



Manajemen Asap Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah

Studi Eksperimen dan Simulasi Numerik Manajemen Asap
Kebakaran Berbasis Ventilasi *Hybrid* pada Model Tipikal Stasiun
Metro Bawah Tanah Skala 1:25

Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc., Ph.D.
Ali A. Sungkar, S.T., M.T.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Indonesia

CV. Pena Indis

www.indhisbook.com

2014

Manajemen Asap Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah

Yulianto S. Nugroho
Ali A. Sungkar



**Manajemen Asap
Kebakaran
Stasiun Metro
Bawah Tanah**

Penulis:

Yulianto S. Nugroho
Ali A. Sungkar

QRCBN:

62-248-6600-232

Ukuran Buku:

17,6 x 25 cm

Tebal Buku:

191 halaman

Editor:

Nitha Ayesha

Desain Sampul:

Fandy Said

Tata Letak:

Fandy Said

Cetak Pertama:

Oktober 2014

Diterbitkan Oleh:



CV. Pena Indis

Jalan Bitoa Lama No. 105
Kel. Antang, Kec. Manggala
Makassar - Sulawesi Selatan. 90234

No Hp: 082113883062

email: pena_indhis@yahoo.co.id

Blog: www.penaindhis.com

Toko Online: www.indhisbook.com

Sanksi Pelanggaran

Undang-Undang Hak Cipta 2002

1. Barang siapa dengan sengaja tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/ atau denda paling banyak Rp.100.000.000,00 (seratus juta rupiah)
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/ atau denda paling banyak Rp.50.000.000,00 (lima puluh juta rupiah)

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat limpahan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan buku ini dengan baik dan lancar. Buku ini merupakan hasil studi program pascasarjana jenjang magister di Universitas Indonesia melalui dana hibah Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM) Universitas Indonesia melalui program RUUI Utama 2012.

Buku ini menjelaskan strategi manajemen asap kebakaran stasiun metro bawah tanah untuk kondisi kebakaran skala besar. Hal ini dilakukan mengingat betapa pentingnya aspek keselamatan pengguna dalam transportasi massal bawah tanah. Barang bawaan penumpang, jumlah material mampu bakar dalam bangunan, kondisi sistem ventilasi, ketinggian langit-langit (ceiling head), merupakan beberapa tinjauan penting untuk mengantisipasi dan upaya penanganan kebakaran skala besar. Untuk itu, diharapkan para perencana dan perancang sistem transportasi massal ruang bawah tanah, baik kalangan praktisi maupun tenaga ahli dapat bekerja sama, dalam memfasilitasi sistem keselamatan, khususnya keselamatan kebakaran ketika evakuasi dan pemadaman secara tepat dan sesuai kebutuhan.

Tak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu sehingga karya ini dapat diwujudkan. Semoga Allah swt. berkenan membalas segala kebaikannya. Penulis juga mohon maaf apabila terjadi kekurangan/kesalahan dalam penulisan dan dalam penyampaiannya. Untuk itu, kritik saran positif sangat dibutuhkan untuk pengembangan yang akan datang.

Akhir kata, penulis ingin memberikan suatu kutipan nasihat dari salah seorang Dosen Departemen Teknik Mesin FTUI atas baktinya dalam berinovasi dan mewujudkan teknologi massal tanpa pamrih untuk menolong sesama yang membutuhkan:

“Ada kalanya kita memerlukan biaya besar untuk mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi, namun dengan cara yang cerdas kita tetap bisa

mengembangkannya bahkan bisa menunjukkan kemanfaatan yang lebih hanya dengan segala keterbatasan. Allah memiliki semuanya, Allah pemilik ilmu yang memercikkan sedikit kepada kita untuk kita amalkan. Allah pula yang membuka pintu hati, pintu pikiran, dan kunci pemahaman sehingga kita bisa mengerti dan selanjutnya meneruskan estafet pengembangannya agar bisa bermanfaat bagi masyarakat banyak di Indonesia khususnya dan di dunia pada umumnya”.

Semoga buku ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan memacu semangat generasi mudah untuk terus berkarya.

Jakarta, Oktober 2014

Ali A. Sungkar

Daftar Isi

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xxiv
Daftar Lampiran	xxvi
Nomenklatur	xxvii
BAB I. Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	9
1.3 Tujuan Penelitian	10
1.4 Manfaat Penelitian	11
1.5 Pembatasan Masalah	12
1.6 Hipotesis	15
1.7 Metodologi Penelitian	16
1.8 Sistematika Penulisan	18
1.8.1 Pendahuluan	18
1.8.2 Dasar Teori	19
1.8.3 Metodologi Penelitian	20
1.8.4 Hasil dan Pembahasan	21
1.8.5 Kesimpulan dan Saran	22
BAB II. Dasar Teori	23
2.1 Dasar Model Pembakaran 2 Zona	23
2.2 Studi Keselamatan Evakuasi Kebakaran Transportasi Bawah Tanah	32
2.3 <i>State of The Art</i> Penelitian	39
2.4 Penerapan Sistem Ventilasi <i>Hybrid</i> untuk Transportasi Bawah Tanah	45
2.4.1 Sistem Ventilasi Mekanik	47
2.4.2 Sistem Ventilasi Alami	50
2.5 Produksi dan Pengukuran Opasitas Asap pada Zona Kebakaran	55
2.5.1 Produksi Asap Kebakaran	55
2.5.2 Pengukuran Opasitas Asap	60
2.6 Laju Produksi Kalor (HRR) dan Kolam Api (Pool Fire)	63
2.7 Analisis Dimensional dan Kekerupaan	68

2.8	Fluks Kalor dan Perpindahan Kalor Konveksi dalam Kebakaran Kompartemen	73
BAB III.	Metodologi Penelitian	82
3.1	Metodologi Simulasi Numerik Manajemen Asap Kebakaran pada Model Tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah	83
3.1.1	Geometri Model Stasiun dan Analisis Dimensional	85
3.1.2	Daerah Komputasi dan Diskretisasi	89
3.1.3	Sistem Pembuangan Asap	90
3.1.4	Material Pemodelan	94
3.1.5	Sumber Kebakaran	94
3.1.6	Lokasi Pengukuran dan Instrumentasi	101
3.1.7	Skenario Kebakaran	103
3.1.8	Variasi Pengukuran	104
3.2	Metodologi Eksperimen Skala Laboratorium 1:25	107
3.2.1	Perancangan Eksperimen Manajemen Asap Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah	108
3.2.2	Perancangan Eksperimen Perpindahan Kalor Konveksi Kebakaran	114
3.2.3	Mekanisme Kalibrasi	116
3.2.3.1	Kalibrasi Termokopel	117
3.2.3.2	Kalibrasi Sensor Beda Tekanan	120
3.2.3.3	Kalibrasi Sensor Densitas Optik	120
3.2.4	Konfigurasi Instrumen dan Pengukuran Eksperimen	125
3.3	Prosedur Eksperimen	127
3.3.1	Prosedur Praeksperimen	128
3.3.2	Prosedur Eksperimen	129
3.3.3	Prosedur Pascaeksperimen	132
BAB IV.	Pengolahan Data Dan Analisis	134
4.1	Performa Konfigurasi Ventilasi dalam Manajemen Asap Kebakaran	136
4.1.1	Analisis Efektivitas Pembuangan Asap Kebakaran	137
4.1.2	Analisis Laju Alir Pembuangan Asap pada Ventilasi Alami	139
4.1.3	Analisis Fenomena <i>Plug-holing</i> pada Bukan Atrium dan Ventilasi Mekanik	143

4.1.3.1 Analisis Fenomena <i>Plug-holing</i> pada Bukaan Atrium	145
4.1.3.2 Analisis Fenomena <i>Plug-holing</i> pada Ventilasi Mekanik	157
4.2 Analisis Parameter Aspek Keselamatan Kebakaran	169
4.2.1 Analisis Ketinggian Lapisan Asap	169
4.2.2 Analisis Visibilitas dan Obskurasi Zona <i>Platform</i>	174
4.2.3 Analisis Distribusi Fraksi Massa Jelaga	181
4.2.4 Analisis Laju Peningkatan Temperatur dalam Zona <i>Platform</i>	183
4.3 Analisis Hasil Eksperimen Kondisi Transien Perpindahan Kalor Konveksi Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah	189
4.3.1 Analisis Fluks Kalor Kebakaran	189
4.3.2 Analisis Nilai dan Korelasi Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi	193
BAB V. Kesimpulan Dan Saran	203
5.1 Kesimpulan	203
5.2 Saran	206
Daftar Pustaka	208
Lampiran	219
Profil Penulis	248

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Pertimbangan parameter fisik dan perilaku evakuasi dalam aspek keselamatan kebakaran	4
Gambar 1.2 Metodologi Umum Penelitian	17
Gambar 2.1 Model Kebakaran Zona [19]	25
Gambar 2.2 Model Kebakaran Zona menurut Walton dan Thomas [20]	27
Gambar 2.3 Karakteristik Model Kebakaran Zona [18]	29
Gambar 2.4 Persebaran sistem transportasi bawah tanah di kota-kota besar seluruh dunia [21]	34
Gambar 2.5 Grafik waktu evakuasi aman yang tersedia (ASET) ketika kebakaran terjadi [22]	36
Gambar 2.6 Diagram studi keselamatan kebakaran dalam stasiun bawah tanah	39
Gambar 2.7 Fenomena <i>plug-holing</i> dalam ventilasi alami [3]	51
Gambar 2.8 Fenomena <i>plug-holing</i> pada ventilasi paksa [3]	54
Gambar 2.9 Skematik upaya pencegahan efek <i>plug-holing</i> [44]	55
Gambar 2.10 Lapisan asap dan prediksi lapisan asap [45]	57
Gambar 2.11 Fenomena Pergerakan Asap [46]	59
Gambar 2.12 <i>Beam of light</i> dengan amplifier untuk mengukur Optical Density dalam penelitian	61
Gambar 2.13. Fluks kalor maksimum pada dinding berdasarkan Back et.al. [56]	74
Gambar 2.14 Fluks kalor dalam arah vertikal pada garis tengah api [56]	75

Gambar 2.15. Distribusi fluks kalor horizontal dengan jarak dari titik pusat wadah pembakaran propana terhadap dinding berdasarkan Back et al. [56]	77
Gambar 2.16 Aliran perpindahan kalor dalam kebakaran kompartemen [62]	78
Gambar 2.17 Pengukuran luks kalor yang diterima <i>ceiling</i> terhadap sensor pengukur selama eksperimen kebakaran kompartemen dengan bahan bakar tumpukan kayu [60]	80
Gambar 2.18. Koefisien perpindahan kalor yang diterima <i>ceiling</i> tanpa dimensi, C sebagai fungsi air r/H . Nilai f merupakan asumsi faktor friksi dari studi teoretis Alpert [58]	81
Gambar 3.1 Desain awal Stasiun Metro Bawah Tanah skala penuh	86
Gambar 3.2 Pemodelan simulasi numerik skala laboratorium 1:25 Stasiun Metro Bawah Tanah	88
Gambar 3.3. Konfigurasi sistem ventilasi pengendalian asap kebakaran dalam eksperimen stasiun bawah tanah	91
Gambar 3.4 Lokasi difuser ventilasi pembuangan asap ventilasi mekanik dalam model simulasi	92
Gambar 3.5 Penyebab sumber kebakaran dalam Stasiun Metro Bawah Tanah yang bersumber dari penumpang [65]	95
Gambar 3.6 Prediksi nilai laju produksi kalor untuk setiap beban kebakaran [65]	96
Gambar 3.7 Peletakan sumber kebakaran pada zona <i>platform</i> pada simulasi	97
Gambar 3.8 Algoritma perhitungan diameter wadah dan ketinggian	

bahan bakar [50]	100
Gambar 3.9. Lokasi pengukuran dan peletakan sumber kebakaran model stasiun	101
Gambar 3.10 Pengaturan rancangan parameter operasi untuk eksperimen manajemen asap kebakaran berbasis konfigurasi ventilasi	106
Gambar 3.11 Pemodelan tipikal eksperimen Stasiun Metro Bawah Tanah skala laboratorium 1:25	109
Gambar 3.12 Eksperimen pengaruh penyebaran asap kebakaran dalam zona <i>platform</i>	110
Gambar 3.13 Teknik pengukuran eksperimen fluks kalor dan temperatur pada model tipikal stasiun bawah tanah	115
Gambar 3.14. Lima jenis kaca dengan nilai densitas optik yang berbeda-beda	122
Gambar 3.15. Hasil persamaan kalibrasi sensorn obskurasi fotodioda untuk pengukuran densitas optik	125
Gambar 3.16 Skema perancangan eksperimen	127
Gambar 3.17 Gambar 3.17 Skematik proses pengambilan data eksperimen	130
Gambar 3.18 Proses eksperimen ini setidaknya membutuhkan tiga orang dengan tugasnya masing-masing	131
Gambar 4.1 Perbedaan temperatur sepanjang bukaan atrium dalam variasi perimeter bukaan atrium, S/H	137
Gambar 4.2 Laju alir massa yang dikeluarkan melalui bukaan atrium ventilasi alami dengan variasi S/H	138

Gambar 4.3 Laju aliran volumetrik aliran udara masuk pada bukaan zona <i>concourse</i> untuk variasi S/H dengan visualisasi vektor aliran udara	141
Gambar 4.4 Laju pelepasan asap kebakaran rata-rata terhadap variasi S/H	142
Gambar 4.5 Laju aliran massa keluar melalui bukaan atrium pada berbagai konfigurasi ventilasi	143
Gambar 4.6 Pengaruh distribusi temperatur sepanjang <i>platform</i> terhadap laju aliran volumetrik pembuangan asap kritis pada variasi S/H	146
Gambar 4.7 Visualisasi fraksi massa jelaga yang terbentuk untuk fenomena <i>plugholing</i> pada bukaan atrium dengan variasi konfigurasi ventilasi ketika kebakaran terjadi pada $x/L = 0.11$ dan $x/L = 0.65$	149
Gambar 4.8 Pengaruh lokasi sumber kebakaran terhadap laju alir volumetrik kritis untuk kondisi ventilasi alami dan hybrid menurut Viot et.al (2001) [44]	150
Gambar 4.9 Perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek <i>plug-holing</i> dalam model eksperimen menurut analisis laju volumetrik bukaan ventilasi alami	151
Gambar 4.10 Perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek <i>plug-holing</i> dalam model eksperimen menurut analisis ketinggian lapisan asap untuk setiap variasi bukaan atrium, S/H	152
Gambar 4.11 Pengaruh lokasi kebakaran terhadap rasio ketinggian lapisan asap dengan ukuran perimeter ventilasi alami, h_c/S untuk kondisi ventilasi alami dan hybrid menurut Viot et.al (2001) [44]	155

Gambar 4.12 Perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek <i>plug-holing</i> dalam model eksperimen menurut analisis ketinggian lapisan asap untuk setiap lokasi kebakaran	156
Gambar 4.13 Distribusi temperatur untuk melihat kemungkinan terjadinya fenomena <i>plug-holing</i> pada <i>inlet</i> ventilasi mekanik zona <i>platform</i> dengan $V^* = 0.432$	160
Gambar 4.14 Distribusi temperatur untuk melihat kemungkinan terjadinya fenomena <i>plugholing</i> pada <i>inlet</i> ventilasi mekanik zona <i>concourse</i> dengan $V^* = 0.432$	160
Gambar 4.15. Prediksi lokasi <i>plug-holing</i> pada <i>inlet</i> ventilasi mekanik menggunakan visualisasi distribusi temperatur dengan variasi laju volumetrik ventilasi	161
Gambar 4.16 Prediksi fenomena <i>plug-holing</i> pada <i>inlet</i> ventilasi mekanik menurut persamaan (4.1) dengan kriteria Former [74] untuk ventilasi <i>hybrid</i>	163
Gambar 4.17 Perbandingan prediksi fenomena <i>plug-holing</i> pada <i>inlet</i> ventilasi mekanik zona <i>platform</i> menurut persamaan (4.1) dengan kriteria Former [74] untuk ventilasi mekanik dan <i>hybrid</i>	164
Gambar 4.18 Pengaruh peningkatan temperatur lapisan asap terhadap bilangan Froude pada <i>inlet</i> ventilasi mekanik zona <i>concourse</i> menurut kriteria Former [74]	167
Gambar 4.19 Pengaruh laju produksi kalor terhadap waktu aktivasi ventilasi mekanik	168
Gambar 4.20 Ketinggian lapisan asap sepanjang zona <i>platform</i> untuk	

fase kebakaran dan setelah padam pada $x/L = 0.65$ dengan variasi konfigurasi ventilasi	171
Gambar 4.21. Pengaruh lokasi kebakaran terhadap laju penurunan lapisan asap pada konfigurasi ventilasi	172
Gambar 4.22. Pengaruh waktu terhadap ketinggian lapisan asap dengan variasi konfigurasi ventilasi	173
Gambar 4.23 Pengaruh waktu terhadap visibilitas yang terjadi pada zona <i>platform</i> dengan variasi konfigurasi ventilasi untuk $x_a/L = 0.11, 0.56$ dan 0.93 dengan lokasi kebakaran $x/L = 0.65$	175
Gambar 4.24 Pengaruh lokasi sumber kebakaran terhadap laju visibilitas untuk konfigurasi ventilasi alami dan <i>hybrid</i>	177
Gambar 4.25 Pengaruh waktu terhadap persentase obskurasi asap pada variasi konfigurasi ventilasi	178
Gambar 4.26 Pengaruh lokasi titik ukur terhadap persentase obskurasi ketika fase kebakaran dan setelah padam	179
Gambar 4.27 Perbandingan hasil eksperimen dan simulasi numerik terkait pengaruh waktu terhadap persentase obskurasi untuk konfigurasi ventilasi mekanik dan <i>hybrid</i>	180
Gambar 4.28 Perbandingan visualisasi fraksi massa jelaga untuk berbagai jenis konfigurasi ventilasi pada saat 3 menit kebakaran	181
Gambar 4.29 Perbandingan visualisasi fraksi massa jelaga untuk berbagai jenis konfigurasi ventilasi pada saat 10 menit setelah padam	183
Gambar 4.30 Pengaruh lokasi titik ukur terhadap temperatur asap di bawah plafon/ <i>ceiling</i> dengan variasi konfigurasi ventilasi	184

Gambar 4.31 Pengaruh waktu terhadap temperatur asap zona <i>platform</i> dengan variasi ventilasi	185
Gambar 4.32 Pengaruh posisi titik ukur terhadap dinamika laju temperatur asap zona kebakaran untuk berbagai konfigurasi ventilasi	188
Gambar 4.33 Pengaruh lokasi kebakaran terhadap laju fluks kalor dalam variasi konfigurasi ventilasi	191
Gambar 4.34 Pengaruh lokasi kebakaran terhadap nilai rata-rata fluks kalor dalam variasi konfigurasi ventilasi	193
Gambar 4.35 Pengaruh waktu terhadap fluks kalor untuk konfigurasi ventilasi alami dan <i>hybrid</i>	194
Gambar 4.36 Pengaruh waktu terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi untuk konfigurasi ventilasi alami dan <i>hybrid</i>	195
Gambar 4.37 Pengaruh laju produksi kalor terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi selama kebakaran dan setelah padam	196
Gambar 4.38 Pengaruh waktu terhadap bilangan Nusselt dalam perpindahan kalor dengan ventilasi <i>hybrid</i> dan alami	198
Gambar 4.39 Pengaruh dinamika temperatur terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi untuk ventilasi <i>hybrid</i> dalam analisis nondimensional	200
Gambar 4.40 Pengaruh dinamika temperatur terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi untuk ventilasi alami dalam analisis nondimensional	202

