dan tingkat

kebisingan. Pada skripsi ini, kecepatan udara pada jalur kereta dan tingkat kebisingan tidak ditinjau karena tidak mempengaruhi kondisi kebakaran pada stasiun yang disimulasikan, karena asumsi bahwa PSD tertutup, relevan terhadap kecepatan udara pada jalur kereta, serta tidak berpengaruhnya tingkat kebisingan terhadap kondisi kebakaran.

Batasan – batasan mengenai temperatur udara, konsentrasi CO, tingkat obskurasi asap, dan fluks radiasi, sebagaimana yang disebutkan pada NFPA 130 appendix B, adalah sebagai berikut:

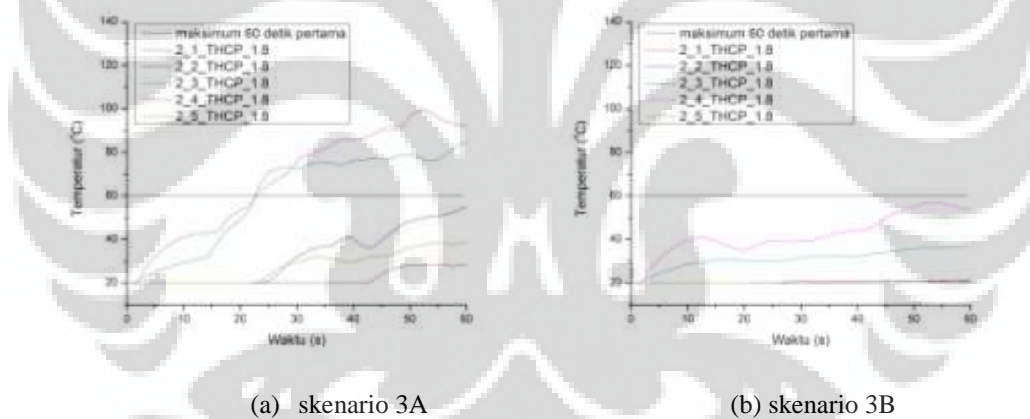
- Temperatur udara maksimum 60°C untuk beberapa detik pertama kebakaran terjadi, dan rata – rata 49°C atau kurang untuk 6 menit pertama kebakaran terjadi serta dengan kemudian menurun.
- Konsentrasi CO maksimal 2000 ppm untuk beberapa detik pertama kebakaran, rata – rata 1500 ppm atau kurang untuk 6 menit pertama kebakaran terjadi, rata – rata 800 ppm atau kurang untuk 15 menit pertama kebakaran terjadi, rata – rata 50 ppm atau kurang untuk waktu setelah 15 menit kebakaran terjadi sampai kebakaran selesai. Dengan nilai ini harus disesuaikan untuk ketinggian 984 m di atas ketinggian air laut.
- Tingkat obskurasi asap dapat tetap ditahan pada kondisi dimana tanda bercahaya dengan intensitas 7.5 ft – candela dapat tetap dilihat dari jarak 30 m dengan dinding dan pintu yang dapat tetap terlihat dari jarak 10 m.

Pada bagian berikut ini, akan dipaparkan distribusi temperatur dan visibilitas pada simulasi – simulasi yang telah dilakukan, dengan kemudian membandingkannya dengan standar NFPA 130 yang telah disebutkan di atas. Penjelasan mengenai konsentrasi CO akan dibahas pada bab 4.8.

#### **4.6.1. Temperatur**

Berdasarkan yang sudah dijelaskan sebelumnya, hal yang perlu ditinjau mengenai temperatur berdasarkan standar yang terdapat pada NFPA 130 adalah distribusi temperatur pada detik – detik pertama terjadinya kebakaran dan rata – rata temperatur pada 6 menit pertama kebakaran terjadi, yang masing – masing batasannya adalah 60°C dan 49°C.

Dapat diperhatikan pada gambar 4.23, temperatur untuk zona peron pada ketinggian 1.8 m untuk detik – detik pertama kebakaran terjadi pada skenario 3A dan 3B. Ketinggian ini dipilih menjadi peninjauan utama berdasarkan rata – rata ketinggian orang Indonesia. Dalam standar yang tertulis, detik – detik pertama tersebut tidak ditetapkan secara langsung. Oleh karena itu, pada peninjauan distribusi temperatur pada detik – detik pertama kebakaran terjadi, ditetapkan detik ke 0 sampai 60 sebagai detik – detik pertama kebakaran terjadi. Hal ini juga dikarenakan detik ke – 60 adalah waktu aktivasi *smoke exhaust*. Hal ini juga yang menyebabkan hanya ditampilkannya skenario 3A dan 3B. Karena, detik – detik awal kebakaran ditetapkan sebelum *smoke exhaust* aktif, maka perbedaan temperatur sebelum dapat dilihat berdasarkan variasi volume peron, antara skenario A dan B. Atau dengan kata lain, nilai temperatur berdasarkan waktu pada ketinggian 1.8 m zona peron untuk 60 detik pertama adalah sama antara semua skenario A, begitu juga dengan skenario B.

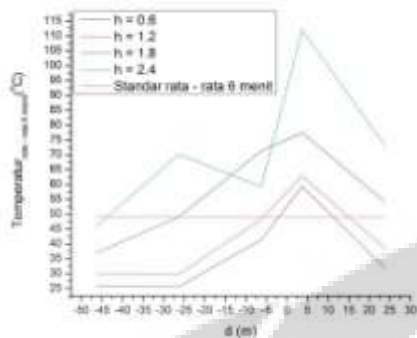


Gambar 4.23. Temperatur untuk 60 detik pertama zona peron skenario 3A dan skenario 3B

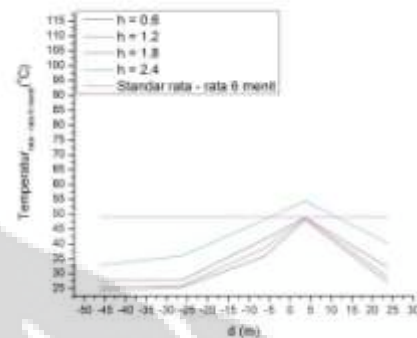
Berdasarkan gambar 4.23, jelaslah terlihat bahwa pada skenario 3A atau pada ketinggian zona peron sebesar 3 m, nilai temperatur pada 60 detik pertama pada kondisi kebakaran 5 MW, melampaui batas standar temperatur maksimal sebesar 60°C.

Sedangkan rata – rata temperatur pada 6 menit pertama kebakaran terjadi pada skenario kebakaran 1A sampai 4B dapat diperhatikan pada gambar 4.24. Pada gambar ini, d (m) adalah jarak relatif lokasi peninjauan (2\_1, 2\_2, 2\_3, 2\_4, 2\_5) terhadap lokasi sumber kebakaran. Berdasarkan gambar 4.24, dapat diperhatikan dengan seksama bahwa hanya sedikit sekali perbedaan pada

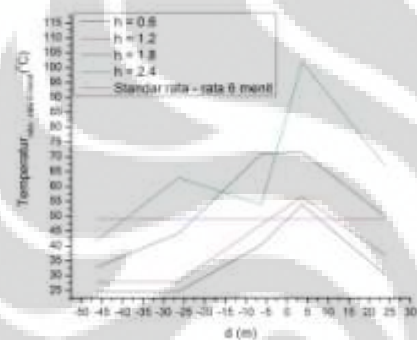
temperatur rata – rata 6 menit pertama kebakaran terjadi untuk skenario A dan B berdasarkan perubahan kapasitas *smoke exhaust*.



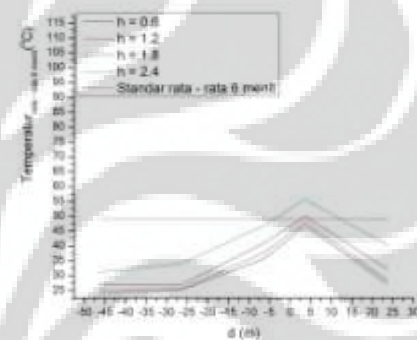
(a) 1A



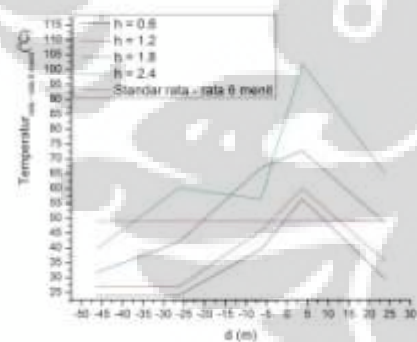
(b) 1B



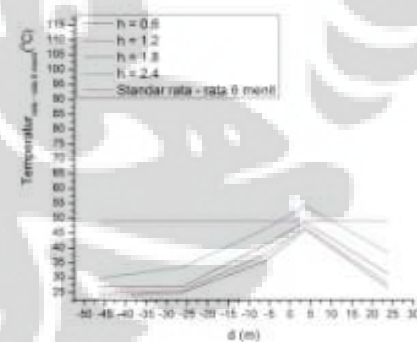
(c) 2A



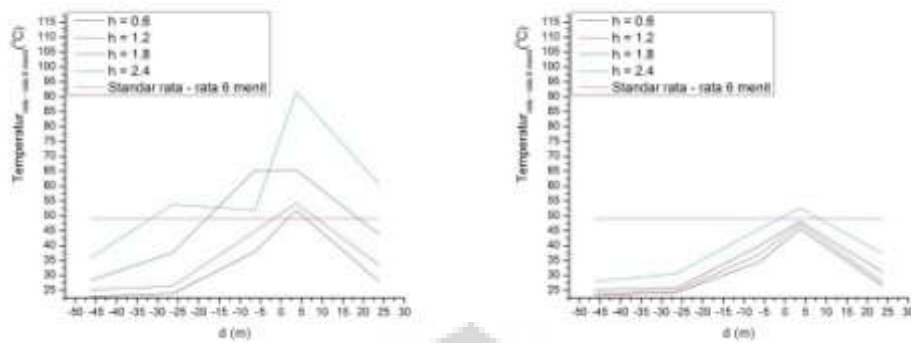
(d) 2B



(e) 3A



(f) 3B



(g) 4A

(h) 4B

Gambar 4.24. temperatur rata – rata 6 menit pertama saat kebakaran terjadi

Perbedaan yang sangat terlihat adalah nilai temperatur antara skenario A dan B pada kapasitas *smoke exhaust* yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa perkembangan temperatur pertama dan rata – rata temperatur 6 menit pertama kebakaran terjadi lebih besar dipengaruhi oleh perubahan volume zona peron. Oleh karena itu, ketinggian zona peron sebesar 4 m yang memberikan volume zona peron sebesar  $6760 \text{ m}^3$  lebih memadai dan sesuai dengan standar temperatur NFPA 130 dibandingkan ketinggian zona peron sebesar 3 m yang relevan dengan volume zona peron sebesar  $5070 \text{ m}^3$ .