Daftar Tabel

Tabel 1.1 Daftar jumlah korban dan penyebab kebakaran skala besar pada beberapa terowongan jalan dan stasiun bawah tanah.	3
Tabel 1.2 Pengujian skala penuh dinamika asap kebakaran bawah tanah dengan berbagai konfigurasi ventilasi [12]	7
Tabel 2.1 Persamaan Konservatif Model Zona [18]	31
Tabel 2.2 State of the Art Penelitian	40
Tabel 2.3 Termokimia dan konstanta empiris untuk beberapa bahan bakar hidrokarbon cair [50]	67
Tabel 2.4 Analisis dimensional dan keserupaan [53-55]	72
Tabel 3.1 Penyekalaan dimensi model [53] stasiun untuk eksperimen	89
Tabel 3.2 Daerah diskretisasi dan komputasi	90
Tabel 3.3 Nilai termofisik material pada simulasi	94
Tabel 3.4. Daftar karakteristik sampel kebakaran pada zona platform untuk HRR 5-9MW pemodelan skala 1:25	99
Tabel 3.5 Lokasi penempatan alat ukur dan fokus pembahasan pada simulasi	102
Tabel 3.6 Parameter variasi operasi eksperimental skala 1:25	105
Tabel 3.7 Pengaturan instrumentasi eksperimen pada model tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah skala laboratorium 1:25	111
Tabel 3.8 Hasil kalibrasi termokopel tipe K pada eksperimen	118
Tabel 3.9 Hasil Kalibrasi Ix dan Io untuk setiap OD Glass	123
Tabel 4.1 Parameter dan Analisis Nondimensional [71]	135

Daftar Lampiran

Lampiran 1. Nilai Laju Pergantian Udara (<i>ACH</i>) untuk masing-masing jenis bangunan	219
Lampiran 2. Bagian-bagian penting Stasiun Metro Bawah Tanah [dikutip dari berbagai sumber publikasi elektronik]	221
Lampiran 3. Sertifikat standar kalibrasi sensor <i>heat flux water cooled</i>	226
Lampiran 4. Pengaturan Simulasi Kebakaran Stasiun Bawah Tanah berbasis Ventilasi Mekanik	227
Lampiran 5. Pengaturan Simulasi Kebakaran Stasiun Bawah Tanah berbasis Ventilasi Alami	238

Nomenklatur

\dot{Q}	=	produksi kalor (<i>heat release rate/HRR</i>)	kW
δ	=	ketebalan bahan bakar yang tertumpah	m
\dot{V}, Q	=	laju volumetrik ventilasi	m ³
V	=	volume bahan bakar	L
\dot{m}	=	laju pembakaran massa	kg/s
ΔH_c	=	entalpi pembakaran	kJ/kg
\dot{m}''	=	laju pembakaran massa per satuan luas	kg/(m ² .s)
\dot{m}''_{max}	=	laju pembakaran massa per satuan luas maksimum	kg/(m ² .s)
\dot{y}	=	laju regresi bahan bakar	m/s
\dot{y}_{max}	=	laju maksimum regresi bahan bakar	m/s
D, D_f	=	diameter bahan bakar	m
$k\beta$	=	konstanta empiris	
A	=	luas penampang/area	m ²
t_b	=	waktu pembakaran	s
\dot{Q}_c	=	laju produksi kalor konveksi	kW
ρ	=	densitas	kg/m ³
\dot{Q}^*	=	laju produksi kalor tak berdimensi	
Fr	=	bilangan Froude	
Nu	=	bilangan Nusselt	
T_∞	=	temperatur lingkungan	K
c_p	=	panas spesifik pada tekanan konstan	kJ/kg K
OD	=	densitas optik	/m
V	=	visibilitas	m
g	=	percepatan gravitasi	m/s ²
d	=	panjang perimeter ventilasi alami	m
z	=	ketinggian lapisan asap (pemisah)	m
H	=	ketinggian ceiling/plafon	m
ΔT	=	peningkatan temperatur lapisan asap	K
d	=	panjang perimeter ventilasi alami	m
q_r	=	perpindahan kalor radiasi persatuan luas	kW
q_c	=	perpindahan kalor konveksi persatuan luas	kW/m ²

h_{conv}	=	koefisien perpindahan kalor konveksi	kW/m ² K
x/L	=	lokasi sumber kebakaran	
x_a/L	=	lokasi titik pengukuran	
x_d/L	=	lokasi <i>inlet</i> ventilasi mekanik	
τ	=	waktu tanpa dimensi	
\dot{V}^*	=	laju volumetrik pembuangan asap tanpa dimensi	
\dot{Q}^*	=	laju produksi kalor tak berdimensi	
ΔT^*	=	peningkatan temperatur lapisan asap tak berdimensi	
y^*	=	tinggi lapisan asap tak berdimensi	
v^*	=	kecepatan aliran arah horizontal tak berdimensi	
z	=	ketinggian lapisan asap (pemisah)	m
H	=	ketinggian ceiling/plafon	m
ΔT	=	peningkatan temperatur lapisan asap	K
T_g	=	temperatur lapisan asap	K
h_c	=	ketinggian lapisan asap kritis	m
Q_c	=	laju volumetrik kritis	m ³ /s
h_c	=	ketebalan lapisan asap kritis	m
ρ_∞	=	massa jenis udara lingkungan	kg/m ³
t	=	waktu	s
$\dot{m}_{cer.}$	=	laju aliran asap masuk ke dalam ventilasi alami	kg/s
S	=	perimeter ventilasi alami	m
S/H	=	rasio antara perimeter dengan ketinggian ventilasi alami	
c	=	koefisien penyempitan orifice (tipikal = 0.7)	
$q_{psak}^{''}$	=	fluks kalor maksimum	kW/m ²
Z	=	elevasi ketinggian	m
L_f	=	panjang lidah api	m

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Sistem transportasi bawah tanah adalah salah satu pilihan untuk masyarakat kota dalam mengatasi masalah transportasi dalam hal kemudahan akses dan aktivitas manusia [1]. Akhir-akhir ini, terkait kebutuhan kapasitas besar, efektivitas yang baik, rendah polusi, dan konsumsi energi yang rendah, sistem transportasi bawah tanah memainkan peranan penting dalam transportasi perkotaan. Ada sebanyak 118 dari 43 negara seluruh dunia telah membangun sistem berbasis *mass rapid transit* [1].

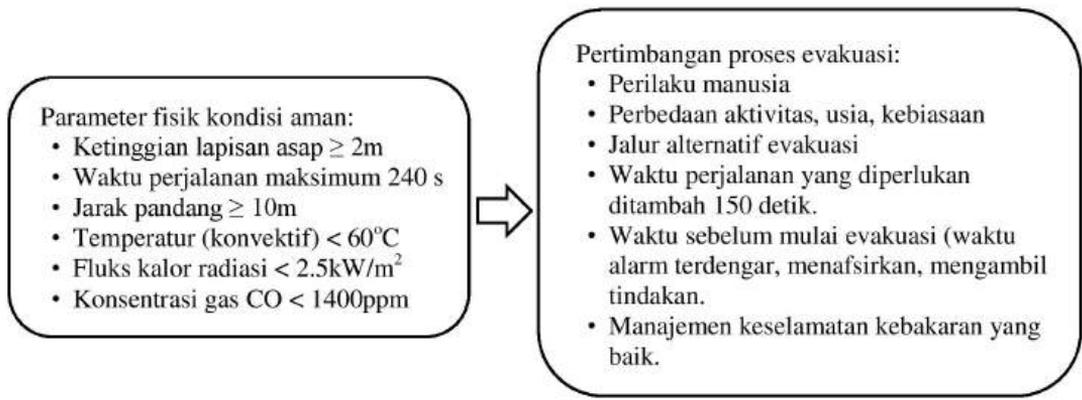
Aspek kesehatan dan keselamatan yang menjadi pertimbangan perancangan dan pembangunan sistem transportasi bawah tanah adalah bahaya kebakaran dimana diperlukan upaya pencegahan dan pengurangan risiko yang terjadi. Faktanya, 85% kematian dalam kebakaran suatu bangunan diakibatkan oleh racun yang bersumber dari asap kebakaran akibat racun dan temperatur tinggi [2-3]. Selain itu, jelaga dari api dan akumulasi asap yang terjadi akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan fluks kalor radiasi [4]. Berbagai bencana dalam kebakaran ruang bawah tanah menunjukkan sistem manajemen asap kebakaran yang dikelola dengan baik adalah kunci utama pencegahan atau meminimalisasi bahaya penumpang/pengguna [5].

Kemajuan penggunaan operasi sistem transportasi bawah tanah juga menimbulkan banyak kecelakaan fatal yang terjadi. Beberapa peristiwa kebakaran pada sistem transportasi bawah tanah akhir-akhir ini yang telah banyak memakan korban cukup besar, diantaranya terjadi di Azerbaijan tahun 1995 [6], St. King's Cross, London-Inggris tahun 1987 [7], Kaprun-Austria tahun 2000 [7], Daegu-Korea tahun 2003 [8], Minsk-Belarusia tahun 2011 [8], Shanghai dan Wenzhou-China tahun 2011 [8], dan Moscow Metro-Moskow tahun 2013 [8]. Penyebab kebakaran dan jumlah korban yang terjadi disajikan pada tabel 1.1.

Tabel 1.1 Daftar jumlah korban dan penyebab kebakaran skala besar pada beberapa terowongan jalan dan stasiun bawah tanah.

Stasiun/Kota-Negara	Jumlah korban (tewas/luka-luka)	Penyebab	Referensi
Baku-Azerbaijan, 1995	289/265	Adanya masalah pada kelistrikan pada kabin dan sistem ventilasi yang kurang memadai	[6-7]
St. King's Cross, London-Inggris 1987	31/100	Pemicu korek api menyala dan membakar tumpukan bahan mampu bakar	[7]
Kaprun-Austria 2000	155/12	Fan radiator tersumbat dan terjadi pemanasan berlebih pada fan sehingga memicu kebakaran pada oli hidrolik yang bocor	[7]
Daegu-Korea, 2003	150/189	Adanya masalah pada sistem pengendali asap /ventilasi. 149 dari 225 stasiun di Korea memiliki kekurangan dalam hal ventilasi	The Japan Times, 2003[8]
Shanghai dan Wenzhou-China, 2011	40/270	Diduga akibat kegagalan peralatan deteksi dan listrik	New York Times, 2011 [8]
Minsk-Belarusia, 2011	12/204	Adanya ledakan dan asap tebal	CBN News, 2011 [8]
Moscow Metro-Moscow, 2013	0/76	Adanya masalah teknis dalam jaringan listrik dalam stasiun	Ukraine Timeline, 2013 [8]

Menurut tabel 1.1 dapat dijelaskan bahwa kasus akibat permasalahan dalam sistem kelistrikan, pembuangan asap, dan ventilasi/tata udara menjadi faktor banyaknya jumlah korban tewas. Dalam hal ini, perlu strategi khusus dalam manajemen asap dan mengurangi material mampu bakar dalam perancangannya sehingga kebakaran akan lebih mudah dikendalikan. Selain itu, untuk mengendalikan/menekan korban jiwa harus memiliki sistem manajemen keselamatan yang baik mengingat perbedaan aktivitas, usia, kebiasaan, tingkat emosional setiap orang berbeda ketika kebakaran.



Gambar 1.1 Pertimbangan parameter fisik dan perilaku evakuasi dalam aspek keselamatan kebakaran.

Dalam menunjang aspek keselamatan dalam proses evakuasi kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah perlu mempertimbangkan berbagai kriteria keamanan suatu zona. Aspek-aspek keamanan dalam keselamatan kebakaran terlihat pada gambar 1.1 dimana kesemuanya bergantung pada perilaku evakuasi ketika kebakaran. Dengan demikian, desain stasiun bawah tanah harus mampu memajemen asap dan panas akibat kebakaran terhadap kebutuhan waktu evakuasi.

Usaha dalam manajemen asap kebakaran stasiun bawah tanah dapat dilakukan dengan mengondisikan laju pergantian udara (*air change rate*) melalui sistem ventilasi pembuangan yang terintegrasi. Laju pergantian udara dapat dikondisikan agar sesuai dengan standar kebutuhan udara bersih dalam area bawah tanah dan volume spasial bangunan. Upaya pengondisian laju pergantian udara dapat dilakukan dengan ventilasi mekanik dan alami. Penggunaan ventilasi mekanik memiliki performa pembuangan asap yang baik tetapi membutuhkan ruang yang cukup besar untuk peralatan instalasinya, membutuhkan biaya pemeliharaan, dan membutuhkan suplai daya listrik [3]. Ventilasi alami berbasis bukaan/efek cerobong dapat mencegah penggunaan *fan* udara yang akan mengurangi tinggi kompartemen bawah tanah dan ketika beroperasi tidak akan mengonsumsi daya. Bukaan ventilasi alami dapat

memberikan pergantian udara yang baik dan sistem pencahayaan alami untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan setiap waktu [3].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, L. H. Cheng, et.al [9] telah melakukan analisis performa ventilasi mekanik/paksa aliran vertikal dan horizontal untuk struktur bawah tanah pada kondisi kebakaran pada sistem jaringan transportasi, prediksi terhadap laju aliran fluida, distribusi temperatur, dan konsentrasi asap. Yang Jun [10] telah melakukan penelitian untuk memprediksi pergerakan asap dan efek kondisi bukaan pintu penahan *platform* terhadap penyebaran asap pada saat kebakaran di stasiun bawah tanah. Sedangkan, Yang Gao et.al.[11] telah meneliti efek dari ventilasi mekanik horizontal terhadap distribusi temperatur dan konsentrasi asap pada kebakaran terowongan jalan. Untuk penelitian ini, pengamatan ditekankan terhadap pola penyebaran dan manajemen asap dalam kebakaran skala besar (>5MW) dengan analisis kriteria keselamatan kebakaran dan efektivitas sistem ventilasi. Berikut adalah pengujian eksperimen skala penuh dinamika asap kebakaran dengan berbagai kondisi ventilasi yang dilakukan.

Tabel 1.2 Pengujian skala penuh dinamika asap kebakaran bawah tanah dengan berbagai konfigurasi ventilasi[12].

Nama Stasiun-Negara-Tahun	Penggunaan Transportasi	Sumber Kebakaran	Luas Area [m ²]	HRR [MW]	Sistem Ventilasi
Ofenegg-Switzerland-1965	rel	kolam bensin	24	15-25	alami, mekanik (horizontal, semi vertikal)
Zwenberg-Austria-1976	rel	kolam bensin	24	15-25	alami, mekanik (horizontal, semi vertikal)
Rapperfjord-Norway-1990-92	transportasi tambang	gerbong kereta, mobil, HGV, model kebakaran terencana	30-40	15-100	mekanik (horizontal, vertikal)
Memorial-USA-1993-1995	jalan	kolam minyak solar	60	10-100	mekanik (horizontal, vertikal)
Colli Berici-Italy-1999	jalan	kolam minyak bensin/solar, model prototipe mobil,	60	2-5	alami,
Rosa-Italy-2002	jalan	kendaraan barang, mobil, model kebakaran terencana	60	2-20	alami, mekanik-horizontal
Runehamar-Norway-2003	jalan	butiran pellet, ban, plastik, prototipe HGV	32.5	70-200	mekanik-horizontal

Berdasarkan data tabel 1.2, eksperimental kebakaran dapat digunakan sebagai suatu pendekatan kebakaran sesungguhnya dengan pendekatan analisis dimensional untuk melihat pengaruh antarparameter seperti gambar 1.1 dan untuk mengetahui keandalan sistem deteksi kebakaran, sistem ventilasi terbaik, karakteristik kualitas udara dalam ruangan, pergerakan dan dinamika lapisan asap [12]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan studi eksperimen dan simulasi numerik dengan skala 1:25 stasiun bawah tanah dengan variasi ventilasi alami, mekanik dengan sistem transversal, dan kombinasi keduanya. Studi ini akan menghasilkan bagaimana upaya manajemen asap terbaik yang harus digunakan sesuai dengan standar dengan memperhatikan aspek keselamatan transportasi bawah tanah.

Penggunaan kombinasi ventilasi mekanik dan alami (ventilasi *hybrid*) telah menjadi tren isu dalam perancangan sistem tata udara pada bangunan-bangunan komersil karena efektivitas sistem ventilasi yang tinggi dan sehat [13-15]. Hal ini didukung oleh fungsi dari ventilasi alami yang juga berpotensi secara signifikan dalam mengurangi kebutuhan energi dalam gedung, seperti pencahayaan alami, sistem ventilasi dan tata udara, dan berpotensi pendinginan ruangan dalam bangunan pada umumnya [13]. Ventilasi alami terjadi karena perilaku beda tekanan antara *inlet* dan *outlet* dari suatu ruang. Perbedaan tekanan ini salah satunya dapat dilakukan dengan ventilasi berbasis cerobong yang bekerja dengan basis termal atau angin. Asap yang dihasilkan melalui proses pembakaran merupakan asap termal yang dapat dikendalikan dengan ventilasi berbasis ventilasi alami (bukaan atrium). Melalui cerobong inilah udara akan dialirkan keluar (*discharge*) secara alami.

Oleh karena itu, berdasarkan ulasan terkait urgensi keselamatan pada sistem transportasi bawah tanah dan melihat potensi manajemen asap kebakaran berbasis ventilasi *hybrid* yang cukup andal dalam memberikan akses udara bersih, akan dikaji manajemen asap kebakaran pada model tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah dengan menggunakan konfigurasi ventilasi *hybrid* dalam analisis aspek-aspek keselamatan kebakaran melalui metode eksperimental dan simulasi numerik.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, perumusan masalah penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimanakah korelasi antara hasil simulasi dan eksperimen pemodelan tipikal 1:25? Apakah analisis dimensional sudah sesuai dan merepresentasikan kondisi sebenarnya?
2. Apakah standar yang digunakan untuk mengendalikan asap kebakaran skala besar merancang sudah tepat dan tersedia kondisi optimum?
3. Bagaimana pengaruh konfigurasi ventilasi dalam manajemen asap kebakaran pada zona *platform*?
4. Bagaimana efektivitas ventilasi terhadap parameter keselamatan kebakaran stasiun bawah tanah?
5. Bagaimana pola perpindahan kalor konvektif transien selama dan setelah kebakaran terhadap keselamatan evakuasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui karakteristik pola penyebaran asap dan panas akibat kebakaran skala besar pada pemodelan eksperimen dan simulasi numerik skala laboratorium 1:25.
2. Menganalisis efektivitas manajemen asap kebakaran skala besar pada zona *platform* Stasiun Metro Bawah Tanah dengan konfigurasi ventilasi *hybrid* terhadap keselamatan kebakaran.
3. Menganalisis perilaku perpindahan kalor konvektif transien dan fluks kalor radiasi dalam kebakaran skala besar dan kaitannya terhadap keselamatan kebakaran.
4. Memberikan informasi terkait standar pengaturan sistem ventilasi dalam manajemen asap dan analisis nondimensional yang diperoleh.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Memberikan arahan acuan standar terhadap perancangan dan pemilihan sistem ventilasi dalam manajemen asap kebakaran untuk meningkatkan keselamatan selama proses evakuasi.
2. Memberikan gambaran pergerakan dan penyebaran asap kebakaran skala besar melalui studi pemodelan eksperimen dan simulasi numerik dan usaha mengendalikannya dalam menunjang keselamatan.
3. Memberikan informasi terkait penerapan ventilasi *hybrid* dalam mengendalikan asap kebakaran transportasi bawah tanah.