#### 4.6.2. Tingkat obskurasi

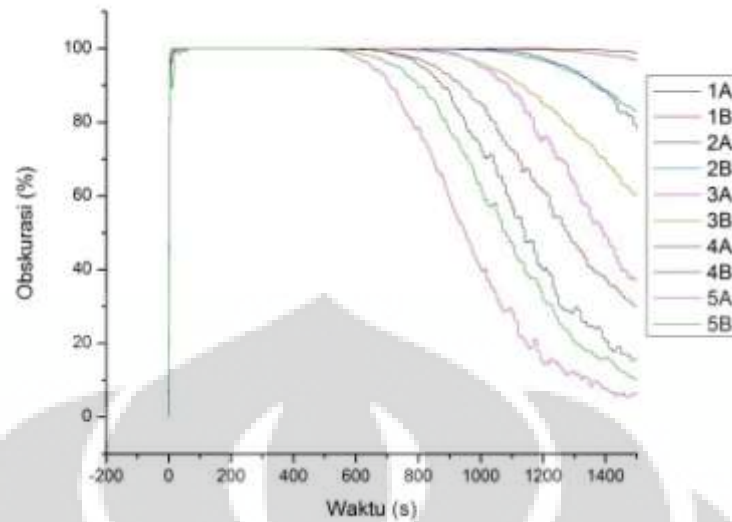
Obskurasi yang disebabkan oleh asap adalah suatu fenomena dimana intensitas cahaya tereduksi oleh adanya asap. Reduksi intensitas cahaya (berdasarkan persamaan 2.7) didefinisikan sebagai,

$$\frac{\Delta I}{I_0^\lambda} = \frac{I_0^\lambda - I_\lambda}{I_0^\lambda} = 1 - e^{-KL} \quad (4.3)$$

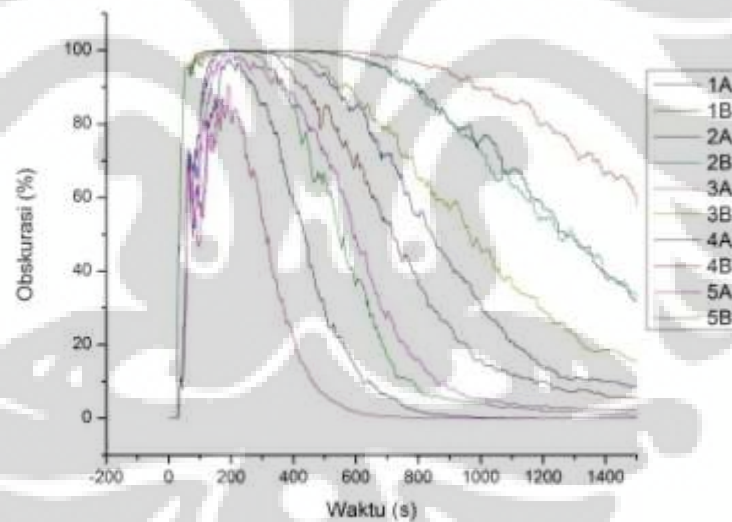
Berdasarkan persamaan 2.9 dan 2.14, dengan nilai  $C$  dan  $K_m$ , yang ditetapkan pada FDS, sebagai nilai bawaan adalah 3 dan  $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Dengan  $m$  adalah konsentrasi massa asap. Maka,

$$\text{Obskurasi} = (1 - e^{-K_m \cdot m \cdot L}) \times 100\%$$

Dapat diperhatikan pada gambar 4.25 dan 4.26, obskurasi asap pada zona peron dan *concourse*.



Gambar 4.25. Obskurasi zona peron pada ketinggian 1.8 m



Gambar 4.26. Obskurasi zona *concourse*

Selain sudah dijelaskan dijelaskan secara singkat pada akhir bab 4.4, waktu pada saat masuk ke zona *concourse* dapat diperhatikan pada gambar 4.26. dapat diperhatikan bahwa kapasitas *smoke exhaust* 4000 m<sup>3</sup>/jam – ketinggian zona peron 3 m (skenario 1B) memiliki nilai obskurasi yang paling besar dibandingkan variasi parameter lainnya. Secara keseluruhan, berdasarkan gambar 4.26, ketinggian zona peron yang lebih besar pada kapasitas *smoke exhaust* yang sama

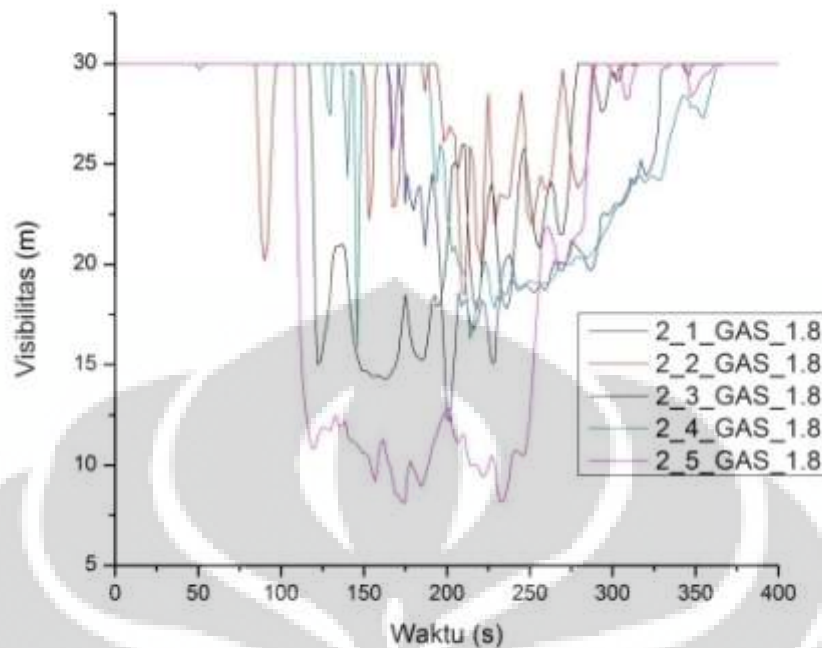


memberikan nilai obskurasi yang lebih besar. Atau dengan kata lain, semakin tinggi zona peron, maka semakin banyak atau cepat asap menyebar ke zona *concourse*.

Sedangkan gambar 4.25 menunjukkan bahwa obskurasi sudah meningkat begitu tajam hingga 100 % dengan pengaruh dari perubahan kapasitas *smoke exhaust* dan ketinggian zona peron yang berpengaruh pada waktu dimana obskurasi mulai menurun, dimana kebakaran 5 MW HRR berhenti pada detik ke 180. Namun, nilai obskurasi ini tidak dapat menjadi tolak ukur tunggal karena posisinya yang berada di tengah zona peron (relatif terhadap sumbu y) dan bertepatan dengan sumber kebakaran. Sehingga nilai obskurasi pada gambar 4.25 bukan merupakan obskurasi dari hasil akumulasi asap, namun merupakan representasi dari asap hasil pembakaran secara langsung.

Berdasarkan standar NFPA, tingkat obskurasi asap harus dapat tetap ditahan pada kondisi dimana tanda bercahaya dengan intensitas 7.5 ft – candela dapat tetap dilihat dari jarak 30 m dengan dinding dan pintu yang dapat tetap terlihat dari jarak 10 m. Batasan dimana dinding dan pintu untuk dapat tetap dilihat dari jarak 10 m dapat diaplikasikan pada gambar 4.9. Hal ini dikarenakan nilai konstanta proporsional antara visibilitas dan konstanta *light extinction* yang ditetapkan, secara bawaan, pada FDS adalah 3 dan relevan dengan komponen bangunan seperti dinding dan pintu.

Pada gambar 4.9, nilai visibilitas ditunjukkan pada lokasi 2\_1 yang bertepatan dengan tangga sebagai laluan evakuasi dan sesuai dengan nilai konstanta proporsional komponen bangunan. Pada gambar tersebut, ditunjukkan bahwa visibilitas yang memenuhi standar dimana komponen bangunan harus terlihat paling tidak dari jarak 10 m adalah skenario 5B yang relevan dengan kapasitas *smoke exhaust* sebesar 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron sebesar 4 m. Dapat diperhatikan gambar 4.27 yang menunjukkan visibilitas untuk zona peron – ketinggian 1.8 m skenario 5B.



Gambar 4.27. Visibilitas zona peron – ketinggian 1.8 m skenario 5B

Dari gambar 4.27, dapat dilihat bahwa satu – satunya lokasi yang mengkhawatirkan dan tidak sesuai atau dibawah nilai 10 m adalah lokasi 2\_5 atau 23.7 m dari sumber kebakaran, searah sumbu x.

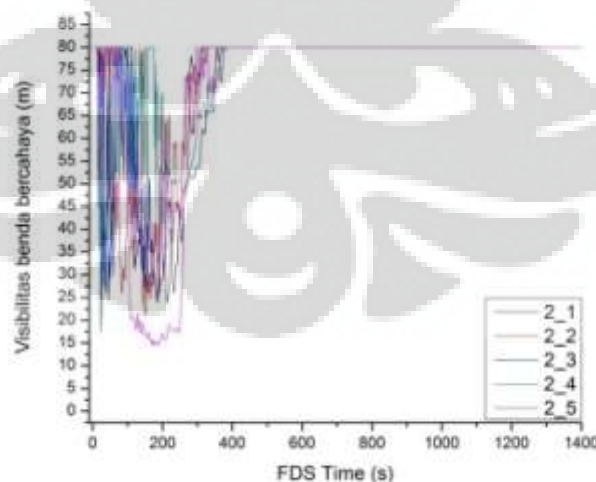
Sedangkan untuk mendapatkan nilai visibilitas untuk benda – benda yang mengeluarkan cahaya, misal tanda keluar atau tangga darurat, konstanta proporsional yang digunakan sesuai persamaan 2.13 adalah 8. Dengan nilai bawaan konstanta proporsional pada FDS adalah 3, maka kalkulasi visibilitas untuk benda yang mengeluarkan cahaya dapat dilakukan dengan menggunakan data visibilitas dari hasil simulasi untuk mendapatkan konsentrasi massa (m) dengan menggunakan persamaan 2.14 dan dengan kemudian menggunakan m pada persamaan 2.13 untuk mendapatkan nilai visibilitas benda yang mengeluarkan cahaya pada tempat tersebut.

Berdasarkan pembahasan sebelumnya (gambar 4.9 dan 4.27) mengenai batas visibilitas pada komponen struktur bangunan, skenario 5B menunjukkan visibilitas yang paling besar di antara skenario lainnya. Dengan demikian, visibilitas untuk benda yang mengeluarkan cahaya akan ditinjau pada skenario 5B. Namun, dikarenakan benda bercahaya difungsikan sebagai suatu tanda

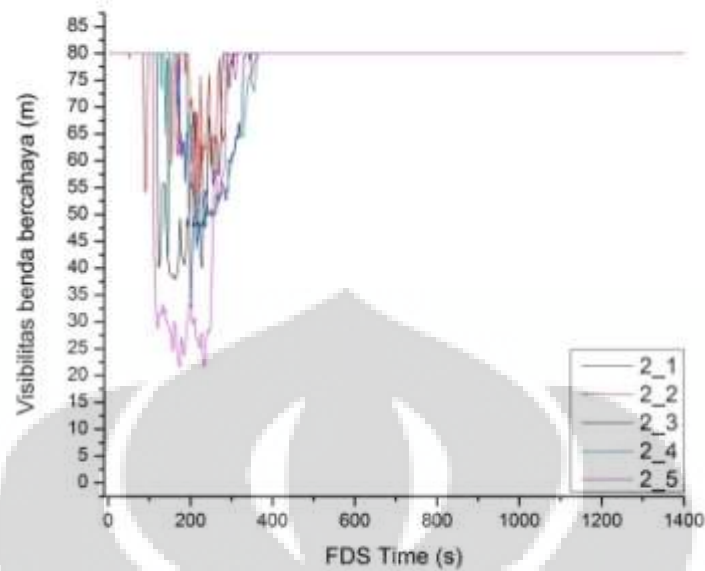
penunjuk, misal tanda penunjuk jalur evakuasi atau tangga, maka nilai visibilitas pada benda bercahaya akan ditinjau pada ketinggian 2.4 m.

Dapat diperhatikan pada gambar 4.28, nilai visibilitas untuk benda yang mengeluarkan bercahaya pada skenario 5B untuk semua lokasi pada zona peron di ketinggian 2.4 m. Dari gambar tersebut dapat diperhatikan bahwa benda yang mengeluarkan cahaya memiliki visibilitas paling kecil pada lokasi 2\_5 dengan nilai visibilitas minimum, kurang – lebih, sebesar 15 m. Sedangkan pada posisi lainnya, nilai visibilitas minimum berada pada rentang 20 m sampai 25. Berdasarkan standar NFPA 130, nilai ini masih berada di bawah yang seharusnya. Hal ini disebabkan oleh akumulasi asap yang turun sampai mencapai ketinggian tersebut. Akumulasi asap yang dapat mencapai ketinggian tersebut diperjelas dengan gambar 4.26 yang secara tidak langsung mengatakan bahwa asap sudah cukup tebal dan mampu melewati *dropwall*, sehingga memasuki zona *concourse*.

Namun, jika diasumsikan benda bercahaya tersebut berada pada ketinggian 1.8 m, maka nilai visibilitas pada zona *concourse* ketinggian 1.8 m skenario 5B memiliki nilai yang memenuhi standar NFPA 130, yaitu lebih besar atau sama dengan 30 m, kecuali lokasi 2\_5. Hal ini, dapat disebabkan oleh akumulasi asap yang terlalu banyak, dibandingkan lokasi lainnya, pada lokasi tersebut.

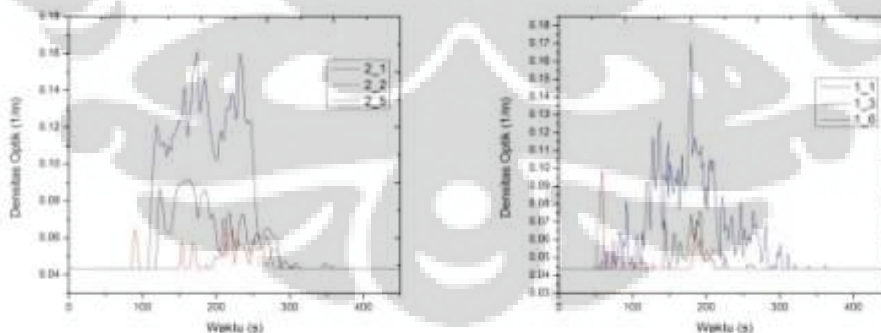


Gambar 4.28. Visibilas benda yang mengeluarkan cahaya pada skenario 5B di ketinggian 2.4 m zona peron



Gambar 4.29. Visibilitas benda yang mengeluarkan cahaya pada skenario 5B di ketinggian 1.8 m zona peron

Dapat pula diperhatikan pada gambar 4.31, densitas optik pada skenario 5B untuk lokasi 2\_1, 2\_2, dan 2\_5 pada elevasi 1.8 m, yang merupakan lokasi representatif penglihatan terhadap tangga sebagai jalur evakuasi. Dari gambar tersebut, dapat diperhatikan bahwa lokasi yang memiliki densitas optik terbesar adalah lokasi 2\_5 dibandingkan lokasi evakuasi lainnya.



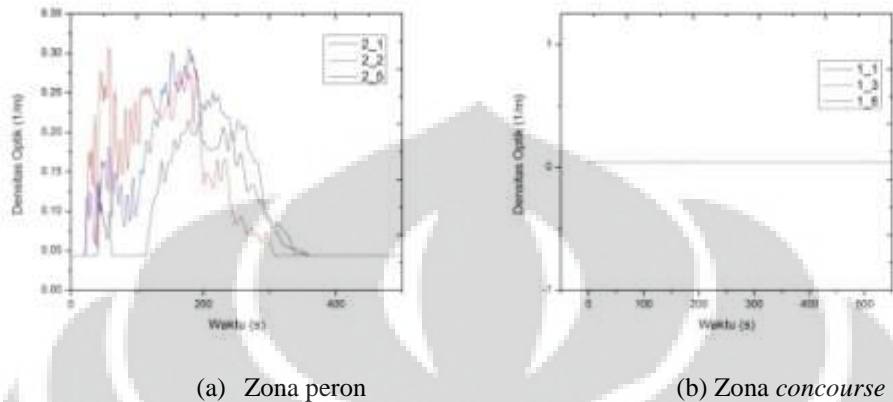
(a) Zona peron

(b) Zona *concourse*

Gambar 4.31. Densitas optik pada skenario 5B

Dengan membandingkan gambar 4.31 dengan gambar 4.32, dapat diperhatikan bahwa pada skenario 5A, dengan kapasitas *smoke exhaust* sebesar  $7000 \text{ m}^3/\text{jam}$  dan ketinggian zona peron 3 m, memiliki densitas optik yang sama

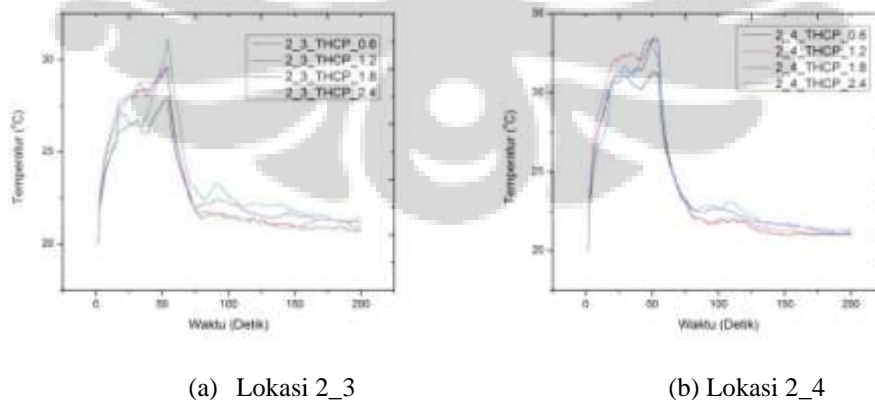
sekali tidak meningkat pada zona *concourse* – elevasi 1.8 m. Namun, densitas asap pada zona peron – elevasi 1.8 m memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan densitas asap pada skenario 5B dengan kapasitas *smoke exhaust* sebesar 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron 4 m.



Gambar 4.31. Densitas optik pada skenario 5A

#### 4.7. Pengaruh aktivasi *smoke exhaust* terhadap temperatur

Aktivasi *smoke exhaust* pada simulasi sebelumnya ditetapkan pada detik ke 60. Pemilihan waktu ini sesuai dengan referensi [17], yang sudah dijelaskan pada bab 3. Dengan demikian, perlu untuk diamati pengaruh waktu aktivasi terhadap distribusi temperatur di sekitar lokasi sumber kebakaran. Dapat diperhatikan pada gambar 4.30, temperatur pada lokasi yang berada di sekitar sumber kebakaran relevan terhadap waktu aktivasi *smoke exhaust* pada detik ke 10.