1.5 Pembatasan Masalah

Penelitian ini membahas studi eksperimental dan simulasi numerik terkait penerapan ventilasi *hybrid* dalam manajemen asap kebakaran model tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah. Studi eksperimen dilakukan pada sebuah model geometri Stasiun Metro Bawah Tanah skala laboratorium 1:25 yang dilakukan penyederhanaan geometri. Sebelum dilakukan pemodelan eksperimen, telah dilakukan pemodelan simulasi numerik melalui perangkat lunak NIST FDS V.05 [16-17] dengan tujuan untuk memvalidasi, melihat fenomena awal, dan memprediksi yang menjadi fokus bahasan. Seluruh karakteristik pembakaran, perancangan parameter pengukuran, dan geometri stasiun pada simulasi dijadikan acuan dalam perancangan eksperimen. Dari hasil pemodelan simulasi ini, dilakukan analisis dimensional untuk melihat perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen yang dilakukan. Berdasarkan studi simulasi dan eksperimen dilakukan pembatasan penelitian yang menjadi fokus pembahasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan kepada dinamika pergerakan dan penyebaran asap kebakaran pada zona *platform* dan atrium.
2. Ditetapkan material tidak mampu bakar pada daerah sekitar lokasi sumber kebakaran, sehingga api tidak menyebar. Hal ini tentunya tidak demikian pada kondisi aktual dimana terdapat banyak kemungkinan adanya material mampu

bakar yang dapat membantu penyebaran api. Oleh karena itu, pembahasan difokuskan kepada penyebaran asap dibandingkan penyebaran api.

3. Pada studi ini, desain kebakaran skala besar menggunakan *pool fires* (kolam api) dengan bahan bakar gasolin yang diasumsikan mempunyai laju pembakaran maksimum dan konstan berdasarkan waktu, sebesar 2.56kW skala pemodelan.
4. Pengendalian asap kebakaran dilakukan dengan ventilasi mekanik sistem transversal (sistem hisap vertikal) dengan kapasitas sebesar 0.0035-0.0089m³/s skala pemodelan. Sistem aktif ventilasi mekanik tidak menjadi fokus utama dan didesain hanya lubang ventilasi udara dengan ketentuan 1x1m pada jarak konstan 16.25m sepanjang zona *platform* pada skala sebenarnya. Ventilasi alami vertikal yang dirancang dengan 7 variasi rasio perimeter terhadap ketinggian cerobong, S/H sebesar $0.122 \leq S/H \leq 0.277$.
5. Besarnya desain sumber kebakaran pada model skala laboratorium diperoleh dengan menggunakan analisis nondimensional model Froude tanpa menahan bilangan Reynolds sehingga perbandingan konstan yang dikondisikan pada studi ini hanyalah gaya apung dari sumber kebakaran dimana asumsi pemodelan ini dapat diterima selama aliran berada dalam fase yang cukup turbulen.
6. Penelitian ini dilakukan pada kondisi temperatur lingkungan 24-27°C dengan kelembaban terukur 75-95% dan tidak dipengaruhi kondisi eksternal, seperti kecepatan angin dan sejenisnya.
7. Model stasiun pada studi ini diasumsikan berada 25m di bawah tanah sehingga dimensi bukaan ventilasi natural--didesain terhubung dengan daerah terbuka pada level ketinggian permukaan tanah--dapat direpresentasikan berdasarkan rasio dimensi bukaan ventilasi natural dengan panjangnya konduit ventilasi natural sebesar 25m.
8. Geometri pada stasiun, misal ruang pompa, kontrol, AHU (*air handling unit*), tangki air pemadam kebakaran, dan alat-alat proteksi kebakaran yang tidak mempengaruhi pergerakan asap pada zona kebakaran tidak dimodelkan.

1.6 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini yang akan dilakukan verifikasi sebagai berikut:

1. Ada pengaruh antara lapisan asap kritis dan laju volumetrik ventilasi terhadap fenomena *plug-holing*.
2. Hipotesis nol: tidak ada pengaruh yang signifikan dalam pemasangan ventilasi *hybrid* akan memberikan efek pelepasan asap yang lebih optimum dalam kebakaran kompartemen dibandingkan hanya ventilasi mekanik.
3. Hipotesis nol: tidak ada hubungan antara laju pelepasan kalor, ketinggian *ceiling*, diameter lubang ventilasi dan laju volumetrik ventilasi mekanik terhadap pengendalian asap dalam kompartemen.
4. Hipotesis nol: desain dan penempatan atrium ketika kebakaran terjadi tidak akan memengaruhi laju pelepasan asap dan efek pulsasi yang terjadi.
5. Distribusi temperatur, pergerakan dan penyebaran asap diduga dipengaruhi oleh desain sumber kebakaran, kapasitas dan peletakan sistem pembuangan asap, serta ketinggian zona tempat kebakaran terjadi.

1.7 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium melalui metode simulasi numerik dan akan divalidasi dengan hasil eksperimen. Secara umum, metodologi penelitian akan dijelaskan dalam urutan pada gambar 1.2. Studi manajemen asap kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah dilakukan dalam skenario kebakaran skala besar dengan kasus terburuk, dimana kebakaran terjadi pada daerah salah satu jalur evakuasi dan memiliki akses ventilasi daerah kritis. Oleh karena itu, seluruh parameter simulasi dan eksperimen, baik konfigurasi ventilasi, laju pergantian udara, maupun jalur akses evakuasi, dirancang agar memenuhi kriteria aman dan mampu menjadi acuan standar keselamatan yang baik.

Metodologi Umum Penelitian Manajemen Asap Kebakaran Model Tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah

1. Desain penelitian (studi kasus penelitian dan pengamatan awal)
→ latar belakang masalah, tujuan penelitian, rumusan masalah, dan hipotesis
2. Studi kepustakaan → tinjauan standar keselamatan dan manajemen asap kebakaran
3. Pemodelan simulasi numerik berdasarkan standar → simulasi FDS V.05
4. Pengolahan dan interpretasi data
5. Analisis dimensional → model Froude
6. Pemodelan eksperimen skala laboratorium 1:25
7. Perancangan eksperimen dan instrumentasi
 - a. merancang sistem ventilasi (mekanik dan alami)
 - b. menempatkan alat ukur/sensor
 - c. mengkalibrasi sensor
 - d. mengestimasi sumber kebakaran (HRR skala besar)
 - e. menentukan skenario kebakaran (skenario kasus terburuk)
8. Pengambilan data
9. Pengolahan dan validasi data dengan hasil simulasi
10. Simpulan dan saran

Gambar 1.2 Metodologi Umum Penelitian

1.8 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini ditulis berdasarkan sistematika penulisan ilmiah sesuai dengan Keputusan Rektor Universitas Indonesia nomor 628/SK/R/UI/2008 tentang Pedoman Teknis Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia (UI) yang disesuaikan dengan sistematika penulisan ilmiah yang ada di Fakultas Teknik UI dan disesuaikan juga dengan penelitian yang dilakukan. Secara keseluruhan tugas akhir ini terdiri dari enam bab, yaitu: Pendahuluan, Dasar Teori, Metodologi Penelitian, Konstruksi dan Instalasi Alat Uji, Hasil dan Analisis, serta Kesimpulan dan Saran.

1.8.1 Pendahuluan

Bab pendahuluan membahas secara singkat tentang keseluruhan isi dari penelitian yang dilakukan, atau dengan kata lain merupakan pengantar dari penulisan tugas akhir. Bagian ini terdiri dari tujuh sub bab, antara lain: latar Belakang, Perumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian, Metodologi Penelitian, dan Sistematika Penulisan. Pada bagian latar belakang dijelaskan mengapa penelitian ini dilakukan, hal urgensi penelitian, serta memberikan landasan dan regulasi yang mendukung dilaksanakannya penelitian. Rumusan tentang masalah yang diteliti dan mengapa hal tersebut menjadi penting untuk diteliti dijelaskan pada bagian perumusan masalah. Sementara itu tujuan-tujuan yang ingin dicapai ini dijabarkan pada sub bab tujuan penelitian. Sedangkan pada bagian manfaat penelitian dijelaskan bagaimana hasil dari penelitian yang dilakukan akan memberikan dampak positif terhadap perkembangan ilmu teknik pembakaran dalam bidang aplikasi terkait. Metodologi penelitian menjabarkan secara singkat gambaran umum dari metode yang digunakan dalam penelitian. Kemudian landasan dan struktur penulisan ilmiah yang digunakan dalam menyusun tugas akhir ini dijelaskan pada sub bab sistematika penulisan.

1.8.2 Dasar Teori

Bab ini membahas tentang teori-teori dasar dan tinjauan literatur yang berkontribusi terhadap penyusunan tugas akhir ini, dimana dasar teori tersebut digunakan sebagai landasan dilakukannya penelitian, perhitungan kuantitatif, analisis hasil eksperimen, dan penarikan kesimpulan. Dasar teori didapatkan berdasarkan penelusuran ilmiah yang meliputi tinjauan literatur terhadap penelitian-penelitian terkait sebelumnya, *review* terhadap jurnal-jurnal terkait, dan penelusuran terhadap buku-buku tentang teknik pembakaran. Secara umum dasar teori yang digunakan berkaitan dengan kebakaran pada kompartemen, sifat pembakaran pada *pool fire*, dinamika dan pengukuran asap kebakaran, tinjauan karakteristik ventilasi *hybrid*, dan sekilas mengenai perangkat lunak FDS yang digunakan untuk simulasi.

1.8.3 Metodologi Penelitian

Bab ini berisi penjelasan detail tentang konstruksi alat yang digunakan pada penelitian ini, seperti penjelasan mendetail tentang masing-masing objek penelitian geometri stasiun, komponen alat ukur, perancangan sensor densitas optik, jenis sampel yang digunakan, sampai pada bagaimana kalibrasi dari masing-masing alat uji dilakukan. Selain itu bab ini membahas tentang bagaimana instalasi alat keseluruhan alat eksperimen dilakukan sehingga memungkinkan penelitian dapat dilaksanakan. Pada bab ini juga dijelaskan dasar pemilihan variabel atur dalam pengambilan data selama proses eksperimen

Tahapan-tahapan yang dilakukan selama proses penelitian dari awal sampai akhir dijabarkan dan dibahas secara mendetail pada bab ini. Proses penelitian yang dimaksud terbagi menjadi tiga proses utama dengan metode penelitiannya masing-masing, antara lain: tahapan praeksperimen seperti persiapan sampel, kalibrasi dan *set up* alat, sampai pada tinjauan aspek keselamatan dalam eksperimen; tahapan eksperimen yang banyak menyangkut tentang operasional penelitian, pengukuran dan akuisisi data, dan sistematika pengolahan data; serta tahapan pascaeksperimen yang menyangkut analisis dari data yang didapat dan teknik penarikan kesimpulan dari keseluruhan hasil eksperimen.

1.8.4 Hasil dan Pembahasan

Bab hasil dan analisis merupakan inti dari penulisan tugas akhir yang dilakukan. Pada bab ini dilakukan pengolahan data hasil eksperimen dan simulasi numerik pemodelan. Analisis yang akan dilakukan terbagi dalam tiga hal, yakni performa sistem ventilasi, efektivitas manajemen asap kebakaran terhadap parameter fisik keselamatan kebakaran, dan perilaku perpindahan kalor konveksi transien terhadap faktor keselamatan. Analisis data juga akan disajikan dalam bentuk analisis nondimensional dan korelasi yang akan diperoleh. Dengan demikian, hasil yang diperoleh diharapkan menjadi informasi dan acuan yang dapat diterapkan dalam keselamatan kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah.

1.8.5 Kesimpulan dan Saran

Setelah analisis dan evaluasi hasil eksperimen dari penelitian ini dilakukan, maka selanjutnya penarikan kesimpulan dari hasil perhitungan dan analisis pengolahan data dijabarkan secara mendetail pada bab ini, sehingga dengan demikian kesimpulan akhir dari penelitian dapat disajikan secara ilmiah dan terstruktur. Selain itu, pada bab ini juga diberikan saran-saran yang diambil berdasarkan keseluruhan proses penelitian yang dilakukan.

Dasar Teori**2.1 Dasar Model Pembakaran Dua Zona**

Kebakaran pada suatu kompartemen sederhana dapat dimodelkan relevan terhadap model kebakaran zona. Inti dari kebakaran zona adalah memodelkan suatu kebakaran pada kompartemen berdasarkan dua zona. Kedua zona ini direpresentasikan sebagai kontrol volume yang ada karena disebabkan oleh adanya stratifikasi temperatur akibat adanya kebakaran, seperti pada gambar 2.1 [19]. Api dimodelkan sebagai sumber energi dan massa yang juga berperan seakan-akan sebagai pompa karena gaya apung pada aliran hasil pembakaran memindahkan massa pada zona di bawahnya ke zona atas melalui proses yang disebut sebagai *entrainment* [19].

Dapat diperhatikan pada gambar 2.1, pembagian zona dalam pemodelan zona kebakaran kompartemen dimana CV_1 adalah zona bagian atas yang meliputi api serta produk hasil pembakarannya dan CV_2 yang merupakan gas-gas selain hasil kebakaran kompartemen. Inti dari pemodelan ini adalah dengan mengaplikasikan persamaan-persamaan konservasi pada tiap volume kontrol (CV_1 dan CV_2). Dapat diperhatikan pada persamaan 2.1, 2.2, dan 2.3 [10] yang masing-masing merupakan persamaan konservasi massa, spesies, dan energi sebagai berikut:

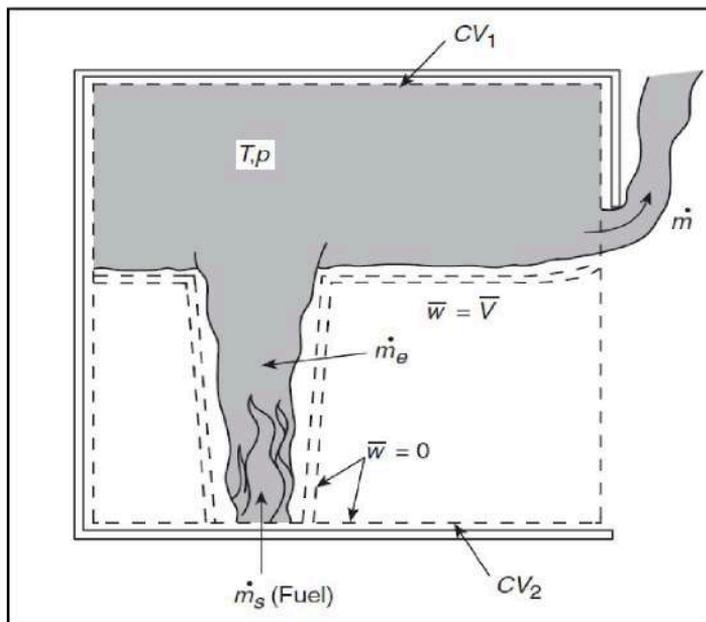
$$A \frac{d}{dt} (\rho z_i) + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho z_i A \frac{dY_i}{dt} + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (Y_{ij} - Y_i) = \dot{\omega}_i \quad (2.2)$$

$$\rho c_p z_i A \frac{dY_i}{dt} - z_i A \frac{dp}{dt} + c_p \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (T_j - T) = \dot{\omega}_F \Delta H - \dot{Q}_{net\ loss} \quad (2.3)$$

dengan,

- ρ = densitas gas pada kontrol volume
- z_i = 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
- ΔH = entalpi pembakaran
- $\dot{\omega}_F$ = laju reaksi bahan bakar



Gambar 2.1 Model Kebakaran Zona [19]

Model kebakaran zona juga digunakan oleh William D. Walton dan Philip H. Thomas [20] sebagai basis dalam estimasi temperatur pada kebakaran kompartemen

yang dijelaskan pada gambar 2.2. Berdasarkan gambar ini dapat diekspresikan persamaan konservasi massa yang sesuai dengan persamaan 2.4 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 [20].

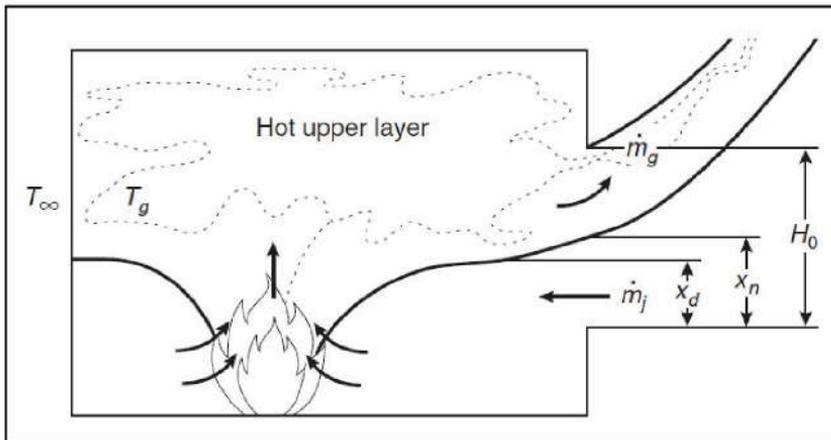
$$\dot{m}_g = \dot{m}_f + \dot{m}_a \quad (2.4)$$

Rocket [20] mendefinisikan laju massa gas keluar dan laju massa udara masuk ke dalam kompartemen seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.5 dan 2.6. Dengan beberapa variabelnya yang dapat diperhatikan pada gambar 2.2 dan beberapa variabel, seperti C_d , W_0 , H_0 , ρ_∞ , dan g yang adalah koefisien penyempitan *orifice* (tipikal = 0.7), lebar bukaan (m), tinggi bukaan (m), kerapatan udara lingkungan (kg/m^3), dan percepatan gravitasi (m/s^2).

Rocket [20] mendefinisikan laju massa gas keluar dan laju massa udara masuk ke dalam kompartemen seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.5 dan 2.6. Dengan beberapa variabelnya yang dapat diperhatikan pada gambar 2.2 dan beberapa variabel, seperti C_d , W_0 , H_0 , ρ_∞ , dan g yang adalah koefisien penyempitan *orifice* (tipikal = 0.7), lebar bukaan (m), tinggi bukaan (m), kerapatan udara lingkungan (kg/m^3), dan percepatan gravitasi (m/s^2).

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_0 \rho_\infty \left[2g \frac{T_\infty}{T_g} \left(1 - \frac{T_\infty}{T_g} \right) \right]^{1/2} (H_0 - X_N)^{2/3} \quad (2.5)$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W_0 \rho_\infty \left[2g \left(1 - \frac{T_\infty}{T_g} \right) \right]^{1/2} (X_N - X_d)^{1/2} \left(X_N + \frac{X_d}{2} \right) \quad (2.6)$$



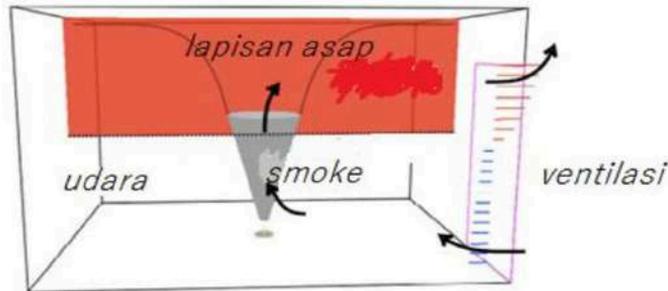
Gambar 2.2 Model Kebakaran Zona menurut Walton dan Thomas [20]

Untuk kondisi kebakaran sesudah *flashover* atau mendekati *flashover*, laju massa udara masuk dapat diestimasi melalui persamaan 2.7 [20]. Dengan A_o yang adalah luas penampang bukaan.

$$\dot{m}_a = 0.5A_o\sqrt{H_o} \quad (2.7)$$

Untuk mengetahui karakteristik lapisan asap dalam kebakaran zona melalui persamaan konservatif akan dijelaskan pada gambar 2.3. Sebuah kompartemen dibagi ke dalam dua kontrol volume, lapisan atas yang relatif panas dan lapisan yang lebih rendah relatif dingin seperti gambar 2.3. Gas dalam setiap lapisan memiliki karakteristik massa m_i , energi dalam E_i , densitas ρ_i , temperatur T_i , dan volume V_i dimana $i = L$ untuk lapisan asap bawah dan $i=U$ untuk lapisan asap atas [18]. Kompartemen keseluruhan memiliki karakteristik tekanan P . Berikut variabel-variabel yang berhubungan untuk parameter densitas, energi dalam, Hukum Gas Ideal setiap lapisan asap. Densitas $\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$, Energi dalam $E_i = c_v m_i T_i$, Hukum Gas Ideal $P = R \rho_i T_i$, dan total volume = $V = V_L + V_U$ dengan Konstanta gas umum $R = c_p - c_v$

dan rasio panas spesifik, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$. Untuk udara lingkungan, $c_p \approx 1 \text{ kJ/kg K}$ dan $\gamma = 1.4$ [18].