Gambar 4.30. Distribusi temperatur pada waktu aktivasi 10 detik

Dari gambar di atas, terlihat bahwa temperatur pada lokasi 2\_4 memiliki temperatur maksimal yang lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi 2\_3. Dengan perbedaan temperatur berdasarkan ketinggian pada masing – masing lokasi, tidak terlalu signifikan walaupun memang terlihat jelas bahwa temperatur pada elevasi 0.6 m memiliki nilai yang paling kecil dibandingkan elevasi lainnya (1.2 m, 1.8 m, dan 2.4 m).

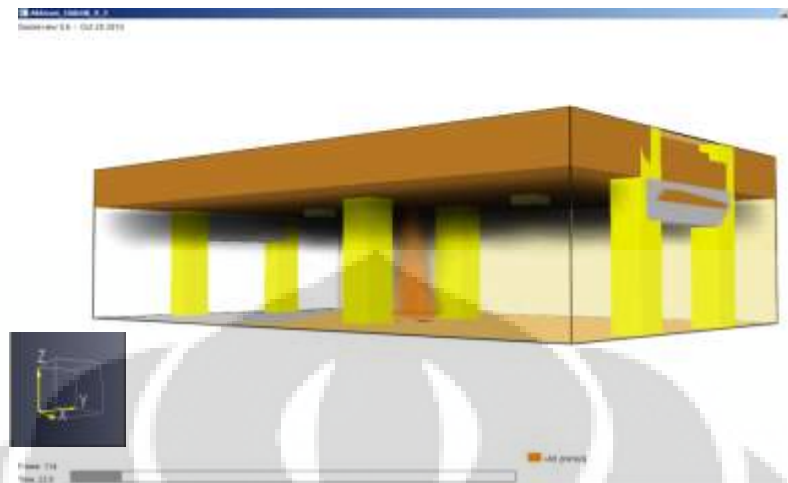
Dengan menggunakan persamaan empiris dari Back et al., seperti yang telah dijelaskan pada bab 2.6, fluks kalor pada elevasi 0.6 m dan 1.2 m lebih besar dibandingkan dengan fluks kalor pada elevasi 1.8 m dan 2.4 m. Dapat diperhatikan tabel 4.3 yang menunjukkan fluks kalor berdasarkan elevasi untuk lokasi 2\_3 dan 2\_4 berdasarkan persamaan empiris Back et al.

Tabel 4.3. Fluks kalor pada lokasi 2\_3 dan 2\_4

Elevasi	Fluks kalor, $q''$ (kW/m <sup>2</sup> )	
	Lokasi 2_3	Lokasi 2_4
0.6 m	1.464 kW/m <sup>2</sup>	2.06 kW/m <sup>2</sup>
1.2 m	1.464 kW/m <sup>2</sup>	2.06 kW/m <sup>2</sup>
1.8 m	1.431 kW/m <sup>2</sup>	2.0125 kW/m <sup>2</sup>
2.4 m	1.1487 kW/m <sup>2</sup>	1.616 kW/m <sup>2</sup>

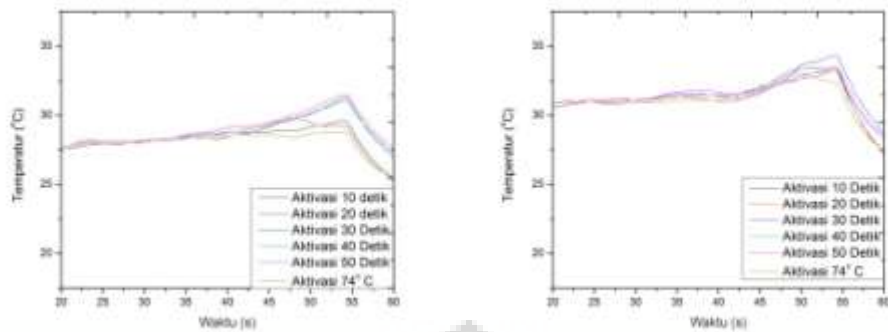
Terlihat pola pada gambar 4.30 dan tabel 4.3 memiliki sedikit perbedaan, khususnya untuk elevasi 0.6 m. Berdasarkan tabel 4.3, elevasi 0.6 m menerima fluks kalor yang lebih besar dibandingkan dengan fluks kalor yang diterima pada elevasi 2.4 m, yang pada gambar 4.30 memiliki temperatur maksimal yang paling besar. Hal ini dapat disebabkan oleh radiasi termal dari akumulasi asap yang tidak diperhitungkan pada persamaan empiris Back et al. Jika tidak terdapat akumulasi asap dan elevasi 2.4 hanya menerima fluks kalor dari api, maka pola temperatur dari simulasi mungkin akan menyerupai pola dari kalkulasi berdasarkan persamaan empiris Back et al. Dapat dilihat pada gambar 4.31, visualisasi hasil simulasi pada detik ke 22.8 yang menunjukkan akumulasi asap pada langit – langit peron dengan ketinggian lidah api yang setidaknya sesuai dengan persamaan 2.23 (Heskestad, referensi [16]) yaitu 4.33 m, relevan terhadap

pembakaran gasolin 5 liter dengan luas permukaan pembakaran  $1.25 \text{ m}^2$  dan diameter efektif 1.3 m.



Gambar 4.31. Visualisasi simulasi daerah sekitar sumber kebakaran pada detik ke 22.8.

Karena ditetapkan batasan terbuka pada bidang minimal  $x$  dan maksimal  $x$  daerah komputasi, maka akumulasi asap pada waktu aktivasi *smoke exhaust* 20 s, 30 s, 40 s, dan 50 s, tidak akan berbeda dengan pada akhirnya akan menghasilkan pola distribusi temperatur yang kurang lebih sama dan ditunjukkan pada gambar 4.32. Berdasarkan peninjauan terhadap gambar 4.31 dan tabel 4.3, akumulasi asap berperan penting terhadap penyebaran temperatur. Maka, jika tidak terdapat perbedaan akumulasi asap, dengan kondisi dimana laju produksi kalor sumber kebakaran sama dan api tidak menyebar, perbedaan waktu aktivasi *smoke exhaust* akan menghasilkan pola temperatur yang sama dan bergantung secara tunggal terhadap volume bahan bakar dan laju produksi kalor. Terlihat pada gambar 4.32, bahwa temperatur untuk lokasi 2\_3 dan 2\_4, elevasi 2.4 m pada semua waktu aktivasi *smoke exhaust*, menurun secara serentak kira – kira pada detik ke 54. Dimana pada detik ke 53.82, Sumber kebakaran yang berupa Gasoline 5 liter dengan luas permukaan pembakaran sebesar  $1.25 \text{ m}^2$ , habis terbakar.



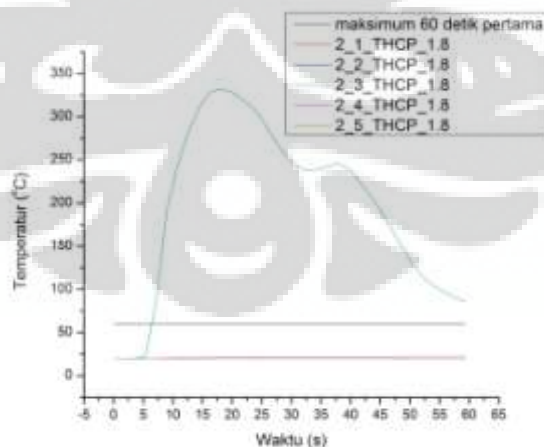
(a) Lokasi 2\_3

(b) lokasi 2\_4

Gambar 4.32. Temperatur pada lokasi 2\_3 dan 2\_4 elevasi 2.4 m pada simulasi daerah sekitar sumber kebakaran

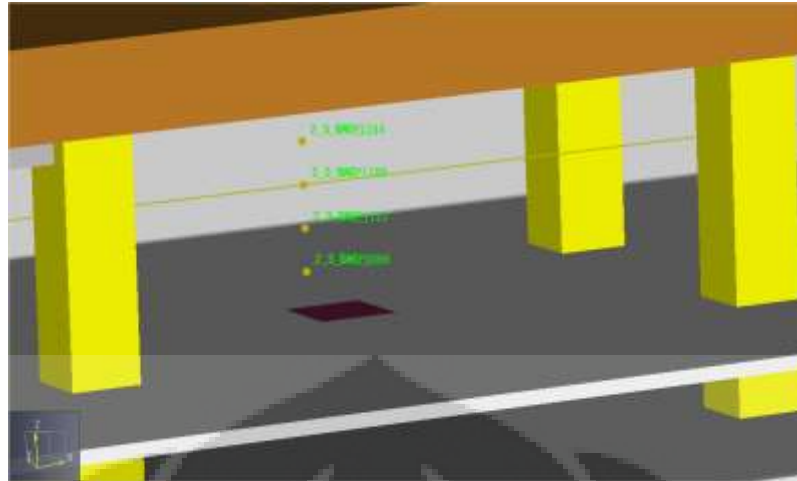
#### 4.8. Pengaruh peletakan instalasi smoke exhaust

Dengan menggunakan bahan bakar berupa gasoline 5 liter *pool fire*, dapat diperhatikan pada gambar 4.33 nilai temperatur untuk 60 detik pertama kebakaran terjadi pada zona peron – elevasi 1.8 m untuk kapasitas *smoke exhaust* 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron 4 m (skenario 5B) dengan *smoke exhaust* pada zona *concourse* yang tidak aktif. Dapat diperhatikan bahwa lokasi 2\_3 memiliki peningkatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi lainnya. Hal ini dikarenakan pada pengaturan letak sumber kebakaran, lokasi 2\_3 menjadi lebih dekat atau hampir bertepatan dengan sumber kebakaran. Hal ini seperti yang dapat diperhatikan pada gambar 4.34.



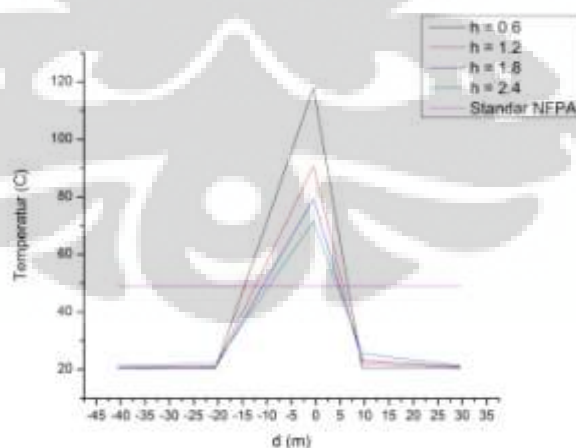
Gambar 4.33. Distribusi temperatur 60 detik pertama skenario 5B





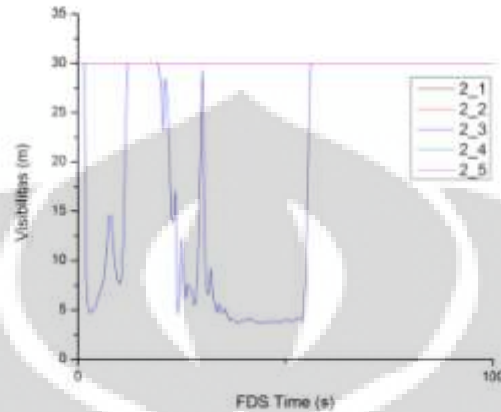
Gambar 4.34. Letak sumber kebakaran pada simulasi kebakaran tanpa *smoke exhaust* pada zona *concourse*

Kemudian, dapat diperhatikan pada gambar 4.35, distribusi temperatur untuk 6 menit pertama kebakaran terjadi pada semua lokasi untuk skenario kebakaran 5B. Sekali lagi dapat diperhatikan bahwa lokasi 2\_3 atau -0.5 m dari sumber kebakaran memiliki distribusi temperatur yang lebih besar. Oleh karena itu, peninjauan evakuasi cukup hanya dengan meninjau lokasi 2\_1, 2\_2, 2\_3, dan 2\_5. Jadi jika lokasi 2\_3 dikesampingkan karena lokasinya yang hampir bertepatan dengan sumber kebakaran, maka skenario 5B pada kebakaran gasoline 5 liter *pool fire* memiliki temperatur yang berada di bawah batas aman sesuai standar NFPA 130 sesuai dengan gambar 4.33 dan 4.35.

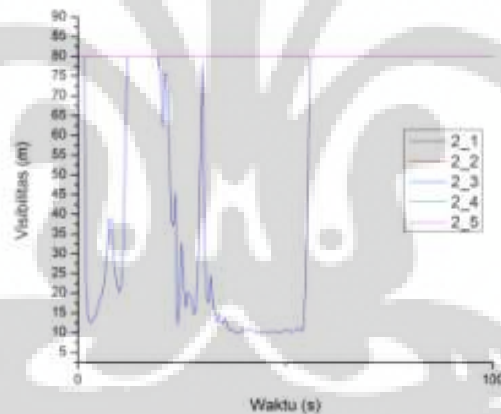


Gambar 4.35. Distribusi temperatur rata – rata 6 menit pertama pada skenario 5B

Kemudian, dapat juga diperhatikan visibilitas untuk struktur bangunan dan benda bercahaya pada skenario 5B pada semua lokasi – elevasi 1.8 m, pada gambar 4.36 dan 4.37. Sekali lagi, jika lokasi 3B dikesampingkan, maka visibilitas selalu berada pada nilai aman untuk semua waktu.



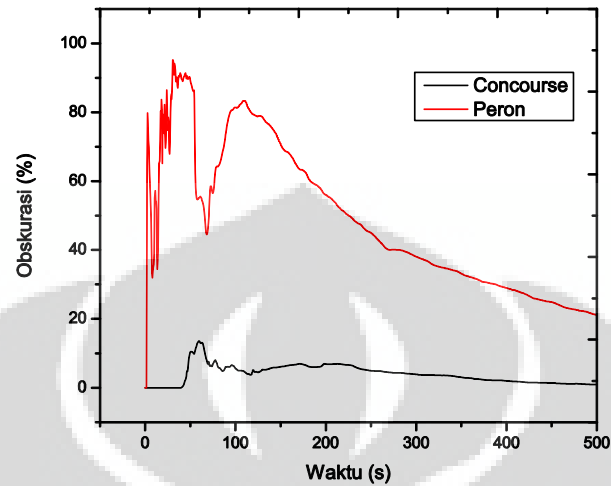
Gambar 4.36. Visibilitas struktur bangunan skenario 5B zona peron



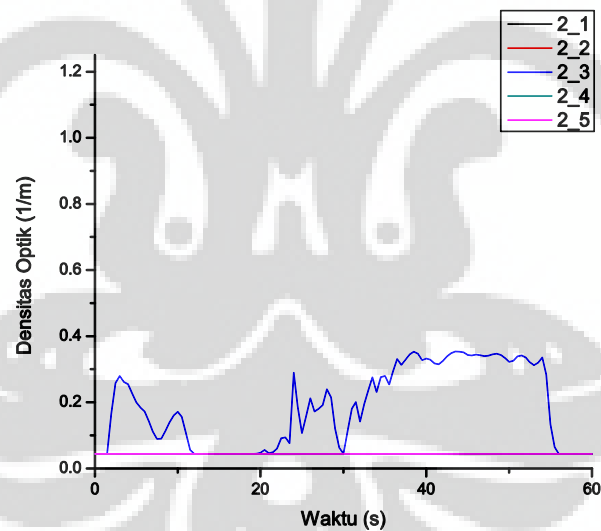
Gambar 4.36. Visibilitas benda bercahaya skenario 5B zona peron

Dengan kemudian, pergerakan asap menuju zona *concourse* dapat diperhatikan melalui nilai obskurasi pada zona *concourse* dan membandingkannya dengan zona peron. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.37. Sedangkan densitas optik untuk zona peron dapat diperhatikan pada gambar 4.38, dimana zona peron berada pada kondisi aman dengan mengesampingkan lokasi 2\_3 yang hampir tepat dengan sumber kebakaran. Dari gambar 4.37, dapat diambil kesimpulan bahwa pergerakan asap menuju zona *concourse* sangat sedikit. Disamping laju

produksi kalor dan durasi kebakaran pada bahan bakar yang lebih kecil, hal ini juga diakibatkan oleh *smoke exhaust* pada zona *concourse* yang tidak aktif.



Gambar 4.37. Obskurasasi untuk zona peron dan *concourse* pada ketinggian 1.8 m relatif terhadap lantai peron atau *concourse*



Gambar 4.38. Densitas Optik zona peron pada elevasi 1.8 m skenario 5B.

## BAB 5

### Kesimpulan dan Saran

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa terhadap data – data hasil simulasi yang sudah dijabarkan pada bab 4, diperoleh beberapa informasi inti yang setidaknya dapat memberikan masukan dan tuntunan terhadap penelitian selanjutnya.

Perubahan atau peningkatan kapasitas *smoke exhaust* hanya mengurangi luas daerah reduksi visibilitas. Adapun pengurangan terhadap minimum visibilitas sangatlah sedikit. Kontribusinya terhadap pengurangan luas daerah reduksi visibilitas juga sangat dipengaruhi terhadap desain sumber kebakaran yang ditetapkan. Pada simulasi tersebut, yang digunakan adalah sumber kebakaran dengan laju produksi kalor sebesar 5 MW dalam waktu 180 detik. Dari yang sudah dibahas sebelumnya, hampir terlihat jelas bahwa minimum visibilitas terdapat pada detik – detik dimana pembakaran terhenti. Jika seandainya kebakaran yang terjadi memiliki rentang waktu yang lebih besar, sangat memungkinkan untuk terdapatnya minimum visibilitas yang lebih kecil dari yang sudah dibahas, yaitu kurang lebih sebesar 5 m untuk lokasi 2\_1 pada skenario A dengan ketinggian zona peron sebesar 3 m.

Sedangkan perubahan ketinggian zona peron, selain juga berkontribusi terhadap pengurangan luas reduksi visibilitas, memiliki pengaruh besar terhadap minimum visibilitas yang bernilai kurang lebih adalah sebesar 7.5 m untuk lokasi 2\_1 – ketinggian 1.8 m dengan bahkan mencapai nilai 15 m untuk skenario 5B (kapasitas *smoke exhaust* 7000 m<sup>3</sup>/jam – ketinggian zona peron 4 m) pada lokasi yang sama. Seperti sebelumnya, minimum visibilitas pada ketinggian zona peron juga sangat dipengaruhi oleh desain pembakaran yang ditetapkan sebelumnya.

Dengan memperhatikan pergerakan asap melalui nilai obskurasi, terlihat bahwa pergerakan asap kebakaran pada ketinggian zona peron 4 m mencapai zona *concourse* lebih banyak dibandingkan dengan kebakaran pada zona peron dengan ketinggian 3 m. Hal ini dapat diperhatikan pada gambar 4.26, dimana zona *concourse* pada kebakaran dengan ketinggian zona peron 3 m, memiliki obskurasi yang lebih kecil dibandingkan dengan obskurasi pada kebakaran dengan

ketinggian zona peron 4 m, pada kapasitas *smoke exhaust* yang sama. Bahkan, dengan memperhatikan gambar 4.31, terlihat bahwa untuk ketinggian 1.8 m – lokasi 1\_1, 1\_3, dan 1\_6, zona *concourse* pada skenario 5A (kapasitas *smoke exhaust* 7000 m<sup>3</sup>/jam – ketinggian zona peron 4 m) memiliki densitas optik yang sangat kecil. Namun, jika dibandingkan dengan zona peron pada skenario 5B, zona peron pada skenario 5A memiliki densitas optik yang lebih besar.

Distribusi temperatur juga dapat digunakan untuk meninjau pergerakan asap. Dikarenakan peran asap yang juga berkontribusi terhadap peningkatan temperatur, maka pergerakan asap yang mencapai zona *concourse* dapat diperhatikan dari nilai temperatur pada lokasi 1\_1, 1\_3, dan 1\_6. Hal ini dapat diperhatikan pada gambar 4.17, yang sekali lagi menunjukkan bahwa skenario 5A memiliki distribusi temperatur, secara keseluruhan, pada lokasi 1\_1, 1\_3, dan 1\_6, yang lebih kecil dengan distribusi temperatur skenario 5B pada lokasi yang sama. Pada akhirnya, hal ini juga mengartikan bahwa asap yang bergerak pada skenario 5B dan menuju zona *concourse*, serta berkontribusi terhadap peningkatan temperatur, lebih besar dibandingkan skenario 5A.