Gambar 2.3 Karakteristik Model Kebakaran Zona [18]

Persamaan tambahan diperoleh dari persamaan kekekalan massa dan energi untuk setiap lapisan diperlukan untuk melengkapi sejumlah persamaan. Persamaan turunan untuk massa dalam setiap lapisan adalah $\frac{dm_U}{dt} = \dot{m}_U$ dan $\frac{dm_L}{dt} = \dot{m}_L$. Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa:

$$\frac{dE_i}{dt} + P \frac{dV_i}{dt} = \dot{h}_i \quad (2.8)$$

Dimana c_p dianggap konstan dalam definisi entalpi, sehingga

$$\dot{h} = c_p \dot{m}_u T_u + \dot{E}_u + c_p \dot{m}_L T_L + \dot{E}_L \quad (2.9)$$

Penurunan persamaan tekanan [18] dapat diturunkan dengan menambahkan faktor lapisan atas dan bawah dari persamaan 2.8 dengan catatan $\frac{dv_U}{dt} = -\frac{dv_L}{dt}$, bahwa

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{d(c_v \dot{m}_i T_i)}{dt} = \frac{c_v}{R} \frac{d(PV_i)}{dt} \quad (2.10)$$

Untuk menghasilkan

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U) \quad (2.11)$$

Persamaan turunan untuk volume lapisan asap [18] dapat dihasilkan dengan mensubstitusi persamaan (2.10) ke dalam persamaan (2.8), menghasilkan:

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left[(\gamma - 1)\dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dt} \right] \quad (2.12)$$

Dengan $E_i = c_v m_i T_i$ dapat ditulis kembali persamaan (2.12) untuk menghilangkan dV/dt untuk menyatakan:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left[\dot{h}_i + V \frac{dP}{dt} \right] \quad (2.13)$$

Persamaan densitas [18] dapat diturunkan dengan menerapkan persamaan dasar menjadi $\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_i}{V_i} \right)$ dan menggunakan persamaan (2.12) untuk menghilangkan dV_i/dt untuk menghasilkan:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{-1}{c_p V_i T_i} \left[(-c_p m_i T_i) + \dot{h}_i - \frac{V_i}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} \right] \quad (2.14)$$

Persamaan tekanan [18] dapat dihasilkan dari persamaan dasar dengan menerapkan aturan $\frac{dT_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{P}{R\rho_i} \right)$ dan menggunakan persamaan (2.14) untuk menghilangkan $d\rho_i/dt$ menghasilkan:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p V_i \rho_i} \left[(-c_p m_i T_i) + \dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dt} \right] \quad (2.15)$$

Persamaan-persamaan (2.11) sampai (2.15) dapat diringkas dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1 Persamaan Konservatif Model Zona [18]

Tipe Persamaan	Persamaan Turunan
massa lapisan ke-i	$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i$
tekanan	$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U)$
energi lapisan ke-i	$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left[\dot{h}_i + V \frac{dP}{dt} \right]$
volume lapisan ke-i	$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left[(\gamma - 1)\dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dt} \right]$

massa jenis lapisan ke-i	$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{-1}{c_p V_i T_i} \left[(-c_p m_i T_i) + \dot{h}_i - \frac{V_i}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} \right]$
temperatur lapisan ke-i	$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p V_i \rho_i} \left[(-c_p m_i T_i) + \dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dt} \right]$

Catatan:

Untuk menghitung komputasi numerik model kebakaran zona, digunakan persamaan volume lapisan asap atas, temperatur lapisan atas, temperatur lapisan bawah, dan tekanan

Persamaan pada tabel 2.1 yang digunakan dalam simulasi numerik adalah persamaan temperatur lapisan asap, volume lapisan asap, dan tekanan. Dalam persamaan ini, tekanan sebenarnya dimodelkan dengan perbedaan tekanan relatif terhadap tekanan lingkungan sebagai acuan untuk meminimalisasi ketidakstabilan numerik.

2.2. Studi Keselamatan Evakuasi Kebakaran Transportasi Bawah Tanah

Sistem transportasi bawah tanah adalah salah satu cara dalam mengatasi masalah dalam hal kemudahan akses dan aktivitas manusia dalam transportasi. Pembangunan stasiun kereta bawah tanah akan menjadi sarana transportasi untuk masyarakat perkotaan dengan kapasitas yang memadai. Hal ini dibuktikan dengan semakin berkembangnya kota-kota besar dunia, khususnya negara-negara Eropa, Asia, dan Amerika membangun Stasiun Metro Bawah Tanah untuk keperluan kemudahan mobilitas, seperti digambarkan pada gambar 2.4 [21]. Beberapa pertimbangan penggunaan transportasi bawah tanah [21], antara lain:

- Kapasitas besar dan pelayanan setiap saat.
- Bersih karena menggunakan sistem transportasi berbasis listrik.
- Tidak bergantung pada lalu lintas, jalan, dan pejalan kaki.
- Kebanyakan sistem metro bawah tanah memiliki jalur khusus dan tidak untuk kereta api barang atau layanan kereta api antar kota.
- Transportasi dengan pengeluaran biaya paling rendah pada kebanyakan kota di dunia.

Faktor keselamatan dan kenyamanan dalam menunjang aktivitas manusia menjadi prioritas utama ketika banyak orang yang beraktivitas di dalamnya. Banyak hal yang perlu diperhatikan dalam pembangunan sistem transportasi bawah tanah dalam upaya menekan risiko dan bahaya yang terjadi dalam menunjang keselamatan masyarakat ketika menggunakannya. Salah satu aspek keselamatan yang perlu mendapat perhatian khusus dalam transportasi ini adalah keselamatan kebakaran.



Gambar 2.4 Persebaran sistem transportasi bawah tanah di kota-kota besar seluruh dunia [21]

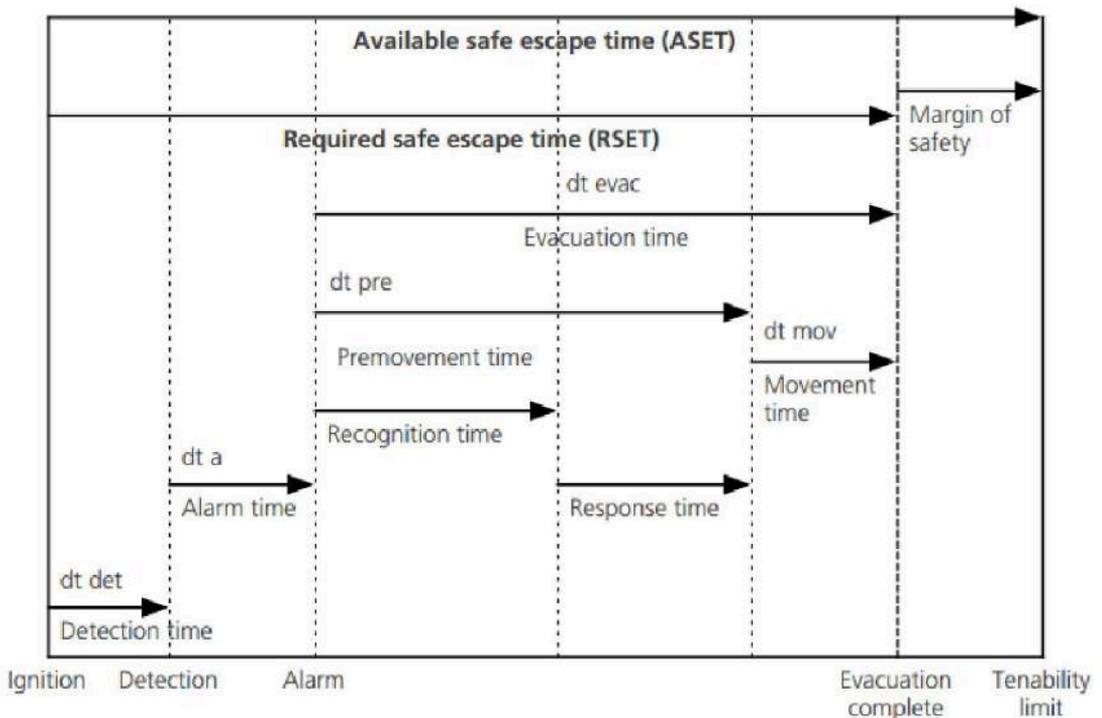
Mengingat penumpang stasiun bawah tanah terdiri atas berbagai jenis kegiatan/aktivitas, sifat dan perilaku, kebiasaan, perbedaan jenis usia dan kelamin, membutuhkan manajemen keselamatan yang baik mengaturnya. Berbagai parameter aman dalam mendukung keselamatan kebakaran untuk ruang kompartemen dalam waktu terkena langsung/terekspos kebakaran maksimum selama 10 menit [23-25], mencakup:

- a. Jarak pandang $\geq 10\text{m}$ (untuk ruang besar), $\geq 5\text{m}$ (untuk ruang kecil)
- b. Ketinggian lapisan asap dipertahankan pada level $\geq 2.0\text{m}$

- c. Temperatur udara $\leq 100^{\circ}\text{C}$
- d. Batas konsentrasi gas $\text{CO} \leq 2800 \text{ ppm}$, dan gas $\text{HCN} \leq 140 \text{ ppm}$
- e. Fluks kalor radiasi $\leq 2.5 \text{ kW/m}^2$

Untuk itu, dibutuhkan waktu evakuasi aman yang tersedia dalam menunjang keselamatan agar pengaruh asap dan panas kebakaran tidak melebihi ambang batas parameter keselamatan kebakaran.

Dalam analisis perhitungan evakuasi, diperlukan pertimbangan waktu sebelum bergerak (*pre-movement time*), waktu perjalanan, waktu tunggu, dan waktu tambahan aman (*safety margin*) yang harus diperhitungkan secara baik berdasarkan kondisi jalur evakuasi. Waktu evakuasi aman tersedia (ASET) merupakan tolok ukur waktu yang harus tersedia untuk evakuasi seperti dijelaskan pada gambar 2.5 [22].



Gambar 2.5 Grafik waktu evakuasi aman yang tersedia (ASET) ketika kebakaran terjadi [22]

Menurut gambar 2.5. waktu evakuasi meliputi waktu yang dijelaskan pada persamaan 2.16 [22].

$$t_{\text{evakuasi}} = t_{\text{deteksi}} + t_{\text{alarm}} + t_{\text{mendefinisikan}} + t_{\text{keputusan}} + t_{\text{evakuasi}} + t_{\text{aktual}} + t_{\text{tunggu/antre}} \quad (2.16)$$

Sedangkan waktu yang tersedia (ASET) harus lebih dari waktu yang diperlukan (RSET) agar evakuasi berjalan dengan baik sehingga dapat dituliskan pada persamaan 2.17 [22].

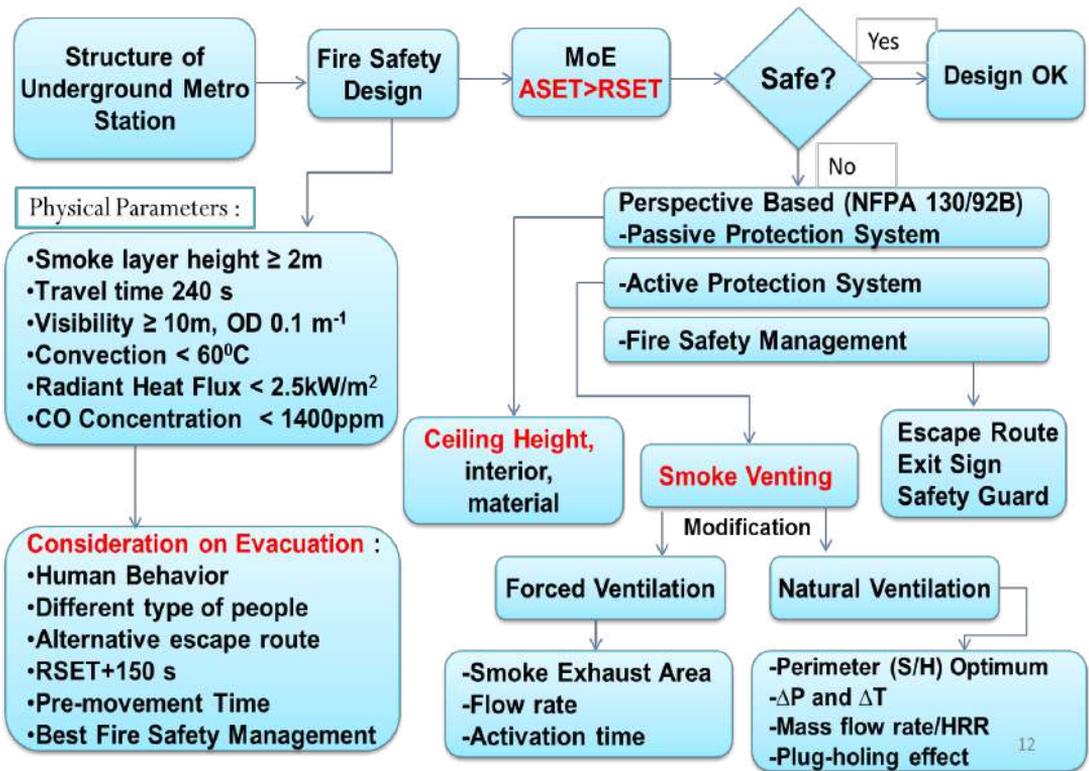
$$t_{\text{evakuasi}} + t_{\text{batas aman}} < t_{\text{yang diperlukan}} \quad (2.17)$$

Teknik perhitungan secara detail terkait komponen waktu evakuasi tidak dijelaskan pada bab ini dan dapat dipelajari pada referensi [26-27].

Untuk memenuhi kriteria aman dalam proses evakuasi, ada tiga hal yang perlu diperhatikan dan diupayakan strategi yang baik, yakni terkait pemahaman sistem proteksi pasif, sistem proteksi aktif, dan manajemen keselamatan kebakaran. Sistem proteksi pasif dapat dilakukan dengan merancang ketinggian *ceiling*/plafon minimum 4.5m [28] dan material yang mampu tahan api/temperatur tinggi selama minimum dua jam [28-29]. Selain itu, usaha untuk mengurangi penjaralan api melalui *fire barrier*, ruang bebas asap sementara, menyediakan jalan evakuasi, pemasangan tanda menuju eksit/pintu keluar juga merupakan sistem proteksi pasif [30]. Sistem proteksi aktif dapat berupa sistem pendeteksian kebakaran baik manual ataupun otomatis, sistem pemadam kebakaran berbasis air/bahan kimia/khusus (*springkler*, pipa tegak dan slang kebakaran, APAR, dan sejenisnya) [30] dan aktivasi ventilasi mekanik. Sedangkan manajemen keselamatan kebakaran dapat berupa pemandu evakuasi atau *safety guard* yang bertugas mengarahkan evakuan menuju pintu keluar aman menuju *assembly point* (tempat berkumpul). Ketiga parameter ini harus bekerja secara baik dan tidak dapat terpisahkan sehingga jumlah korban yang jatuh dapat diminimalisasi dan seluruh evakuan merasa aman.

Dalam studi ini, penelitian difokuskan pada usaha manajemen asap kebakaran terhadap sistem proteksi pasif-aktif berbasis ventilasi yang terpasang di lokasi tertentu pada geometri stasiun. Penjelasan terkait konfigurasi sistem ventilasi dan karakteristiknya akan dibahas secara detail pada Bab 3. Gambar 2.6 adalah diagram

alir sistem keselamatan kebakaran dalam transportasi bawah tanah secara terintegrasi.



Gambar 2.6 Diagram studi keselamatan kebakaran dalam stasiun bawah tanah.

2.3 State of The Art Penelitian

Studi manajemen asap kebakaran ruang bawah tanah berbasis konfigurasi ventilasi *hybrid* terhadap aspek-aspek keselamatan kebakaran telah banyak studi yang dilakukan sebelumnya baik melalui simulasi berbasis *CFD* maupun kajian eksperimen. Berikut beberapa ringkasan hasil penelitian terdahulu untuk kemudian dijadikan landasan untuk penelitian ini yang dijelaskan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 *State of the Art* Penelitian

No.	Penulis	Tahun	Metode	Hasil	Catatan
1	L. H. Cheng, T. H. Cheng, C. W. Liu. [9]	2001	Perangkat lunak MFIRE dan metode eksperimental	<p>a. Performa ventilasi mekanik pada kondisi kebakaran yang terjadi pada sistem jaringan transportasi, prediksi terhadap laju aliran fluida, distribusi temperatur, dan konsentrasi asap.</p> <p>b. Pengamatan arah dan laju dari aliran udara, distribusi temperatur, dan respon dari sistem ventilasi darurat pada saat kebakaran terjadi pada fasilitas bawah tanah.</p> <p>c. 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.</p>	Cukup memberikan masukan terhadap nilai-nilai laju ventilasi yang akan digunakan sebagai parameter variasi
2	Yang Jun – Tao, Yang Yun, Wang He – Lan, Shi Liang [10]	2011	Metode simulasi CFD	Prediksi pergerakan asap dan efek dari kondisi pembukaan pintu penahan platform terhadap penyebaran asap pada saat kebakaran di stasiun bawah tanah/MRT terjadi.	
3	Jae Seong Roh, Hong Sun Ryou, Won Hee Park, Yong Jun Jang [31]	2009	Metode simulasi CFD	Efek dari instalasi pintu penahan dan sistem ventilasi terhadap keselamatan jiwa penumpang pada kebakaran yang terjadi di stasiun bawah tanah.	Skenario kebakaran yang ditetapkan pada literatur tidak mengikutsertakan variasi terhadap kapasitas sistem ventilasi

					ventilasi mekanik. (telah ditetapkan sebesar 3000m ³ /min)
4	YANG Gao – shang, AN Yong – lin, PENG Li – min, ZHANG Jin – hua [11]	2006	perangkat lunak CFD komersial PHOENIX 3.5	Efek dari ventilasi longitudinal pada distribusi temperatur dan konsentrasi asap pada kebakaran yang terjadi di terowongan. Pengamatan utama ditekankan terhadap pola penyebaran asap, karakteristik konsentrasi asap, dan distribusi temperatur pada kapasitas ventilasi longitudinal yang divariasikan	
5	Walton William D., Thomas Philip [20].	2002	Metode kalkulasi/ matematis	Laju massa gas keluar dan laju massa udara masuk ke dalam kompartemen untuk kondisi kebakaran sesudah flashover atau mendekati flashover, laju massa udara masuk dapat diestimasi melalui persamaan $\dot{m}_a = 0.5A_o\sqrt{H_o}$ dengan A_o yang adalah luas penampang bukaan. kalkulasi yang dapat digunakan untuk memprediksi temperatur pada saat fase sebelum dan sesudah flashover.	
				Waktu untuk klarifikasi kecelakaan kebakaran pada bangunan dengan penghuni yang berada pada kondisi sehat dan familiar dengan	

6	Maohua Zhong, Congling Shi, Xuwei Tu, Tairan Fu, Li Hei [32]	2008	Metode eksperimental	tempat tersebut adalah rata-rata kurang dari 60 detik. Dengan pengertian bahwa setelah satu menit, maka tindakan evakuasi dan pemadaman kebakaran sudah harus dilakukan. Sistem pembuangan asap yang merupakan alat pencegah bahaya asap hasil pembakaran dan diasumsikan harus diaktifkan secara manual akan aktif pada detik ke 60.	
7	Rapporteur Alfred Haack [33].	-	Metode eksperimental	<p>a. Kebakaran pada kompartemen Kaprun diprediksi sebesar 15–50 MW dengan mempertimbangkan material mampu bakar yang mungkin terdapat pada kereta serta ventilasi pada terowongan.</p> <p>b. 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.</p> <p>c. Dalam waktu 20 menit setelah kereta berhenti, laju produksi kalor maksimum pada kebakaran di kabin keempat tercapai. Dengan 30–45' setelah kereta berhenti, laju produksi kalor maksimum untuk kabin keempat dan kelima tercapai dan mencapai nilai sebesar 100 MW.</p>	

8.	Quintiere, James G [19]	2002	Metode eksperimental dan simulasi	Peninjauan terhadap pemodelan kebakaran dengan berdasarkan zona-zona yang terbentuk (akibat adanya kebakaran). 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.	Pembahasan yang tercantum pada pemodelan kebakaran di literatur tersebut, terbatas pada kompartemen sederhana dengan orientasi ventilasi/bukaan vertikal.
9.	C.G. Fan, J. Ji, Z.H. Gao, J.Y. Han, J.H. Sun. [3]	2013	Metode eksperimental	Studi eksperimen terhadap mode pengendapan (entrainment) udara dengan ventilasi alami vertikal dalam kebakaran kompartemen dimana efek cerobong mengimbas efek pencampuran yang kuat pada lapisan asap (panas) dan udara (dingin) dan tindakan untuk mencegah efek plug-holing yang terjadi akibat peningkatan kecepatan aliran asap sehingga asap dapat diekstraksi secara efektif.	Merekomendasikan untuk menggunakan ventilasi alami dalam pengendalian asap pada zona kebakaran
10.	Tong Yan, Shi MingHeng, Gong YanFeng, He JiaPeng [34]	2009	Metode eksperimental	Pengukuran pembakaran pada kondisi sebenarnya pada kompartemen jalan sepanjang 1410m dengan ventilasi alami diperoleh bahwa laju produksi kalor maksimum sekitar 5MW dicapai pada 4 menit setelah penyalaan dan kemudian menurun perlahan menuju nol setelah 24 menit. Maksimum temperatur keseluruhan di bawah langit-langit dibawah 100°C. Maksimum temperatur pada ketinggian aman lebih rendah dari 110°C pada jarak 3m dari sumber kebakaran.	Memberikan referensi kisaran nilai temperatur maksimum yang terjadi ketika kebakaran pada kondisi real.