Dengan meninjau kontinuitas dan pertukaran udara antara zona *concourse* dan zona peron, terlihat bahwa terdapat ketidakstabilan nilai hasil perhitungan massa asap yang terdapat pada peron. Hal ini disebabkan terutama oleh pengambilan data pada FDS yang tidak berada pada rentang waktu yang seragam. Kemudian, dalam perhitungan ini, digunakan model kebakaran zona yang ternyata sangat tidak sesuai untuk kondisi kebakaran dan pergerakan asap yang dinamik, relevan terhadap persamaan konservasi massa yang digunakan pada model kebakaran zona.

Berdasarkan distribusi temperatur, dengan asumsi kondisi temperatur yang membahayakan adalah sebesar 80°C, maka skenario B dengan ketinggian zona peron sebesar 4 m adalah yang paling aman relevan terhadap batasan temperatur sebesar 80 °C. Hal ini dapat diperhatikan pada tabel 4.1, dimana temperatur 80 °C pada ketinggian 1.8 m untuk lokasi 2\_1, 2\_2, 2\_3, 2\_4, dan 2\_5 skenario B, tidak tercapai. Pada batasan kondisi aman yang sesuai dengan standar NFPA 130, skenario A (ketinggian zona peron 3 m) juga menunjukkan nilai yang sangat tidak sesuai dengan standar NFPA 130. Pada ketinggian zona peron sebesar 4 m

(skenario B), nilai temperatur secara keseluruhan memenuhi standar NFPA, dengan hanya lokasi yang dekat dengan sumber kebakaran yang sedikit melewati batasan standar NFPA 130 untuk nilai temperatur rata – rata 6 menit pertama kebakaran terjadi. Berdasarkan perubahan/peningkatan kapasitas *smoke exhaust*, terlihat juga sedikit penurunan temperatur rata – rata 6 menit pertama pada lokasi 2\_1, 2\_2, 2\_3, 2\_3, dan 2\_4. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kapasitas *smoke exhaust* sebesar 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron sebesar 4 m (skenario 5B) memberikan distribusi temperatur yang paling sesuai, di antara skenario kebakaran yang lainnya, terhadap standar NFPA 130.

Berdasarkan batasan tingkat obskurasi NFPA 130, kapasitas *smoke exhaust* 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron sebesar 4 m memberikan visibilitas yang paling besar, relatif terhadap waktu dan besarnya kebakaran yang terjadi. Dengan visibilitas minimum untuk zona peron pada ketinggian 1.8 m adalah di atas 10 m, kecuali lokasi 2\_5 yang memberikan minimum visibilitas kurang lebih sebesar 10 m, relevan terhadap konstanta proporsional yang berlaku terhadap benda konstruksi (tangga, pintu) atau benda yang memantulkan cahaya. Sedangkan untuk benda yang mengeluarkan cahaya, minimum visibilitasnya pada zona peron dengan elevasi 1.8 m, untuk kapasitas *smoke exhaust* 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron 4 m, adalah lebih besar dari 35 m. Namun, sekali lagi lokasi 2\_5 memberikan minimum visibilitas yang paling kecil dan di bawah nilai batasan standar NFPA 130 (30 m) yang adalah, kurang – lebih, 20 m.

Kemudian, mengenai pengaruh waktu aktivasi *smoke exhaust* terhadap distribusi temperatur, relevan terhadap simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa jika tidak terdapat perbedaan akumulasi asap dengan kondisi dimana laju produksi kalor sumber kebakaran sama dan api tidak menyebar, perbedaan waktu aktivasi *smoke exhaust* akan menghasilkan pola temperatur yang sama dan bergantung secara tunggal terhadap volume bahan bakar dan laju produksi kalor.

Kebakaran gasoline 5 liter *pool fire* dengan HRR 5 MW pada kapasitas *smoke exhaust* 7000 m<sup>3</sup>/jam dan ketinggian zona peron 4 m, tidak menimbulkan kondisi tidak aman untuk berjalannya evakuasi dengan baik.

## 5.2. Saran

Perlakuan khusus perlu untuk dilakukan pada lokasi 2\_5, atau 23.7 m dan seterusnya, dari sumber kebakaran. Hal ini dikarenakan pergerakan asap pada bagian ini akan terakumulasi lebih banyak dibandingkan lokasi lainnya.

Relevan terhadap perlakuan khusus yang perlu dilakukan pada lokasi 2\_5, simulasi dengan strategi khusus perlu dilakukan untuk menghindari dampak berbahaya pada lokasi ini.

Beberapa strategi lain juga perlu diterapkan pada stasiun metro bawah tanah secara keseluruhan untuk menghindari penyebaran asap pada zona *concourse*, dengan tetap mempertahankan performa stasiun terhadap visibilitas, densitas asap, dan distribusi temperatur yang sudah tercapai.

Kemudian, untuk mengantisipasi kebakaran dengan penyebaran asap yang cepat, penetapan kapasitas *smoke exhaust* yang hanya berdasarkan besar volume ruangan dapat disimpulkan tidak cukup untuk menyediakan kondisi aman, secara keseluruhan, pada saat kebakaran terjadi. Oleh karena itu, pendekatan terhadap luas area lantai kompartemen, dengan tetap mempertimbangkan ketinggian zona kompartemen berdasarkan volume ruangan, untuk menentukan kapasitas *smoke exhaust* mungkin akan lebih sesuai.

Berdasarkan kebakaran gasoline 5 liter *pool fire*, yang dimana kondisi kebakaran tidak menimbulkan kondisi yang berbahaya bagi berjalannya evakuasi, maka pendekatan terhadap besarnya sumber kebakaran juga perlu dilakukan untuk menetapkan kapasitas *smoke exhaust* dan volume peron.

Verifikasi eksperimen perlu untuk dilakukan sebagai kegiatan penelitian selanjutnya, guna menjadi evaluasi aktual terhadap simulasi yang sudah dilakukan.

## Daftar Pustaka

- [1] Rapporteur Alfred Haack. Designs Fire Scenario – Technical Report – Part 1. Thematic Network Fire in Tunnel. p. 32.
- [2] L. H. Cheng, T. H. Cheng, C. W. Liu. “Simulation of ventilation and fire in the underground facilities” Fire Safety Journal 36 (2001) p. 597 – 617.
- [3] YANG Jun – tao, YANG Yun, WANG He – lan, SHI Liang. “Effect of the Open Ways of Screen Doors on Fire Smoke in a Subway Platform” Proceeding of The 5<sup>th</sup> Conference on Performance – based Fire and Protection Engineering. Procedia Engineering 11 (2011) p. 416 – 423.
- [4] Jae Seong Roh, Hong Sun Ryou, Won Hee Park, Yong Jun Jang. “CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire” Tunneling and Underground Space Technology 24 (2009) p. 447 – 453.
- [5] YANG Gao – shang, AN Yong – lin, PENG Li – min, ZHANG Jin – hua. “Simulation of smoke flow and longitudinal ventilation in tunnel fire” Trans. Nonferrous Met. Soc. China 16 (2006) p. 741 – 746.
- [6] McGrattan Kevin, Randall McDermott, Simo Hostika, Jason Floyd. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide[M]. NIST Special Publication 1019 – 5, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, October 2010.
- [7] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, Howard Baum, Ronald Rehm, William Mell, Randall McDermott. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018 – 5, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, October 2010.
- [8] SFPE. (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [9] Boon Hui Chiam. “Numerical Simulation of a Metro Train Fire” p. 117. Department of Civil Engineering – University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 2005.
- [10] Quintiere James G. *Compartment Fire Modeling – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.



- [11] Walton William D., Thomas Philip H., *Estimating Temperature in Compartment Fire – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [12] D. T. Gottuk, D. A. White. *Liquid Fuel Fires – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [13] Babrauskas Vytenis. *Heat Release Rates – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [14] George W. Mulholland. *Smoke Production and Properties - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [15] Brian Y. Lattimer. *Heat Fluxes from Fires to Surfaces - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [16] Gunnar Heskestad. *Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA.
- [17] Maohua Zhong, Congling Shi, Xuwei Tu, Tairan Fu, Li Hei. “Study of The Human Evacuation Simulation of Metro Fire Safety Analysis in China” *Journal of Loss Prevention in The Process Industries* 21 (2008) p. 287 – 298.
- [18] NFPA 130. *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems: 2000 edition*. National Fire Protection Association. 2000.
- [19] *Standard for Fire Safety in Rapid Transit Systems: 2009 Edition*.
- [20] Karl Fridolf. *Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical research*. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety Lund University. Sweden. 2010.
- [21] <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/InfrastructuralFires/default.htm>. 4 Juli 2012.

## LAMPIRAN

Lampiran 1. Nilai  $D_m$  dan  $D_s$  berdasarkan referensi [14]

Type (Sample #)	Maximum $D_s$	$D_m$ (m <sup>2</sup> /g) <sup>a</sup>	Combustion Conditions	Sample <sup>b</sup> Thickness (cm)
Hardboard	$6.7 \times 10^1$		Flaming	0.6
Hardboard	$6.0 \times 10^2$		Pyrolysis	0.6
Plywood	$1.1 \times 10^2$		Flaming	0.6
Plywood	$2.9 \times 10^2$		Pyrolysis	0.6
Polystyrene	$>6.6 \times 10^2$		Flaming	0.6
Polystyrene	$3.7 \times 10^2$		Pyrolysis	0.6
Polyvinylchloride	$>6.6 \times 10^2$		Flaming	0.6
Polyvinylchloride	$3.0 \times 10^2$		Pyrolysis	0.6
Polyurethane foam	$2.0 \times 10^1$		Flaming	1.3
Polyurethane foam	$1.6 \times 10^1$		Pyrolysis	1.3
Nylon carpet	$2.7 \times 10^2$		Flaming	0.8
Nylon carpet	$3.2 \times 10^2$		Pyrolysis	0.8
Acrylic	$1.1 \times 10^2$		Flaming	0.6
Acrylic	$1.6 \times 10^2$		Pyrolysis	0.6
Plywood	$5.3 \times 10^2$	0.29	Pyrolysis	0.6
Polymethylmethacrylate	$7.2 \times 10^2$	0.15	Pyrolysis	0.6
Polyvinylchloride	$1.8 \times 10^2$	0.12	Pyrolysis	0.6
Polyvinylchloride (with plasticizer)	$3.5 \times 10^2$	0.64	Pyrolysis	0.6
Neoprene	$8.8 \times 10^2$	0.55	Pyrolysis	0.6
Douglas fir	$6.2 \times 10^2$	0.28	Pyrolysis	0.6
Polypropylene	$4.0 \times 10^2$	0.53	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Polyethylene	$2.9 \times 10^2$	0.29	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Paraffin wax	$2.3 \times 10^2$	0.23	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Polystyrene		1.4	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Styrene		0.96	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Polyvinylchloride		0.34	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Polyoxymethylene		-0	Flaming <sup>c</sup>	0.4
Polyurethane (7A)	$2.1 \times 10^2$		Flaming	1.3
Polyurethane (7A)	$1.5 \times 10^2$		Flaming <sup>d</sup>	1.3
Wool (8A)	$>5.5 \times 10^2$		Flaming	0.9
Wool (8A)	$2.2 \times 10^2$		Flaming <sup>d</sup>	0.9
Acrylic (9B)	$5.8 \times 10^1$		Flaming	0.14
Acrylic (9B)	$1.2 \times 10^2$		Flaming <sup>d</sup>	0.14
Polyurethane (MO1)		0.33	Flaming <sup>e</sup>	
Polyurethane (MO1)		0.22	Flaming <sup>e</sup>	
Cotton (MO3)		0.17	Flaming <sup>e</sup>	
Cotton (MO3)		0.12	Flaming <sup>e</sup>	
Latex (MO4)		0.65	Flaming <sup>e</sup>	
Latex (MO4)		0.44	Flaming <sup>e</sup>	
Neoprene (MO8)		0.40	Flaming <sup>e</sup>	
Neoprene (MO8)		0.20	Flaming <sup>e</sup>	
Polystyrene (7)		0.79	Flaming <sup>f</sup>	
Polystyrene (7)		1.0	Flaming <sup>f</sup>	
Polystyrene foam (16)		0.79	Flaming <sup>f</sup>	
Polystyrene foam (16)		0.82	Flaming <sup>f</sup>	
ABS (18)		0.52	Flaming <sup>f</sup>	
ABS (18)		0.54	Flaming <sup>f</sup>	

<sup>a</sup>The value of  $D_m$  is computed by Quintiere,<sup>20</sup> based on data in Babrauskas.<sup>18</sup>

<sup>b</sup>Sample area is 0.005 m<sup>2</sup> in vertical configuration, unless stated otherwise.

<sup>c</sup>Sample is in horizontal configuration (0.005 m<sup>2</sup>).

<sup>d</sup>0.09 m<sup>2</sup> sample size.

<sup>e</sup>The sample is a mattress.

<sup>f</sup>The sample is a plastic utility table.

## Lampiran 2. Pengaturan awal simulasi pada tipikal geometri kereta bawah tanah dengan ketinggian atap peron 3 m dan laju ventilasi sebesar 3000 m<sup>3</sup>/jam.

Model.fds

Generated by PyroSim - Version 2010.2.1407

Apr 29, 2012 2:49:21 PM

&HEAD CHID='Model/'

&TIME T\_END=1.8000000E003/

&DUMP RENDER\_FILE='Model.ge1', DT\_RESTART=300.00/

&MESH ID='MESH', IJK=151,118,78, XB=0.00,151.00,-1.00,21.30,0.00,15.45/

&REAC ID='GASOLINE',

C=8.00,

H=18.00,

O=0.00,

N=0.00,

HEAT\_OF\_COMBUSTION=4.4100000E004,

SOOT\_YIELD=0.0300/

&DEVC ID='1\_1\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=45.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_1\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=45.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_1\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=45.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_1\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=45.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_1\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=45.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_1\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=45.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_1\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=45.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_1\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=45.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_2\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_2\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_2\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_2\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_2\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_2\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_2\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_2\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_3\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=65.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_3\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=65.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_3\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=65.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_3\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=65.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_3\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=65.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_3\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=65.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_3\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=65.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_3\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=65.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_4\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_4\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_4\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_4\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_4\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_4\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_4\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,10.75/

&DEVC ID='1\_4\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,11.35/

&DEVC ID='1\_5\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,9.55/

&DEVC ID='1\_5\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,10.15/

&DEVC ID='1\_5\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,10.75/  
 &DEVC ID='1\_5\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,11.35/  
 &DEVC ID='1\_5\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,9.55/  
 &DEVC ID='1\_5\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,10.15/  
 &DEVC ID='1\_5\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,10.75/  
 &DEVC ID='1\_5\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,11.35/  
 &DEVC ID='1\_6\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=95.00,10.15,9.55/  
 &DEVC ID='1\_6\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=95.00,10.15,10.15/  
 &DEVC ID='1\_6\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=95.00,10.15,10.75/  
 &DEVC ID='1\_6\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=95.00,10.15,11.35/  
 &DEVC ID='1\_6\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=95.00,10.15,9.55/  
 &DEVC ID='1\_6\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=95.00,10.15,10.15/  
 &DEVC ID='1\_6\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=95.00,10.15,10.75/  
 &DEVC ID='1\_6\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=95.00,10.15,11.35/  
 &DEVC ID='1\_BEAM', QUANTITY='PATH OBSCURATION', XB=0.00,151.00,10.15,10.15,10.75,10.75/  
 &DEVC ID='2\_1\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=35.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_1\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=35.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_1\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=35.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_1\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=35.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_1\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=35.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_1\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=35.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_1\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=35.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_1\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=35.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_2\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_2\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_2\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_2\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=55.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_2\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_2\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_2\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_2\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_3\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_3\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_3\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_3\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=75.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_3\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_3\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_3\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_3\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=75.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_4\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_4\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_4\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_4\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=85.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_4\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_4\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_4\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_4\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=85.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_5\_GAS\_0.6', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=105.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_5\_GAS\_1.2', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=105.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_5\_GAS\_1.8', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=105.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_5\_GAS\_2.4', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=105.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_5\_THCP\_0.6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=105.00,10.15,3.65/  
 &DEVC ID='2\_5\_THCP\_1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=105.00,10.15,4.25/  
 &DEVC ID='2\_5\_THCP\_1.8', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=105.00,10.15,4.85/  
 &DEVC ID='2\_5\_THCP\_2.4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=105.00,10.15,5.45/  
 &DEVC ID='2\_BEAM', QUANTITY='PATH OBSCURATION', XB=0.00,151.00,10.15,10.15,4.85,4.85/  
 &DEVC ID='FLOW01', QUANTITY='MASS FLOW', XB=43.55,49.75,7.90,12.40,8.95,8.95/  
 &DEVC ID='FLOW02', QUANTITY='MASS FLOW', XB=61.25,68.75,7.90,12.40,8.95,8.95/

&DEVC ID='FLOW03', QUANTITY='MASS FLOW', XB=91.25,96.45,7.90,12.40,8.95,8.95/  
&DEVC ID='TIMER', QUANTITY='TIME', XYZ=0.00,-1.00,0.00, SETPOINT=60.00/  
&DEVC ID='THCP', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=55.00,10.15,3.65/

&MATL ID='BRICK',

SPECIFIC\_HEAT=0.84,  
CONDUCTIVITY=0.69,  
DENSITY=1.600000E003/

&MATL ID='Laminated Safety Glass',

SPECIFIC\_HEAT=0.84,  
CONDUCTIVITY=0.0490,  
DENSITY=1.380000E003/

&MATL ID='GASOLINE',

FYI='SFPE HANDBOOK',  
SPECIFIC\_HEAT=2.22,  
CONDUCTIVITY=0.1240,  
DENSITY=680.00,  
ABSORPTION\_COEFFICIENT=40.00,  
EMISSIVITY=1.00,  
HEAT\_OF\_REACTION=338.90,  
NU\_FUEL=0.97,  
BOILING\_TEMPERATURE=155.00/

&MATL ID='PAPER',

SPECIFIC\_HEAT=0.4000,  
CONDUCTIVITY=0.2100,  
DENSITY=689.00,  
EMISSIVITY=0.81/

&SURF ID='BRICK',

COLOR='BRICK',  
MATL\_ID(1,1)='BRICK',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.00,  
THICKNESS(1)=1.000000E-003/

&SURF ID='Window',

RGB=146,202,166,  
BURN\_AWAY=.TRUE.,  
MATL\_ID(1,1)='Laminated Safety Glass',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.00,  
THICKNESS(1)=0.0230/

&SURF ID='Exhaust',

COLOR='GREEN',  
VOLUME\_FLUX=0.83/

&SURF ID='GASOLINE',

COLOR='BLUE',  
MATL\_ID(1,1)='GASOLINE',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.00,  
THICKNESS(1)=1.000000E-003/

&SURF ID='PAPER',

COLOR='HONEYDEW',  
BURN\_AWAY=.TRUE.,  
MATL\_ID(1,1)='PAPER',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.00,  
THICKNESS(1)=0.0100/