Berdasarkan studi literatur yang telah dijelaskan, maka akan dilakukan fokus pengamatan pada manajemen asap kebakaran dengan menggunakan ventilasi *hybrid* (alami dan mekanik) untuk melihat perbandingan efektivitas pengendalian asap, distribusi temperatur dan prediksi temperatur maksimum yang terjadi pada zona *platform*.

2.4 Penerapan Sistem Ventilasi *Hybrid* untuk Transportasi Bawah Tanah

Ventilasi *hybrid* merupakan jenis sistem pengaturan udara dengan mengombinasikan ventilasi mekanik dan ventilasi alami. Ventilasi *hybrid* menjadi pertimbangan dalam upaya konservasi energi dalam bangunan untuk meminimalkan penggunaan energi untuk kebutuhan sistem tata udara [35]. Selain itu, ventilasi *hybrid* juga dapat menjadi sistem pengaturan pencahayaan ruangan yang alami di siang hari dengan memanfaatkan struktur ventilasi alami berbasis *stack ventilation*. Pada penelitian tentang ventilasi *hybrid* oleh Heiselberg [35] bahwa perancangan ventilasi *hybrid* maupun alami sangat terpaud oleh desain ruangan, proses laju alir udara, besaran bukaan ventilasi yang sangat bergantung pada variabel rata-rata iklim, tekanan udara, dan karakteristik gerakan angin di daerah tersebut. Ventilasi *hybrid* mempunyai efektivitas yang tinggi dalam mengondisikan udara dalam ruangan dan mendukung sistem ventilasi yang sehat [36]. Prinsip inilah yang akan dilakukan untuk pengendalian asap kebakaran dalam Stasiun Metro Bawah Tanah.

Dalam mengupayakan sistem ventilasi yang baik, diperlukan sistem pertukaran seluruh udara ruangan dengan udara segar dari luar setiap jamnya atau disebut sebagai *air change rate per hour* (ACH). Keefektifan tingkat penghawaan dalam suatu bangunan ditentukan oleh *ventilation flow rates* (laju ventilasi) yang dihitung sebagai jumlah udara setiap m³ yang dapat dialirkan ke dalam bangunan atau ruangan setiap jamnya [37]. Perlu dipertimbangkan kriteria kenyamanan berbasis ventilasi tidak selalu terjadi setiap waktu. Laju pergantian udara juga harus mempertimbangkan persyaratan ventilasi berdasarkan konstruksi bangunan (*shade*, arah pencahayaan, kaca, beban kalor radiasi, konveksi dan konduksi), kebutuhan

beban kalor/pendinginan, kondisi lingkungan bangunan. Semakin baik dan efektif konstruksi bangunan, akan menurunkan kebutuhan beban pendinginan sehingga kebutuhan laju pergantian udara dapat diperkecil [38].

Laju pergantian udara setiap jam (*ACH*) berbeda-beda untuk setiap bangunan yang dapat dilihat pada lampiran I. Untuk kebutuhan ruang bawah tanah, digunakan nilai *ACH* 5-10 [38]. Nilai *ACH* dapat dihitung dengan persamaan (2.18) [37]:

$$ACH = \frac{Q}{V} \cdot 3600, \quad \text{dengan } Q = Av \cdot 0,025 \quad (2.18)$$

2.4.1 Sistem Ventilasi Mekanik

Sistem ventilasi ini biasa digunakan dalam aplikasi tata udara dalam gedung yang berbasis *fan* dengan mengatur laju alirnya. Sistem ini membutuhkan saluran akting/saluran untuk mengalirkan udara ke dalam/ke luar ruangan. Saat ini, mulai dikembangkan inovasi terkait sistem ventilasi dengan tekanan rendah dengan *fan* yang memiliki efisiensi tinggi. Penggunaan energi terbarukan dalam penghematan energi untuk ventilasi memainkan peranan penting di dalamnya [39]. Sistem ventilasi mekanik memiliki kemampuan mengeluarkan asap kebakaran dan mengendalikan 80% panas ruangan, mengurangi konsentrasi asap dan temperatur dalam ruangan dengan baik [39].

Penggunaan ventilasi mekanik dalam mengendalikan asap kebakaran akan mengurangi ketinggian lapisan asap. Ketinggian lapisan asap dengan laju pembuangan asap berbasis ventilasi mekanik terhadap perubahan waktu dalam kompartemen dapat dirumuskan [40]:

$$-\frac{dz}{dt} = 0.071 \frac{\dot{Q}_{conv}^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}}{A \rho_s} + 0.0081 \frac{\dot{Q}_{conv}}{A \rho_s} - \frac{V_s}{A} \quad (2.19)$$

Untuk keadaan tunak, laju asap harus sama dengan ketinggian laju pengendapan cendawan, sehingga kita membuat $dz/dt = 0$ [40] sehingga persamaan (2.5) menjadi:

$$V_s = 0.071 \frac{\dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}}{\rho_s} + 0.0081 \frac{\dot{Q}_c}{\rho_s} \quad (2.20)$$

Batas level aman ketinggian lapisan asap menurut NFPA-92B [41] dihitung dengan persamaan (2.21):

$$z' = 1,6 + 0,1.H \quad (2.21)$$

Dengan demikian, laju volumetrik sistem pembuangan asap menurut NFPA-92B diberikan persamaan (2.22) [40]:

$$V'_s = 0.059 \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} (1,6 + 0,1H)^{5/3} + 0.0043 \dot{Q}_c \quad (2.22)$$

Waktu aktivasi ventilasi mekanik juga diperhitungkan dimana lapisan asap tidak boleh turun pada ketinggian tertentu yang dapat membahayakan manusia relatif terhadap kecepatan produksi asap. NFPA 92B [41] memberikan persamaan bahwa ventilasi mekanik harus diaktifkan menurut persamaan [2.23]

$$\left[\frac{\left(\frac{A}{H^2} \right)}{Q^{\frac{1}{3}}} \right] e^{\frac{0.11H + d_c}{0.28H}} \leq t_0 \leq \left[\frac{\left(\frac{A}{H^2} \right)}{Q^{\frac{1}{3}}} \right] e^{\frac{1.01H - 1.6}{0.28H}} \quad (2.23)$$

$$\text{dengan } d_c = \left[\frac{V_s}{(g\Delta T/T_0)^{1/2} F_c} \right]^{2/5}, F_c = 1.1 - 1.5$$

Untuk mengatur laju volumetrik (debit) ventilasi mekanik dalam studi ini dirancang dengan *orificemeter* berdasarkan standar ISO 5067-II [42] dituliskan pada persamaan (2.24)

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \text{ dengan } \dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \cdot \frac{1}{4} \pi d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_i} \quad (2.24)$$

2.4.2 Sistem Ventilasi Alami

Ventilasi alami berbasis *stack ventilation* melalui bukaan atrium dengan memanfaatkan efek cerobong untuk menarik dan membuang sisa pembakaran. Prinsip kerja ventilasi alami adalah efek ventilasi alami vertikal yang dihasilkan dari perbedaan temperatur antara asap panas dalam ventilasi alami vertikal dan temperatur lingkungan [13,35,43]. Pengaruh utamanya bergantung pada ketinggian

bukaan, perbedaan tekanan, dan perbedaan densitas antara asap dengan temperatur lingkungan. Ketika terjadi aliran dalam ventilasi cerobong, kecepatan akan timbul karena perbedaan massa jenis akibat perbedaan temperatur antara dalam ventilasi alami dengan lingkungan [35]. Udara yang lebih panas memiliki massa jenis yang lebih ringan dan akan naik dan tertarik ke dalam cerobong. Hal ini yang menimbulkan kecepatan karena konveksi alami. Persamaan kecepatan akibat ventilasi alami [43] terdapat pada persamaan (2.25).

$$Q = C A \sqrt{gh \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (2.25)$$

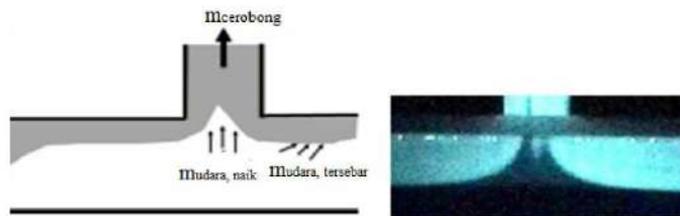
Sedangkan, tekanan ideal aliran yang terjadi dalam cerobong didefinisikan oleh Hukum Bernoulli [43], yaitu pada persamaan (2.26).

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.26)$$

Dimana titik 1 adalah *inlet* dan 2 adalah *outlet* ventilasi alami. Meskipun digunakan sistem terbuka, nilai tekanan absolut titik 1 dan 2 berbeda nilai karena terdapat perbedaan temperatur dan tekanan yang menyebabkan aliran ke titik 2. Nilai perbedaan tekanan yang dihasilkan antara kedua titik [43] diberikan persamaan (2.27)

$$\Delta P_{ideal} = (\rho_o - \rho_i)gh + \frac{1}{2} \rho_i v^2 \quad (2.27)$$

Asap yang cenderung memiliki temperatur lebih tinggi akan menghasilkan efek ventilasi alami yang sangat kuat [3]. Akan tetapi, ketika kecepatan pelepasan mencapai batas yang relatif tinggi, udara dalam kompartemen akan terisap ke dalam ventilasi alami dari penurunan lapisan asap di dalam kompartemen karena efek *plug-holing* [3]. Fenomena *plus-holing* dalam ventilasi alami dijelaskan pada gambar 2.7 [3].



Gambar 2.7 Fenomena *plug-holing* dalam ventilasi alami [3].

Plug-holing adalah fenomena dimana udara yang berada di bawah lapisan asap tertarik ke dalam lapisan asap dan masuk ke dalam sistem pembuangan asap (*exhaust*). *Plug-holing* menyebabkan kegagalan sistem, tetapi fenomena ini dapat dengan mudah dicegah. *Plug-holing* akan mengurangi pembuangan asap dari lapisan asap sehingga lapisan asap akan cenderung turun dan akan mengganggu penghuni di dalamnya [72].

Fenomena *plug-holing* dapat dicegah dengan menerapkan sistem pembuangan asap melalui ventilasi mekanik dengan kondisi tunak/*steady*. Gambar 2.8 menerangkan ketinggian lapisan asap pada *ceiling* yang mengalami penurunan akibat *plug-holing*. Karena ketinggian lapisan asap meningkat, gaya apung lapisan asap akan meningkat sehingga akan mengurangi efek *plug-holing*. Pada akhirnya, lapisan asap menjadi cukup tebal dimana seharusnya kondisi seimbang dicapai pada ketinggian lapisan asap yang tetap sehingga dihasilkan *plug-holing* pada lapisan asap di bawah dari apa yang diharapkan [72].

Gaya utama yang bekerja ketika terjadi *plug-holing* adalah gaya kinetik sistem pembuangan (*fan*) dan gaya apung lapisan asap. Ketika gaya kinetik dominan, fenomena *plug-holing* akan terjadi, dan sebaliknya ketika gaya apung yang dominan maka tidak akan terjadi *plug-holing*. Gaya kinetik bergantung pada laju volumetrik sistem pembuangan asap, sedangkan gaya apung bergantung pada temperatur dan ketinggian lapisan asap. Ketika gaya-gaya ini seimbang pada sisi masuk sistem pembuangan, aliran pada sisi masuk akan mencapai maksimum tanpa terjadinya *plug-holing*. *Plug-holing* dapat dicegah dengan menggunakan sejumlah pembuangan asap sehingga laju aliran pada setiap sisi masuk berada di bawah atau pada kondisi maksimum [43, 72]. Untuk laju aliran massa dalam ventilasi alami vertikal ditunjukkan oleh persamaan (2.28) [3].

$$\dot{m}_{\text{cerobong}} = \dot{m}_{\text{udara, naik}} + \dot{m}_{\text{udara, yang tertahan dan tidak terbuang}} \quad (2.28)$$

Konsentrasi gas CO yang diukur dalam asap di bawah *ceiling* kompartemen dan di dalam cerobong dapat menyatakan tingkat pasokan udara. Konsentrasi CO yang lebih

tinggi pada bagian atas cerobong mengindikasikan efektivitas pembuangan asap yang lebih baik [3] yang ditunjukkan pada persamaan (2.29), (2.30) dan (2.31) [3].

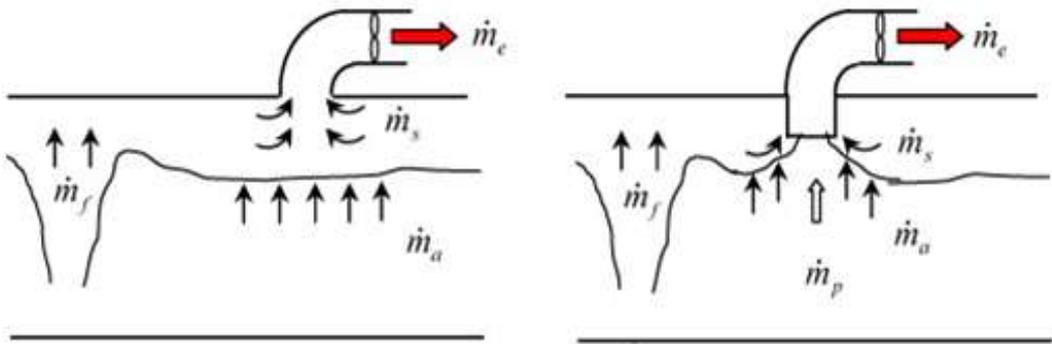
$$\dot{m}_{cerobong} \frac{CO_{cerobong}}{CO_{kompartemen}} = \dot{m}_{s,cerobong} \quad (2.29)$$

atau

$$\dot{m}_{cerobong} \left(1 - \frac{CO_{cerobong}}{CO_{kompartemen}}\right) = \dot{m}_{a,cerobong} \quad (2.30)$$

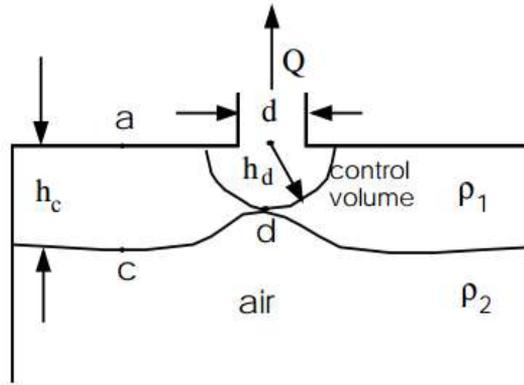
dengan

$$\dot{m}_{cerobong} = \rho_s u_s A \text{ dimana } \rho_s = \frac{P_a}{T_s} T_a \quad (2.31)$$



Gambar 2.8 Fenomena *plug-holing* pada ventilasi paksa [3]

Efek *plug-holing* dapat dicegah dengan menjaga laju aliran volumetrik dan rasio ketinggian lapisan asap terhadap sisi masuk tidak mencapai batas kritis [44]. Persamaan empiris untuk mencapai aliran pembuangan dalam kondisi maksimum tanpa terjadinya *plug-holing* ditunjukkan pada persamaan (2.32) dan (2.33) [44] dan dijelaskan pada gambar 2.9 [44].



Gambar 2.9 Skematik upaya pencegahan efek *plug-holing* [44]

$$\frac{h_c}{d} = 0.69 \left[\frac{2\pi u h_d^2}{(1 - \frac{\rho_s}{\rho_a}) g d^5} \right]^{0.2} \quad (2.32)$$

$$Q_c = 2.2 \left[g h_s \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \right]^{0.2} \quad (2.33)$$

Dengan h_s dan ρ_s masing-masing adalah ketinggian lapisan asap dan massa jenis asap.

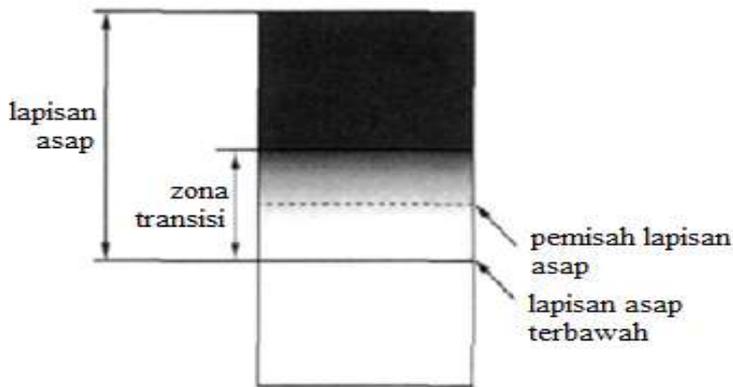
2.5 Produksi dan Pengukuran Opasitas Asap pada Zona Kebakaran

2.5.1 Produksi Asap Kebakaran

Penghitungan ketersediaan waktu evakuasi aman (T_{ASET}) dan waktu evakuasi aman yang diperlukan (T_{RSET}) digunakan sebagai standar untuk menentukan apakah orang-orang di gedung ketika kebakaran dapat terevakuasi. Orang-orang di gedung ketika kebakaran dapat terevakuasi jika T_{ASET} lebih lama dari pada T_{RSET} . Jika T_{ASET} lebih pendek dari T_{RSET} maka orang-orang tidak dapat terevakuasi [45]. Sebagai contoh untuk kebakaran skala besar, durasi T_{ASET} biasanya ketika lapisan asap turun hingga dua meter di atas permukaan (mungkin ada ketentuan yang berbeda untuk berbagai fungsi bangunan) karena suhu asap relatif rendah dan dampak dari radiasi termal ketika evakuasi biasanya diabaikan. Jadi, pengukuran yang akurat dari lapisan asap

adalah sangat penting untuk proses evakuasi ketika kebakaran dalam ruang yang besar.

Ketika kebakaran terjadi, asap naik untuk membentuk kumpulan/cendawan akibat pengaruh gaya apung. Cendawan asap ketika mencapai *ceiling*, akan berbalik dan menyebar secara horizontal di bawah *ceiling*. Cendawan asap akan terus berkembang dan akan membentuk dua zona, lapisan asap kebakaran di atas dan udara yang lebih dingin berada di lapisan bawah [45]. Antara lapisan asap terbawah dengan lapisan asap terdapat lapisan asap pemisah (*smoke layer interface*). Lapisan asap pemisah ini berada pada zona transisi antara lapisan asap dengan lapisan asap terbawah seperti pada gambar 2.10 [45]. Lapisan asap pemisah inilah yang menjadi prediksi keberadaan lapisan asap dalam suatu kompartemen. Studi terkait lapisan asap pemisah ini tidak menjadi fokus pembahasan, akan tetapi perlu untuk diketahui.



Gambar 2.10 Lapisan Asap dan Prediksi Lapisan Asap [45]

Pergerakan asap bermula asap kebakaran naik akibat gaya apung dan berkumpul di bawah *ceiling* membentuk cendawan. Kemudian, asap akan menyebar horizontal dan akan turun ketika perbedaan densitas semakin kecil, NFPA-92B[41] merumuskan ketinggian lapisan asap pada kompartemen kebakaran dalam kondisi tunak terhadap ketinggian *ceiling*, diperoleh persamaan (2.34):

$$\frac{z}{H} = 1.11 - 0.28 \ln \left[\frac{t \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} H^{-\frac{4}{3}}}{A} \right], 0.2 \leq \frac{z}{H} \leq 1.0 \text{ dan } 0.9 \leq \frac{A}{H^2} \leq 14 \quad (2.34)$$

Sementara itu, waktu pemenuhan asap kondisi tunak [41] diperoleh persamaan (2.35)

$$t = \frac{A}{H^2} \frac{H^{\frac{4}{3}}}{Q_c^{\frac{1}{3}}} \exp \left[\frac{1}{0.28} \left(1.11 - \frac{z}{H} \right) \right] \quad (2.35)$$

Dalam ruangan kapasitas besar dengan *ceiling* yang tinggi, waktu yang diperlukan untuk membentuk lapisan asap mungkin sangat lama. Waktu untuk mencapai lapisan asap diawali dengan fenomena produksi dan penyebaran asap. Waktu produksi asap terus terjadi hingga sistem pembuangan asap diaktifkan.

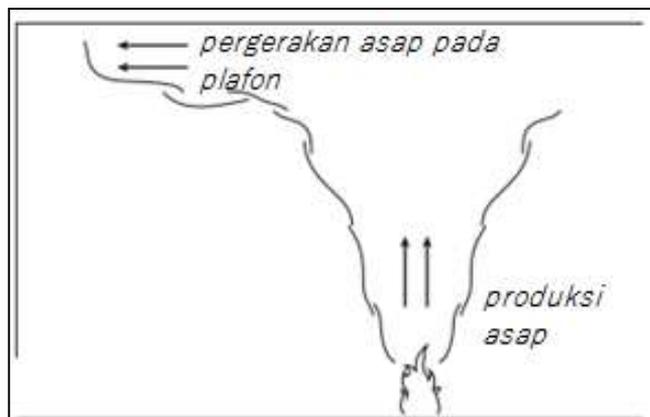
Proses pergerakan asap terdiri atas waktu asap naik kemudian mencapai langit-langit dan waktu asap untuk bergerak menyebar di sekitar plafon seperti yang terlihat pada gambar 2.11 [46]. Korelasi waktu produksi asap dan waktu pergerakan asap pada plafon untuk kondisi tunak adalah:

waktu produksi asap [46] diberikan pada persamaan (2.36):

$$t_{pi} = 0.67 \frac{H^{4/3}}{Q^{1/3}} \quad (2.36)$$

dan waktu pergerakan asap pada plafon [46] diberikan pada persamaan (2.37):

$$t_{pi} = \frac{r^{11/6}}{1.2 Q^{1/3} H^{1/2}} \quad (2.37)$$



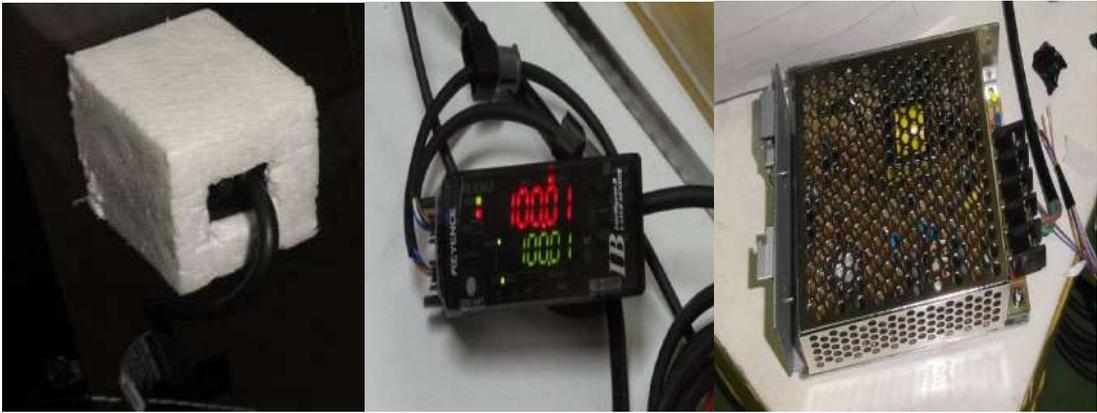
Gambar 2.11 Fenomena pergerakan asap [46]

Efek dari asap yang diproduksi oleh api tergantung pada jumlah dan sifat asap yang dihasilkan. Berdasarkan literatur [47], asap yang dihasilkan dari pembakaran yang menghasilkan nyala api cenderung memiliki elemen karbon (grafit) 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* (pembakaran dengan nyala api), pirolisis, dan *smoldering* (bara). Pembakaran *flaming* cenderung menghasilkan asap yang memiliki lebih banyak elemen karbon. Sedangkan pada pirolisis, pembakaran terjadi dikarenakan adanya fluks kalor eksternal yang meningkatkan temperatur pada permukaan bahan bakar. Pada kasus pembakaran membara (*smoldering*), droplet asap juga terbentuk dan mempunyai tipikal temperatur antara 600 sampai 1100 K. Kondisi-kondisi pembakaran ini meliputi pengukuran pada rentang fluks radiasi tertentu, konsentrasi oksigen, orientasi benda uji, dan temperatur lingkungan.

2.5.2 Pengukuran Opasitas Asap

Dalam pengukuran partikulat asap dari suatu material terbakar dapat dilakukan dengan beberapa metode [47], yaitu salah satunya dengan mengumpulkan asap pada volume yang sudah diketahui dan menentukan *optical density* dari asap tersebut. Pengukuran *optical density* dilakukan dengan cara mengukur intensitas cahaya dari suatu *beam* yang diakibatkan oleh partikel asap yang melewati *beam* tersebut. Mekanisme pengukuran dengan *beam of light* dalam penelitian ini dapat ditunjukkan melalui gambar 2.12.



Gambar 2.12 *Beam of light* dengan *amplifier* untuk mengukur *optical density* dalam penelitian.

Sensor *beam of light* mulai bekerja dengan menembakkan intensitas cahaya melalui *light source* kemudian diterima oleh *receiver (photo cell)* yang terbaca sebagai I_0 . Pada saat asap mulai melewati sinar sensor *beam*, maka terdapat nilai intensitas terukur yang teridentifikasi sebagai I_x , yaitu intensitas yang berkurang dari intensitas awal. Hubungan kedua nilai intensitas I_0 dan I_x ini dapat dijelaskan melalui Bouger's Law [47] ditunjukkan pada persamaan (2.38)

$$I_x = I_0 \exp(-KL) \quad (2.38)$$

Dimana K adalah nilai koefisien absorpsi dengan satuan m^{-1} dan L adalah jarak sumber cahaya dan *photo cell*. Untuk nilai *optical density* [47] memiliki satuan (1/m) yang dapat menggunakan persamaan (2.39):

$$OD = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_x} \right) = KL = 1/L \cdot \ln (I_0/I_x) \quad (2.39)$$

Besarnya nilai transmisi cahaya yang diperoleh dari perbandingan intensitas asap yang terukur dan intensitas awal [47] dapat menggunakan persamaan (2.40)

$$T = \frac{I_x}{I_0} = 1 - \frac{N}{100} \quad (2.40)$$

Dimana T adalah besar nilai transmisi cahaya yang diterima oleh *photo cell* dalam satuan persentase (%) dan N adalah persentase opasitas yang terukur pada *photo cell* (%).

Pengukuran densitas optik sebenarnya ditujukan untuk menunjukkan nilai visibilitas/jarak pandang akibat asap kebakaran. Visibilitas diutamakan untuk melihat tanda-tanda memancarkan cahaya menuju pintu eksit. Untuk menghitung visibilitas [48] dengan menggunakan nilai OD (densitas optik) diberikan pada persamaan (2.41) dan (2.42)

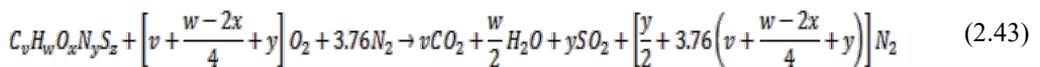
$$V = (5 \infty 10)/OD \text{ untuk tanda yang memancarkan cahaya (2.41)}$$

$$V = (2 \infty 4)/OD \text{ untuk tanda yang memantulkan cahaya (2.42)}$$

dengan nilai OD pada persamaan (2.39).

2.6 Laju Produksi Kalor (HRR) dan Kolam Api (*Pool Fire*)

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 2.43 [52], contoh reaksi pembakaran dengan udara pada kondisi stoikiometri, 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 1cm dan disertai penyebaran fisiknya yang dibatasi oleh suatu wadah tertentu. Misalnya pembakaran bahan bakar cair yang terdapat pada tangki, 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 (δ) untuk *spill fire* diperlukan. Penjelasan empiris yang mendetail, mengenai *spill fire* dan *pool fire*, dapat dilihat pada penjelasan Babrauskas Vytenis (2002) [50].

Ukuran dari api dapat direpresentasikan oleh besarnya laju produksi kalor atau *heat release rate* (HRR)[50]. Dapat diperhatikan pada persamaan 2.44, bahwa HRR (\dot{Q}) tergantung pada besar laju pembakaran massa (\dot{m}) dan entalpi pembakaran (Δh_c). Dengan \dot{m} yang dapat juga diekspresikan berdasarkan persamaan 2.45-b, dimana \dot{m}'' , \dot{y} , dan ρ adalah luas penampang api, laju pembakaran massa per satuan luas, laju regresi pembakaran bahan bakar, dan densitas bahan bakar.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (2.44)$$

Berdasarkan literatur [50,51] disebutkan bahwa \dot{m}'' , \dot{y} , dan Δh_c sampai saat ini merupakan parameter berbasis empiris. Laju regresi bahan bakar adalah laju permukaan bahan bakar menurun pada arah vertikal pada saat pembakaran terjadi. Dapat diperhatikan laju regresi dan normalisasi tinggi api untuk beberapa bahan bakar berdasarkan diameter wadah bahan bakar. Laju regresi sangat bervariasi (namun memiliki pola yang sama) untuk diameter wadah kurang dari 1m. Namun, untuk diameter yang lebih besar dari pada 1m, laju regresi cenderung untuk menuju nilai konstan, \dot{y}_{max} . Zebetakis dan Burgess (1961) [49, 50], mengemukakan 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 2.45-a.

$$\dot{m} = \dot{m}''_{max} [1 - \exp(-k\beta D)] A \quad (2.45 - a)$$

$$\dot{m} = A \cdot \dot{y} \cdot \rho \quad (2.45 - b)$$

Nilai $k\beta$ dan \dot{m}''_{max} , yaitu konstanta empiris bahan bakar, laju massa pembakaran disesuaikan dengan karakteristik bahan bakar yang digunakan dalam pembakaran *pool fire* yang terdapat pada tabel 2.3 [50-pg.3-26]. Sedangkan jika wadah bahan bakar tidak berbentuk lingkaran, maka diameter efektif dapat digunakan untuk menghitung laju massa pembakaran pada persamaan (2.45). Dimana diameter efektif [49] diekspresikan oleh persamaan (2.46). Dengan A dan D adalah luas penampang wadah bahan bakar dan diameter efektif, secara berurutan.

$$D = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.46)$$

Seperti yang telah disampaikan sebelumnya, 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 2.25 untuk $0.2 \text{ m} < D < 1 \text{ m}$) selama bahan bakar mengalami reaksi oksidasi.

Tabel 2.3 Termokimia dan konstanta empiris untuk beberapa bahan bakar hidrokarbon cair [50].

Material	Density (kg/m ³)	Δh_g (kJ/kg ⁻¹)	Δh_c (MJ/kg ⁻¹)	\dot{m}'' (kg/m ² s ⁻¹)	k (m ⁻¹)
Cryogenics					
Liquid H ₂	70	442	120.0	0.017 (± 0.001)	6.1 (± 0.4)
LNG (most CH ₄)	415	619	50.0	0.078 (± 0.018)	1.1 (± 0.8)
LPG (mostly C ₃ H ₈)	585	426	46.0	0.099 (± 0.009)	1.4 (± 0.5)
Alcohols					
Methanol (CH ₃ OH)	796	1195	20.0	See text	See text
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	794	891	26.8	See text	See text
Simple organic fuels					
Butane (C ₄ H ₁₀)	573	362	45.7	0.078 (± 0.003)	2.7 (± 0.3)
Benzene (C ₆ H ₆)	874	484	40.1	0.085 (± 0.002)	2.7 (± 0.3)
Hexane (C ₆ H ₁₄)	650	433	44.7	0.074 (± 0.005)	1.9 (± 0.4)
Heptane (C ₇ H ₁₆)	675	448	44.6	0.101 (± 0.009)	1.1 (± 0.3)
Xylenes (C ₈ H ₁₀)	870	543	40.8	0.090 (± 0.007)	1.4 (± 0.3)
Acetone (C ₃ H ₆ O)	791	668	25.8	0.041 (± 0.003)	1.9 (± 0.3)
Dioxane (C ₄ H ₈ O ₂)	1035	552	26.2	0.018	5.4
Diethyl ether (C ₄ H ₁₀ O)	714	382	34.2	0.085 (± 0.018)	0.7 (± 0.3)
Petroleum products					
Benzine	740	—	44.7	0.048 (± 0.002)	3.6 (± 0.4)
Gasoline	740	330	43.7	0.055 (± 0.002)	2.1 (± 0.3)
Kerosene	820	670	43.2	0.039 (± 0.003)	3.5 (± 0.8)
JP-4	760	—	43.5	0.051 (± 0.002)	3.6 (± 0.1)
JP-5	810	700	43.0	0.054 (± 0.002)	1.6 (± 0.3)
Transformer oil, hydrocarbon	760	—	46.4	0.039	0.7
Fuel oil, heavy	940–1,000	—	39.7	0.035 (± 0.003)	1.7 (± 0.6)
Crude oil	830–880	—	42.5–42.7	0.022–0.045	2.8 (± 0.4)
Solids					
Polydimethylmethacrylate	1184	1611	24.9	0.020 (± 0.002)	3.3 (± 0.8)
Polyoxymethylene (CH ₂ O) _n	1425	2430	15.7		
Polypropylene (C ₃ H ₆) _n	905	2030	43.2		
Polystyrene (C ₈ H ₈) _n	1050	1720	39.7		

Hal ini seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.47) dimana waktu pembakaran (t_b) [49] tergantung pada volume bahan bakar (V), densitas (ρ), laju pembakaran massa (\dot{m}''), dan luas penampang wadah (A).

$$t_b = \frac{V\rho}{\dot{m}''A} \quad (2.47)$$

Sementara itu, tinggi nyala *pool fire* [49] juga bergantung pada laju produksi kalor yang dihasilkan dan diameter bahan bakar. Hal ini sesuai dengan metode Heskestad [52] dalam mengestimasi tinggi nyala *pool fire* dengan pendekatan yang dinyatakan dalam persamaan (2.48):

$$L_f = 0.23\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2.48)$$

2.7 Analisis Dimensional dan Keserupaan

Untuk sebuah perbandingan antara hasil data yang diperoleh dari model dan eksperimen, perlu dilakukan analisis dimensional agar perbandingan yang dilakukan menghasilkan perbandingan yang cukup ideal menggunakan analisis dimensional. Model eksperimen dengan skala yang tertentu terhadap skala riil perlu didesain untuk menyerupai sifat skala sesungguhnya beberapa parameter fisik dan termal yang ingin diketahui.

Penurunan persamaan-persamaan pada tabel 2.5 dapat dilihat pada referensi [19] menggunakan konsep hukum Froude. Pengujian berbasis pemodelan Froude berlaku untuk kondisi tekanan atmosferik. Pemodelan Froude tidak menjaga Bilangan Reynolds. Namun, sesuai pemilihan ukuran model harus memenuhi aliran berkembang penuh. Selain itu, pemodelan Froude tidak menjaga parameter nondimensi terkait perpindahan kalor karena parameter temperatur antara pemodelan dan skala riil tidak berubah. Pemodelan Froude tidak menerapkan lokasi temperatur tinggi dan lokasi Reynolds rendah (dekat api). Akan tetapi pemodelan ini berguna dalam menentukan informasi penyebaran asap kebakaran [54]. Hukum Froude diturunkan dari hubungan ketika gaya gravitasi yang dominan bekerja pada skala riil dan pemodelan. Rasio gaya [53] yang bekerja menjadi:

$$\begin{aligned} \left[\frac{(F_i)}{(F_g)} \right]_m &= \left[\frac{(F_i)}{(F_g)} \right]_p \\ \left[\frac{(F_i)}{(F_v)} \right] &= \frac{\rho \cdot l^2 \cdot v^2}{\rho \cdot l^3 \cdot v^2} = \frac{v^2}{g \cdot l} \\ \left[\frac{v^2}{g \cdot l} \right]_m &= \left[\frac{v^2}{g \cdot l} \right]_p \\ \text{sehingga} \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_m &= \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_p \end{aligned} \quad (2.49)$$

Dimana m = skala riil dan p = skala pemodelan. Nilai $\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}}$ pada persamaan (2.49) disebut juga sebagai bilangan Froude.