&SURF ID='BURNER',

COLOR='RASPBERRY',  
HRRPUA=1.250000E004,  
RAMP\_Q='BURNER\_RAMP\_Q'/

&RAMP ID='BURNER\_RAMP\_Q', T=0.00, F=1.00/

&RAMP ID='BURNER\_RAMP\_Q', T=180.00, F=1.00/  
&RAMP ID='BURNER\_RAMP\_Q', T=181.00, F=0.00/

&OBST XB=0.00,151.00,0.00,20.30,0.00,1.50, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Bottom Brick  
&OBST XB=0.00,151.00,0.00,20.30,14.45,15.45, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Top Brick  
&OBST XB=0.00,151.00,20.30,21.30,0.00,15.45, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Left Brick  
&OBST XB=0.00,151.00,-1.00,0.00,0.00,15.45, COLOR='INVISIBLE', SURF\_ID='BRICK'/ Right Brick  
&OBST XB=0.00,1.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=10.00,11.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=20.00,21.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=30.00,31.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=40.00,41.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=50.00,51.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=60.00,61.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=70.00,71.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=80.00,81.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=90.00,91.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=100.00,101.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=110.00,111.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=120.00,121.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=130.00,131.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=140.00,141.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=150.00,151.00,7.15,8.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=0.00,1.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=10.00,11.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=20.00,21.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=30.00,31.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=40.00,41.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=50.00,51.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=60.00,61.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=70.00,71.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=80.00,81.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=90.00,91.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=100.00,101.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=110.00,111.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=120.00,121.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=130.00,131.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=140.00,141.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=150.00,151.00,12.15,13.15,1.50,15.45, RGB=204,204,0, SURF\_ID='BRICK'/ Beam  
&OBST XB=10.50,140.50,3.65,16.65,2.95,3.05, COLOR='GRAY 80', SURF\_ID='BRICK'/ Platform  
&OBST XB=10.50,140.50,3.65,3.85,3.05,6.05, RGB=204,204,204, TRANSPARENCY=0.4000,  
SURF\_ID='Window'/ Right PSD  
&OBST XB=10.50,140.50,16.45,16.65,3.05,6.05, RGB=204,204,204, TRANSPARENCY=0.4000,  
SURF\_ID='Window'/ Left PSD  
&OBST XB=9.50,10.50,3.65,16.65,2.95,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Platform Wall  
&OBST XB=140.50,141.50,3.65,16.65,2.95,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Platform Wall  
&OBST XB=44.30,45.30,7.65,12.65,3.00,3.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=44.60,45.60,7.65,12.65,3.30,3.80, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=44.90,45.90,7.65,12.65,3.60,4.10, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=45.20,46.20,7.65,12.65,3.90,4.40, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=45.50,46.50,7.65,12.65,4.20,4.70, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=45.80,46.80,7.65,12.65,4.50,5.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=46.10,47.10,7.65,12.65,4.80,5.30, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=46.40,47.40,7.65,12.65,5.10,5.60, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=46.70,47.70,7.65,12.65,5.40,5.90, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=47.00,48.00,7.65,12.65,5.70,6.20, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=47.30,48.30,7.65,12.65,6.00,6.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=47.60,48.60,7.65,12.65,6.30,6.80, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway

&OBST XB=47.90,48.90,7.65,12.65,6.60,7.10, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=48.20,49.20,7.65,12.65,6.90,7.40, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=48.50,49.50,7.65,12.65,7.20,7.70, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=48.80,49.80,7.65,12.65,7.50,8.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=49.10,50.10,7.65,12.65,7.80,8.30, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=49.40,50.40,7.65,12.65,8.10,8.60, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=63.50,64.50,7.65,12.65,3.00,3.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=64.00,65.00,7.65,12.65,3.50,4.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=64.50,65.50,7.65,12.65,4.00,4.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=65.00,66.00,7.65,12.65,4.50,5.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=65.50,66.50,7.65,12.65,5.00,5.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=66.00,67.00,7.65,12.65,5.50,6.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=66.50,67.50,7.65,12.65,6.00,6.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=67.00,68.00,7.65,12.65,6.50,7.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=67.50,68.50,7.65,12.65,7.00,7.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=68.00,69.00,7.65,12.65,7.50,8.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=68.50,69.50,7.65,12.65,8.00,8.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=69.00,70.00,7.65,12.65,8.50,9.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=94.40,95.40,7.65,12.65,3.00,3.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=94.10,95.10,7.65,12.65,3.30,3.80, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=93.80,94.80,7.65,12.65,3.60,4.10, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=93.50,94.50,7.65,12.65,3.90,4.40, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=93.20,94.20,7.65,12.65,4.20,4.70, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=92.90,93.90,7.65,12.65,4.50,5.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=92.60,93.60,7.65,12.65,4.80,5.30, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=92.30,93.30,7.65,12.65,5.10,5.60, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=92.00,93.00,7.65,12.65,5.40,5.90, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=91.70,92.70,7.65,12.65,5.70,6.20, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=91.40,92.40,7.65,12.65,6.00,6.50, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=91.10,92.10,7.65,12.65,6.30,6.80, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=90.80,91.80,7.65,12.65,6.60,7.10, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=90.50,91.50,7.65,12.65,6.90,7.40, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=90.20,91.20,7.65,12.65,7.20,7.70, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=89.90,90.90,7.65,12.65,7.50,8.00, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=89.60,90.60,7.65,12.65,7.80,8.30, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=89.30,90.30,7.65,12.65,8.10,8.60, SURF\_ID='BRICK'/ Stairway  
&OBST XB=0.00,43.30,0.00,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=50.00,60.00,0.00,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=70.00,90.00,0.00,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=96.70,151.00,0.00,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=43.30,50.00,0.00,7.65,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=60.00,70.00,0.00,7.65,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=90.00,96.70,0.00,7.65,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=43.30,50.00,12.65,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=60.00,70.00,12.65,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=90.00,96.70,12.65,20.30,8.55,8.95, SURF\_ID='BRICK'/ B1 Floor  
&OBST XB=10.50,43.30,3.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=50.00,60.00,3.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=70.00,90.00,3.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=96.70,140.50,3.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=43.30,50.00,3.65,7.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=60.00,70.00,3.65,7.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=90.00,96.70,3.65,7.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=43.30,50.00,12.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=60.00,70.00,12.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=90.00,96.70,12.65,16.65,6.05,8.55, SURF\_ID='BRICK'/ Meachanical & Electrical Ducting  
&OBST XB=40.00,101.00,0.00,20.30,11.95,14.45, SURF\_ID='BRICK'/ Mechanical & Electrical Ducting B1LVL  
&OBST XB=43.30,50.00,7.46,7.65,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall

&OBST XB=60.00,70.00,7.46,7.65,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=90.00,96.70,7.46,7.65,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=43.30,50.00,12.65,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=60.00,70.00,12.65,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=90.00,96.70,12.65,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=42.30,43.30,7.46,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=50.00,51.00,7.46,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=59.00,60.00,7.46,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=70.00,71.00,7.46,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=90.00,91.00,7.46,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=96.70,97.70,7.46,12.84,5.05,6.05, COLOR='GRAY 60', SURF\_ID='BRICK'/ Dropwall  
 &OBST XB=37.70,43.30,7.65,12.65,8.95,14.45, COLOR='WHITE', SURF\_ID='BRICK'/ Station Office  
 &OBST XB=96.70,102.30,7.65,12.65,8.95,14.45, COLOR='WHITE', SURF\_ID='BRICK'/ Station Office  
 &OBST XB=40.00,41.00,5.95,6.15,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,41.00,4.75,4.95,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,41.00,15.35,15.55,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,41.00,14.15,14.35,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,41.00,17.85,18.05,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,41.00,16.65,16.85,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,41.00,19.05,19.25,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,5.95,6.15,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,4.75,4.95,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,15.35,15.55,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,14.15,14.35,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,17.85,18.05,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,16.65,16.85,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=100.00,101.00,19.05,19.25,8.95,9.95, RGB=102,102,255, SURF\_ID='BRICK'/ Ticket Barrier  
 &OBST XB=40.00,101.00,3.55,3.75,8.95,14.45, RGB=204,204,204, TRANSPARENCY=0.4000,  
 SURF\_ID='Window'/ Paid Concourse Wall  
 &OBST XB=15.00,16.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=25.00,26.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=35.00,36.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=55.00,56.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=75.00,76.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=85.00,86.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=105.00,106.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=115.00,116.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=125.00,126.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=135.00,136.00,9.65,10.65,5.85,6.05, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=55.00,56.00,9.65,10.65,11.75,11.95, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=65.00,66.00,9.65,10.65,11.75,11.95, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=75.00,76.00,9.65,10.65,11.75,11.95, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=85.00,86.00,9.65,10.65,11.75,11.95, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent



&OBST XB=95.00,96.00,9.65,10.65,11.75,11.95, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=45.00,46.00,9.65,10.65,11.75,11.95, SURF\_IDS='INERT','INERT','Exhaust', DEVC\_ID='TIMER'/  
 Exhaust Vent  
 &OBST XB=80.80,81.80,9.95,10.35,3.10,3.20, SURF\_ID='GASOLINE'/ Gasoline  
 &OBST XB=80.80,81.80,9.95,10.35,3.05,3.10, SURF\_ID='PAPER'/ Paper  
 &OBST XB=0.00,151.00,0.80,1.00,1.50,1.70, COLOR='SILVER', SURF\_ID='BRICK'/ Railway  
 &OBST XB=0.00,151.00,2.50,2.70,1.50,1.70, COLOR='SILVER', SURF\_ID='BRICK'/ Railway  
 &OBST XB=0.00,151.00,19.30,19.50,1.50,1.70, COLOR='SILVER', SURF\_ID='BRICK'/ Railway  
 &OBST XB=0.00,151.00,17.60,17.80,1.50,1.70, COLOR='SILVER', SURF\_ID='BRICK'/ Railway  
  
 &HOLE XB=2.500000E001,3.200000E001,-1.000000E000,0.000000E000,8.950000E000,1.195000E001/ 1st  
 Right Door  
 &HOLE XB=2.500000E001,3.000000E001,2.030000E001,2.130000E001,8.950000E000,1.195000E001/ 1st  
 Left Door  
 &HOLE XB=1.075000E002,1.125000E002,-1.000000E000,0.000000E000,8.950000E000,1.195000E001/  
 2nd Right Door  
 &HOLE XB=1.075000E002,1.125000E002,2.030000E001,2.130000E001,8.950000E000,1.195000E001/ 2nd  
 Left Door  
  
 &VENT SURF\_ID='OPEN', XB=0.00,0.00,-1.00,21.30,0.00,15.45, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min X for MESH  
 &VENT SURF\_ID='OPEN', XB=151.00,151.00,-1.00,21.30,0.00,15.45, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max X for  
 MESH  
 &VENT SURF\_ID='BURNER', XB=80.80,81.80,9.95,10.35,3.20,3.20/ Burner  
  
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=10.15/  
 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=10.15/  
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBY=10.15/  
  
 &TAIL /