Bilangan Froude skala riil sama dengan bilangan Froude untuk pemodelan. Didasarkan pada persamaan, kita dapat menentukan faktor skala dari perbandingan beberapa keperluan. Misalkan kita perlukan skala faktor untuk panjang adalah n , maka $l_p/l_m = n$. Berikut adalah penurunan untuk beberapa faktor skala untuk parameter kecepatan, waktu dan debit berdasarkan persamaan (2.49):

a. Faktor skala untuk kecepatan

$$\begin{aligned} \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_m &= \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_p \\ \left[\frac{v_p}{v_m} \right] &= \left[\frac{\sqrt{g \cdot l_p}}{\sqrt{g \cdot l_m}} \right] = \left[\frac{l_p^{0.5}}{l_m^{0.5}} \right] = \left[\frac{l_p}{l_m} \right]^{0.5} \\ \text{sehingga} \left[\frac{v_p}{v_m} \right] &= n^{0.5} \end{aligned}$$

b. Faktor skala untuk debit/laju aliran volumetrik [53]

$$\begin{aligned} \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_m &= \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_p \\ \left[\frac{Q_p}{Q_m} \right] &= \left[\frac{A_p \cdot v_p}{A_m \cdot v_m} \right] = \frac{l_p^2}{l_m^2} \cdot \left[\frac{l_p}{l_m} \right]^{0.5} \\ \text{sehingga} \left[\frac{Q_p}{Q_m} \right] &= n^2 \cdot n^{0.5} = n^{2.5} \end{aligned}$$

c. Faktor skala untuk waktu [53]

$$\left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_m = \left[\frac{v^2}{\sqrt{g \cdot l}} \right]_p$$

$$\left[\frac{T_p}{T_m} \right] = \left[\frac{l_p/v_p}{l_m/v_m} \right] = \left[\frac{l_p/l_m}{v_p/v_m} \right] = \left[\frac{\pi}{\pi^{0.5}} \right]$$

sehingga $\left[\frac{T_p}{T_m} \right] = \pi^{0.5}$

Berdasarkan penurunan rumus di atas, untuk berbagai macam karakteristik pemodelan eksperimen dapat dirumuskan melalui tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Analisis dimensional dan keserupaan [53-55]

Variabel	Perbandingan Keserupaan	Referensi
Laju Produksi Kalor	$\dot{Q}_F = \dot{Q}_M \left(L_F/L_M \right)^{5/2}$	[53-55]
Geometrik Bangun	$x_F = x_M \left(L_F/L_M \right)^1$	
Temperatur	$T_F = T_M$	
Tekanan	$\Delta p_F = \Delta p_M \left(L_F/L_M \right)^1$	
Kecepatan	$v_F = v_M \left(L_F/L_M \right)^{1/2}$	
Tebal Dinding	$\delta_F = \delta_M \left(L_F/L_M \right)^{1/4}$	
Material	$k_F = k_M \left(L_F/L_M \right)^{1/4} ; \rho_F = \rho_M \left(L_F/L_M \right)^{1/4}$	
Waktu	$t_F = t_M \left(L_F/L_M \right)^{1/2}$	
Laju Volumetrik	$\dot{V}_F = \dot{V}_M \left(L_F/L_M \right)^{5/2}$	
Sifat Termal	$(k\rho c_p)_F = (k\rho c_p)_M \left(L_F/L_M \right)^{0.9}$	

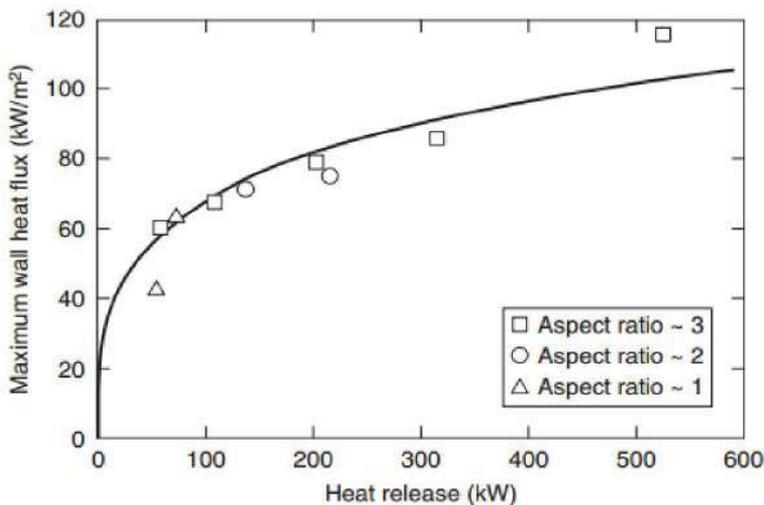
Keterangan : Indeks F dan M, masing - masing, relevan dengan riil dan model.

2.8 Fluks Kalor dan Perpindahan Kalor Konveksi dalam Kebakaran Kompartemen

Fluks kalor dihasilkan oleh api ke permukaan yang berada di sekitar lokasi kebakaran. Beberapa persamaan empiris [56] untuk berbagai geometri permukaan dan kondisi api. Back et. al. [56] menjelaskan fluks kalor maksimum, q''_{peak} ($\frac{kW}{m^2}$), pada dinding dengan geometri dimana api berdekatan dengan dinding dapat diekspresikan pada persamaan (2.50) dengan \dot{Q} adalah HRR api (kW).

$$q''_{peak} = 200 \left[1 - \exp \left(-0.09 \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \right) \right] \quad (2.50)$$

Persamaan (2.50) didasari oleh distribusi fluks kalor untuk nilai HRR kebakaran 50kW sampai 520kW yang dapat dilihat pada gambar 2.13. Fluks kalor 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 [52], L_f tergantung kepada diameter api, D (m) dan HRR, \dot{Q} (kW), seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.51).



Gambar 2.13. Fluks kalor maksimum pada dinding berdasarkan Back et.al. [56]

$$L_f = 0.23 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2.51)$$

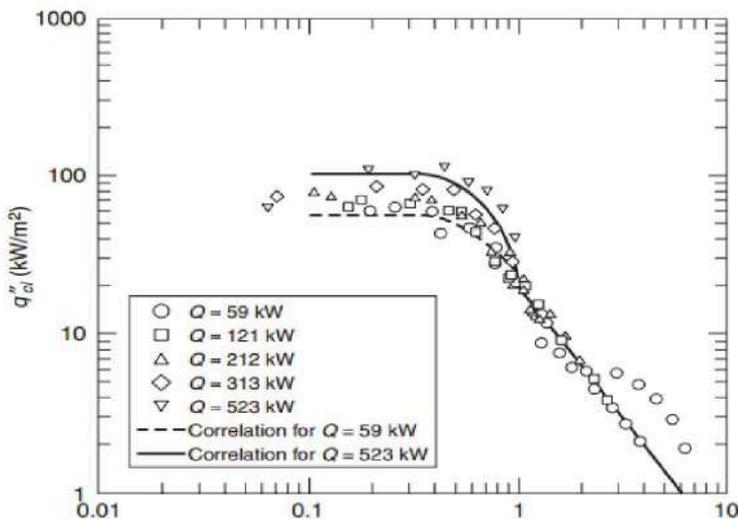
Berdasarkan gambar 2.14, fluks kalor pada garis tengah api bervariasi dan memiliki nilai yang akan semakin kecil pada saat $z/L_f > 0.4$. Hal ini direpresentasikan pada persamaan (2.52)-(2.54). Dengan q''_{cl} yang adalah fluks kalor pada garis tengah api.

$$q''_{cl} = q''_{pseak} \quad z/L_f \leq 0.4 \quad (2.52)$$

$$q''_{cl} = q''_{pseak} - \frac{5}{3} \left(\frac{z}{L_f} - \frac{2}{5} \right) (q''_{pseak} - 20) \quad 0.4 < z/L_f \leq 1 \quad (2.53)$$

$$q''_{cl} = 20 \left(\frac{z}{L_f} \right)^{-5/3} \quad \frac{z}{L_f} > 1 \quad (2.54)$$

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. [56], yang ditunjukkan pada gambar 2.15. Persamaan empiris tersebut dapat diperhatikan pada persamaan (2.55) dan (2.56). Dengan q'' adalah fluks kalor pada jarak horizontal dari api (x) berdasarkan q''_{cl} pada z/L_f tertentu persamaan (2.52)-(2.56).



Gambar 2.14 Fluks kalor dalam arah vertikal pada garis tengah api [56]

$$q'' = q''_{cl} \exp \left[- \left(\frac{x}{0.5D} \right)^2 \right] \quad \frac{x}{0.5D} \leq 1 \quad (2.55)$$

$$q'' = 0.38 q''_{cl} \left(\frac{x}{0.5D} \right)^{-1.7} \quad \frac{x}{0.5D} > 1 \quad (2.56)$$

Persamaan empiris untuk mengestimasi fluks kalor pada atap tidak mampu bakar berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Hasemi et. al [56] dengan HRR yang digunakan pada eksperimen diperkirakan sebesar 400 kW. Persamaan fluks kalor api relevan terhadap atap dapat diperhatikan pada persamaan (2.57).

$$q'' = 518.8 e^{-3.7w} \quad (2.57-a)$$

dengan,

$$w = (r + H + z') / (L_H + H + z') \quad (2.57-b)$$

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, $L_f = 3.5 Q_D^{0.4} \cdot D$, dengan,

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

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

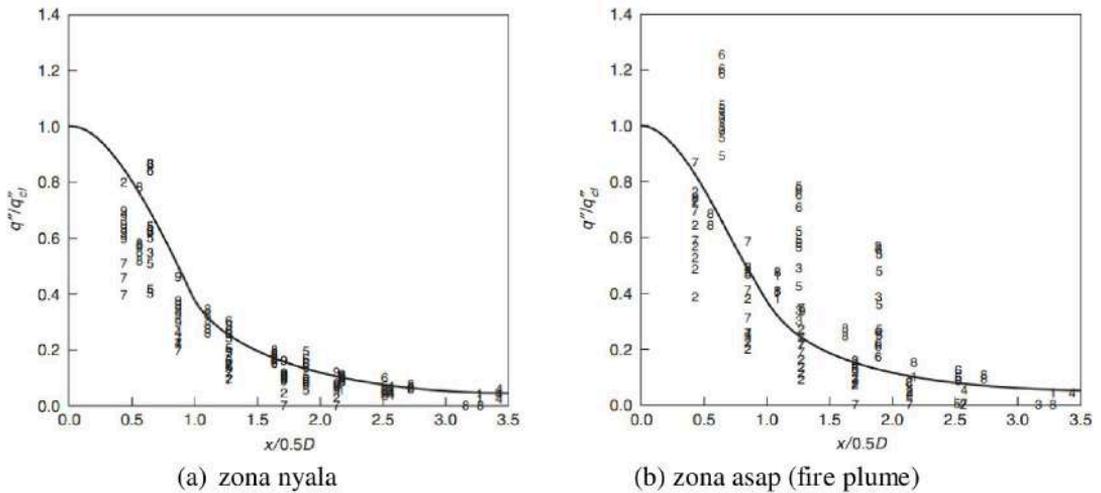
dan

$$Q_D^* = \frac{\dot{q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g D^{5/2}}} \quad (2.58)$$

Dengan demikian, fluks kalor pada atap dapat diestimasi setelah mempertimbangkan parameter z' [56] diekspresikan dalam persamaan (2.59) dan (2.60)

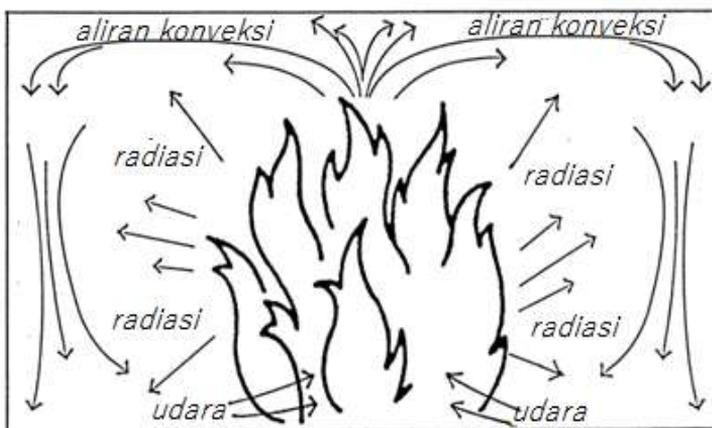
$$z' = 2.4D \left(Q_D^{*2/3} - Q_D^{*2/5} \right) \quad Q_D^* < 1 \quad (2.59)$$

$$z' = 2.4D \left(1 - Q_D^{*2/5} \right) \quad Q_D^* \geq 1 \quad (2.60)$$



Gambar 2.15. Distribusi fluks kalor horizontal dengan jarak dari titik pusat wadah pembakaran propana terhadap dinding berdasarkan Back et al. [56]

Beberapa hasil penelusuran, sebagai contoh Cooper [57], Alpert [58], dan Kokkala [59], telah mempelajari perpindahan kalor ke arah *ceiling* dari asap kebakaran. Semua studi yang dilakukan relatif dilakukan pada skala kecil dimana pembakaran menggunakan bahan bakar berkisar dari padatan, cair, dan gas dengan laju produksi kalor 10kW dan ketinggian *ceiling* kurang dari 1m.

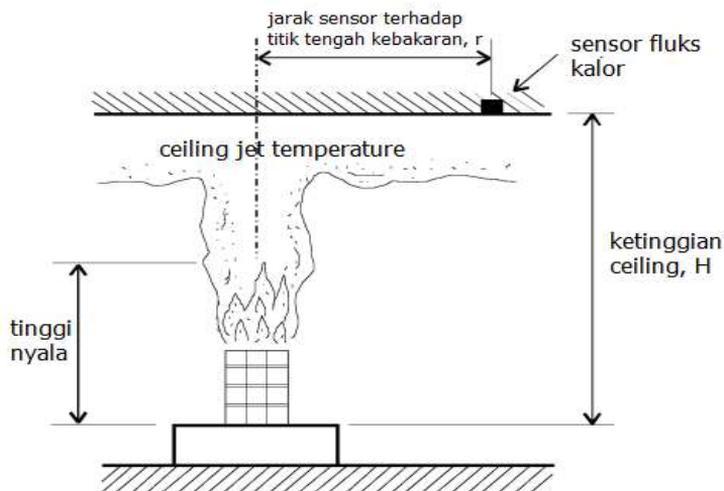


Gambar 2.16 Aliran perpindahan kalor dalam kebakaran kompartemen [62]

Penelitian tersebut mengukur total fluks kalor yang diterima struktur bagian *ceiling*, koefisien konveksi, dan temperatur pada *ceiling*. Kasus untuk kebakaran dengan nyala hingga menyentuh plafon dan tanpa menyentuh plafon telah dilakukan. Untuk kebakaran dengan nyala menyentuh plafon, Kokkala [59] menjelaskan peranan radiasi terhadap fluks kalor yang diterima *ceiling* mencapai 50%. Total fluks kalor dalam kisaran konstan pada 60kW/m² hingga titik dimana ketinggian nyala bebas, L_f adalah tiga kali ketinggian *ceiling*. Dengan demikian, fluks kalor radiasi yang dijelaskan pada persamaan (2.61) akan dominan jika dekat dengan sumber kebakaran [59]. Berikut komponen perpindahan kalor radiasi dan konveksi dalam kebakaran dijelaskan pada gambar 2.16 [62].

$$q_r = \epsilon_g \sigma \left[T_g^4 - \frac{\alpha_g T_\infty^4}{\epsilon_g} \right] \quad [2.61]$$

Perpindahan kalor yang diterima *ceiling* suatu kompartemen menurut Quintiere Ana McCaffrey [60] seperti yang digambarkan pada 2.17 menggambarkan sensor fluks kalor berbasis pendingin air menerima panas dari penyebaran asap pada *ceiling* (*ceiling jet*) dari kebakaran setumpuk kayu (*cribs*).



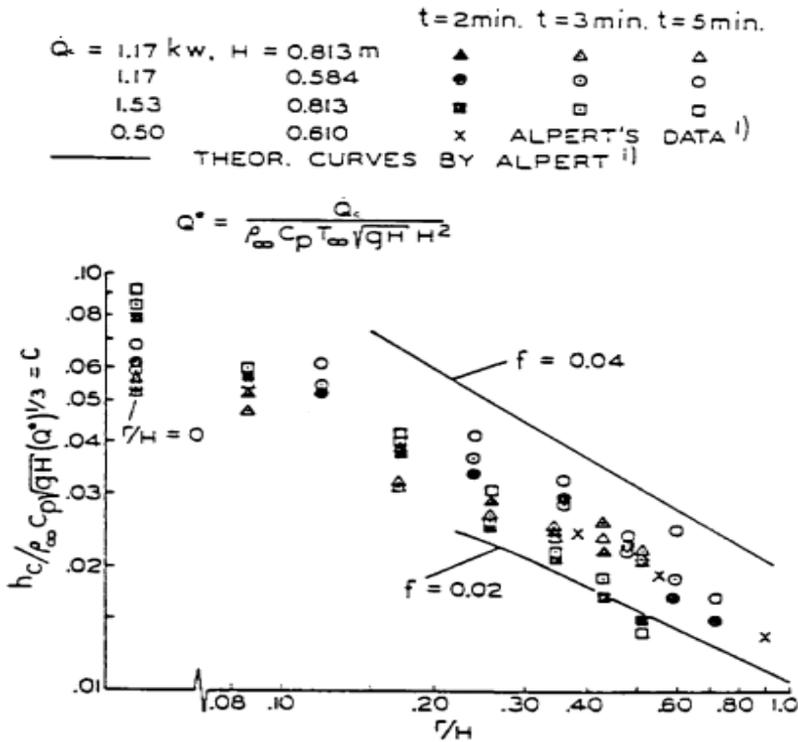
Gambar 2.17 Pengukuran luks kalor yang diterima *ceiling* terhadap sensor pengukur selama eksperimen kebakaran kompartemen dengan bahan bakar tumpukan kayu [60]

$$q_c = h_{conv} (T_g - T_\infty) \quad (2.62 - a)$$

$$h_{conv} = C c_p \rho_\infty \sqrt{(gH)} Q^{*1/3} \quad (2.62 - b)$$

$$Q^* = \frac{\dot{Q}_c}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{(gH)} H^2} \quad (2.62 - c)$$

Dengan \dot{Q}_c adalah laju produksi kalor konveksi kebakaran. Persamaan (2.62) diasumsikan bahwa sensor tidak memengaruhi secara signifikan lapisan batas *ceiling*, temperatur dinding adiabatik (T_{ad}) yang merupakan temperatur rata-rata penyebaran asap pada *ceiling* (*ceiling jet*), dan T_w merupakan temperatur dari pendingin air. Nilai konstanta C bergantung pada r/H . Untuk $r/H = 0.4$ memiliki nilai $C = 0.025$. Nilai konstanta C diberikan pada gambar 2. 18.



Gambar 2.18. Koefisien perpindahan kalor pada *ceiling* tanpa dimensi, C sebagai fungsi air r/H . Nilai f merupakan asumsi faktor friksi dari studi teoretis Alpert [58]

Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini terdiri atas metodologi simulasi numerik dan metodologi eksperimen. Baik simulasi maupun eksperimen dilakukan pada model tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah skala pengecilan 1:25. Model Stasiun Metro Bawah Tanah telah dirancang sebelumnya dari hasil penelitian Agung Santoso (2012) [63]. Upaya yang dilakukan adalah mengendalikan asap kebakaran skala besar dengan konfigurasi ventilasi *hybrid* berdasarkan desain eksisting. Hal pertama yang akan dilakukan adalah simulasi numerik untuk memperkirakan/memprediksi perilaku dinamika penyebaran asap dan usaha manajemen asap kebakaran. Pendekatan yang dilakukan dengan menggunakan pendekatan standar dan kode-kode keselamatan dalam transportasi bawah tanah yang berlaku. Parameter dan seluruh pengaturan dalam simulasi akan dijelaskan pada bagian 3.1. Setelah itu, hasil simulasi akan divalidasi dengan hasil eksperimen. Instrumentasi dan parameter eksperimen akan dijelaskan pada bagian 3.2 Berikut adalah penjabaran metodologi penelitian yang digunakan.

3.1 Metodologi Simulasi Numerik Manajemen Asap Kebakaran pada Model Tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah

Studi simulasi numerik manajemen asap kebakaran pada model tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah dilakukan dengan bantuan perangkat lunak FDS V.05[16,17]. Studi ini akan memberikan gambaran awal bagaimana perilaku penyebaran asap, kehandalan sistem ventilasi yang tepat, dan penilaian aspek-aspek keselamatan kebakaran ketika evakuasi dan setelah padam. Pemodelan geometri stasiun yang akan dilakukan simulasi mengikuti desain pada acuan [53-55].

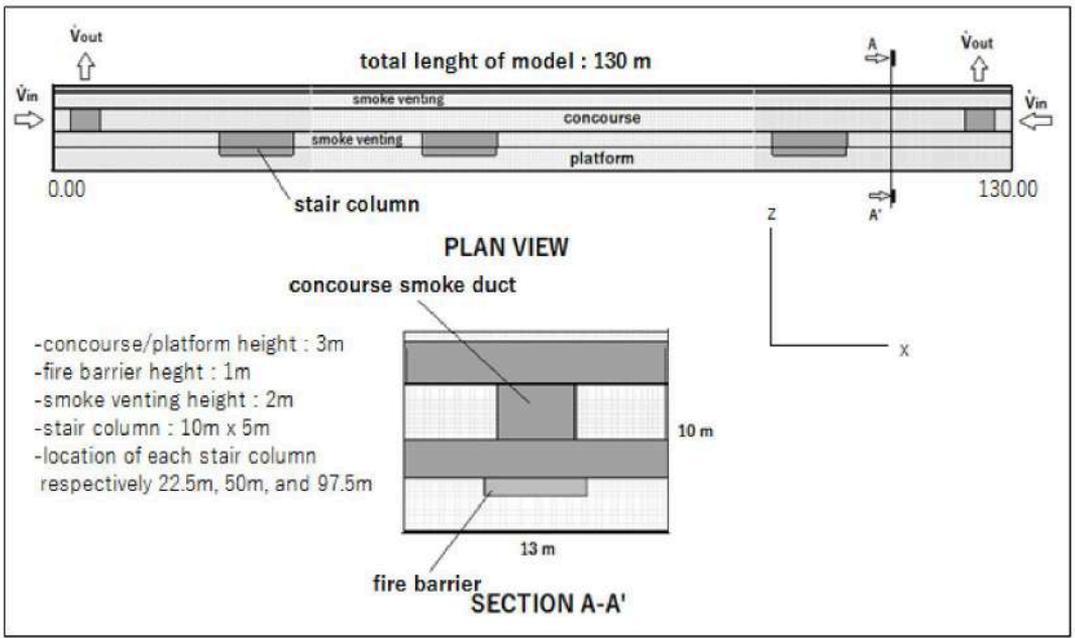
Secara umum, geometri stasiun bawah tanah dapat dilihat pada gambar 3.1. Simulasi ini dibatasi untuk pemodelan tipikal stasiun yang berada pada kedalaman 25m di bawah permukaan tanah yang terdiri atas dua lantai, yaitu lantai *concourse* dan lantai *platform* dengan tinggi plafon 3m. *Concourse* terbagi atas dua, yaitu *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*. Untuk akses penumpang, terdapat tiga kolom tangga utama dari zona *concourse* menuju *platform*. Pada lantai *platform* terdapat *Platform Screen Door (PSD)* sebagai pintu penghubung dengan kereta bawah tanah dan juga sebagai pengaman untuk mencegah kecelakaan. Untuk mengenal lebih terkait bagian-bagian penting dari Stasiun Metro Bawah Tanah, diberikan pada lampiran II.

Simulasi dilakukan pada tekanan 1 atm dan temperatur lingkungan 25°C dengan kelembaban, RH 40%. Geometri seperti ruang pompa, tangki pemadam kebakaran, dan AHU tidak disertakan dalam model geometri guna menyederhanakan simulasi. Pemodelan simulasi FDS akan dilakukan pada skala 1:25 dengan melakukan analisis dimensional/penyekatan terlebih dahulu. Berbagai analisis dimensional terkait pemodelan geometri dan parameter operasi lainnya dilakukan sesuai dengan tabel 2.4 [53-55].

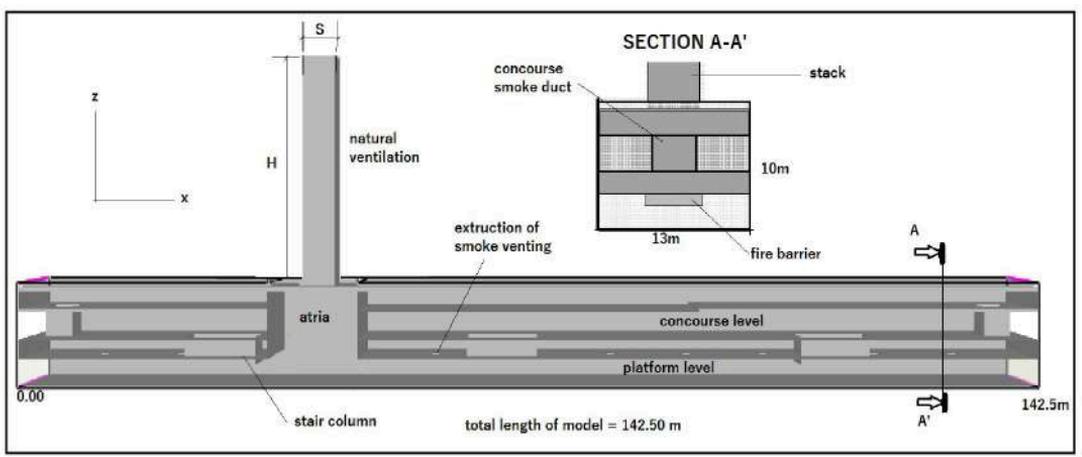
3.1.1 Geometri Model Stasiun dan Analisis Dimensional

Konfigurasi geometri stasiun bawah tanah yang ditetapkan pada studi ini diperoleh dengan menggeneralisasi dan menyederhanakan desain stasiun bawah tanah. Stasiun bawah tanah yang merupakan struktur tertutup harus dilengkapi dengan sistem ventilasi darurat [63] melalui kolom ventilasi. Berdasarkan NFPA-130 [64], diperlukan analisis teknis mengenai perlu atau tidaknya ventilasi udara pada struktur tertutup dengan panjang $61m < L < 304.8m$. Oleh karena itu, ditetapkan

panjang stasiun sebesar 130m pada studi ini yang merupakan, sekitar, nilai tengah $61m < L < 304.8m$. Kemudian, analisis teknis pada studi ini dapat memberikan pertimbangan terhadap besarnya ventilasi darurat yang diperlukan pada stasiun dengan dimensi panjang sebesar 130m. Dapat diperhatikan pada gambar 3.1, dimensi skema model stasiun yang dibangun pada studi ini.



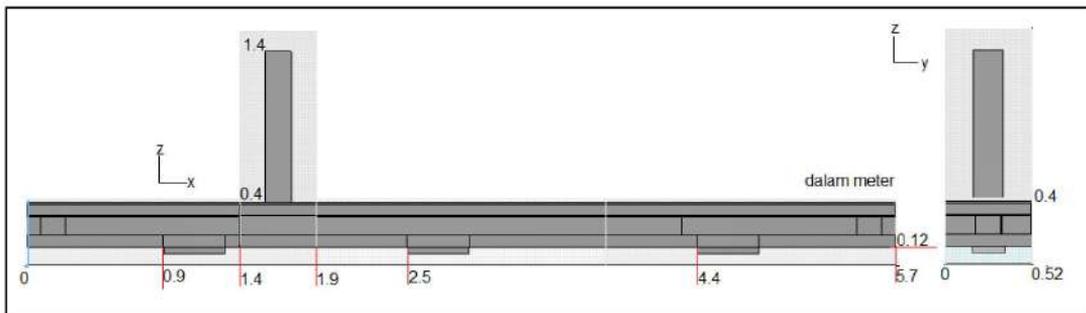
(a) Geometri stasiun utama



(b) Geometri stasiun dengan penambahan atrium dan ventilasi alami

Gambar 3.1 Desain awal stasiun metro bawah tanah skala penuh

Secara umum, dimensi pemodelan simulasi ditunjukkan pada gambar 3.2. Hal penting yang perlu ditekankan adalah jarak masing-masing akses tangga menuju lantai *concourse* dari titik 0.00, ditetapkan sebesar 22.5m, 50m, dan 97.5m setara dengan 0.9m, 2.5m, dan 4.4m pada skala model. NFPA-130 [64] yang menyatakan bahwa jarak tempuh dari setiap titik menuju jalur keluar tidak boleh melebihi 91.4m. Dengan meninjau jarak setiap tangga dari ujung kanan model stasiun, 22.5m, 70m, dan 97.5m, diperoleh kesimpulan bahwa dari setiap titik terdapat dua opsi jalur evakuasi dengan jarak tempuh yang tidak melebihi 91.4m. Agar kondisi kebakaran dapat diasumsikan berada pada kondisi ventilasi yang cukup, bagian ujung masing-masing zona *concourse* dibiarkan terbuka. Dapat diperhatikan pada model stasiun skala laboratorium 1:25 pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pemodelan simulasi numerik skala laboratorium 1:25 Stasiun Metro Bawah Tanah.

Atrium yang dirancang memiliki bukaan dan bagian atasnya terhubung dengan bukaan sebagai ventilasi alami. Ketinggian ventilasi alami yang digunakan adalah 1m dengan asumsi posisi stasiun berada pada level kedalaman 25m dari permukaan tanah. Bentuk geometri ventilasi alami yang digunakan adalah persegi dengan panjang sisi perimeter, S divariasikan untuk melihat pengaruh variasi ukuran perimeter terhadap efektivitas pembuangan, pengendalian asap, dan efek yang terjadi. Variasi dari bukaan ventilasi alami menggunakan rasio lebar perimeter terhadap ketinggian yang diasumsikan konstan sebesar 1m. Berdasarkan gambar 3.3, dimensi dari model eksperimen skala 1:25 dengan ketentuan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Penyekalaan dimensi model [53] stasiun untuk eksperimen

No.	Nama dimensi	Skala penuh (m)	Model eksperimen (m)	Keterangan
1.	Dimensi total stasiun	$p = 142.5, 130.0$ $l = 13$ $h = 10$	$p = 5.7, 5.2$ $l = 0.52$ $h = 0.4$	Untuk panjang model, $p = 5.7\text{m}$ disertai penambahan atrium
2.	Ketinggian plafon lantai concourse dan platform	$h = 3$	$h = 0.12$	
3.	Lebar atrium	$l = 12.5$	$l = 0.5$	posisi atrium 1.4m dari titik 0.0
4.	Dimensi bukaan atrium (ventilasi alami)	$S = 4.425$ $H = 25$	$S = 0.177$ $H = 1$	Divariasikan, $0.122 \leq S/H \leq 0.277$

3.1.2 Daerah Komputasi dan Diskretisasi

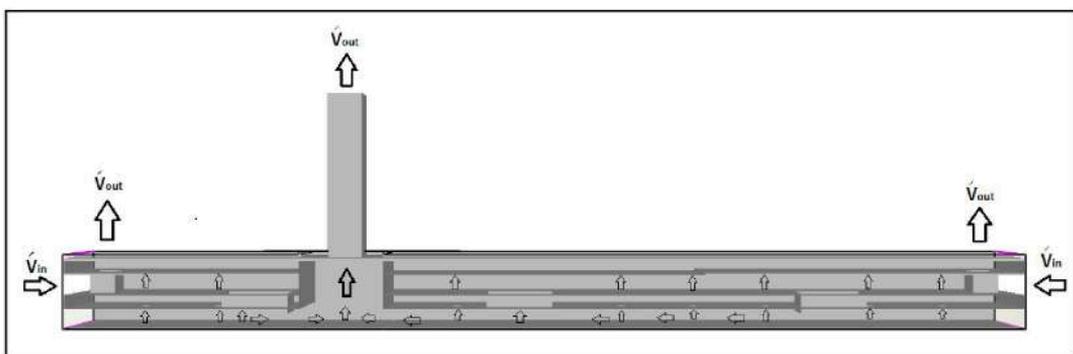
Daerah komputasi akan sangat bergantung terhadap daerah diskretisasi dimana jumlah daerah diskrit akan berdampak besar terhadap lamanya waktu komputasi yang diperlukan. Daerah diskretisasi merepresentasikan ukuran 1 sel/*mesh* untuk geometri, δ dan untuk sumber kebakaran menggunakan diameter karakteristik, D^* berdasarkan Bilangan Zukoski [19]. Dengan mempertimbangkan rasio antara diameter karakteristik sumber kebakaran dengan ukuran sel adalah 8.9, geometri sel dalam simulasi dinilai cukup untuk memenuhi kriteria jangkauan kebakaran dan aliran penyebaran asap yang baik. Daerah komputasi dan diskretisasi simulasi numerik untuk kedua model stasiun, baik yang disertai penambahan atrium maupun tanpa atrium untuk masing-masing arah sumbu x , y , dan z disajikan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Daerah diskretisasi dan komputasi

	Computational domain (m)			Numerical Discretization	
	Without Atria	Attached atria		Without Atria	Attached atria
Min. X	0	0	δx	0.01	0.01
Max. X	5.2	5.7	δy	0.01	0.01
Min. Y	0	0	δz	0.01	0.01
Max. Y	0.52	0.52	$D^* / \delta x$	8.9	8.9
Min. Z	0	0	$D^* / \delta y$	8.9	8.9
Max. Z	0.44	1.44	$D^* / \delta z$	8.9	8.9

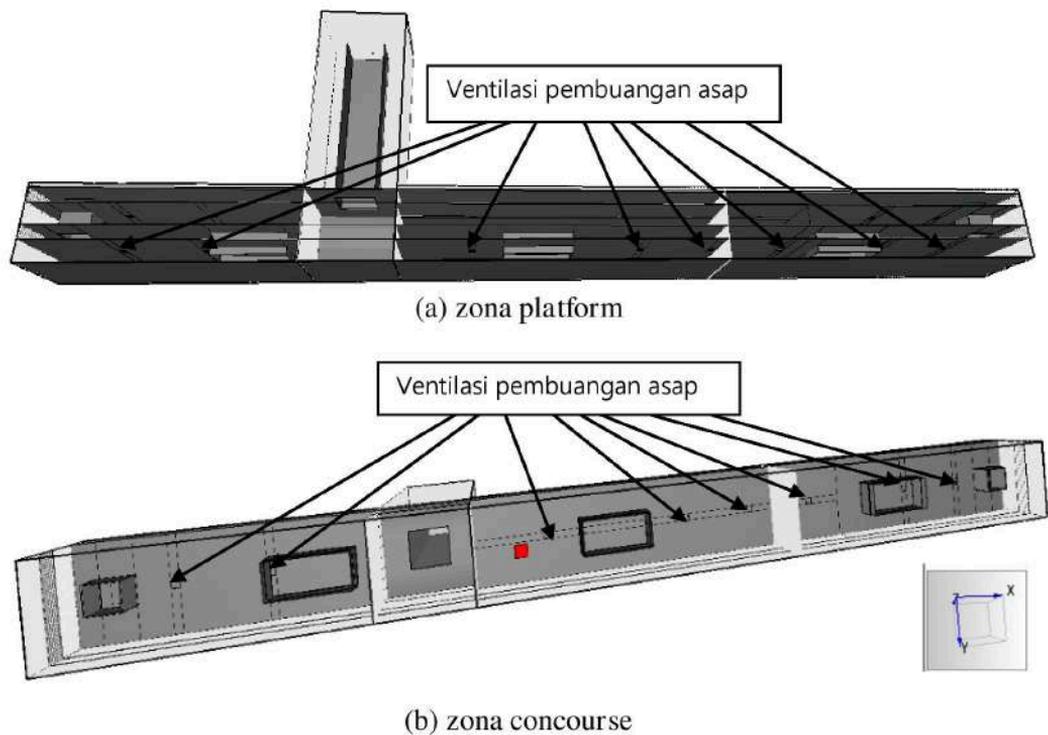
3.1.3 Sistem Ventilasi dan Pembuangan Asap

Pengendalian terhadap penyebaran asap pada studi ini dilakukan dengan menggunakan konfigurasi ventilasi, yakni ventilasi mekanik, ventilasi alami, dan kombinasi keduanya. Sistem ventilasi mekanik yang digunakan adalah berbasis *fan* dengan sistem transversal (hisap), sedangkan sistem ventilasi alami melalui bukaan atrium yang berupa bukaan setinggi 25m untuk kondisi sebenarnya. Dapat diperhatikan pada gambar 3.3, sistem pertukaran udara terjadi melalui bukaan level *concourse* kemudian masuk ke dalam kolom tangga dan dikeluarkan melalui bukaan ventilasi alami dan lubang-lubang ventilasi mekanik. Lubang-lubang ventilasi pada plafon zona *platform* dan *concourse* ditetapkan sebesar 1m^2 untuk setiap daerah *platform* atau *concourse* sebesar 10m^2 [64].



Gambar 3.3. Konfigurasi sistem ventilasi pengendalian asap kebakaran dalam eksperimen stasiun bawah tanah

Pada simulasi, peletakan setiap difuser ventilasi mekanik pembuangan asap pada zona *concourse* dan zona *platform*, ditunjukkan oleh gambar 3.4 (a) dan (b). Ventilasi *fan* pembuang asap pada model dipasang pada zona *platform* dan *concourse* pada langit-langit.



Gambar 3.4 Lokasi difuser ventilasi pembuangan asap ventilasi mekanik dalam model simulasi.

Kondisi aman dari ketinggian lapisan asap diasumsikan adalah 0.08m untuk skala model atau 2m untuk skala real. Dengan menggunakan persamaan NFPA 92B [41] untuk perancangan sistem pengendalian asap, dapat menghitung laju pembuangan asap ventilasi mekanik untuk mempertahankan lapisan asap dalam kondisi aman. Dalam studi ini, laju pembuangan asap divariasikan berkisar antara 0.0035-0.0089m³/s dengan menggunakan persamaan (2.20) [40]. laju pembuangan asap ventilasi mekanik pada studi ini juga memenuhi ketentuan standar laju

pertukaran udara/ACH (*air change rate*) dengan persamaan (2.18) untuk aplikasi transportasi bawah tanah berkisar antara 5-10 [38]. Kemudian, waktu terbaik aktivasi sistem ventilasi mekanik dinyatakan dalam persamaan (2.23 dan 3.1) [41]. Berdasarkan NFPA-92 B [41] waktu aktivasi sistem ventilasi mekanik merupakan fungsi laju produksi kalor, ketinggian lapisan asap aman, dan luas penampang geometri stasiun. Pada persamaan (3.1) diasumsikan ketinggian lapisan asap, H dipertahankan pada level di atas 2m.

Waktu aktivasi ventilasi mekanik untuk masing-masing laju produksi kalor sumber kebakaran terdapat pada tabel 3.6

3.1.4 Material Pemodelan

Material yang digunakan pada simulasi adalah beton *brick* dan *glass pyrex*. Dimana *brick* ditetapkan pada struktur geometri Stasiun Metro Bawah Tanah, termasuk kolom tangga dan saluran ventilasi mekanik. Sedangkan *glass pyrex* ditetapkan pada PSD dan pembatas *paid concourse*. Dapat dilihat pada tabel 3.3, nilai-nilai termofisik untuk kedua material tersebut.

Tabel 3.3 Nilai termofisik material pada simulasi

Material	ρ (kg/m ³)	k (W/(m.K))	c_m (kJ/(kg.K))	Sumber
<i>Concrete</i>	2300	1.4	0.88	[16]
<i>Glass Pyrex</i>	2225	1.4	0.84	[16]

3.1.5 Sumber Kebakaran

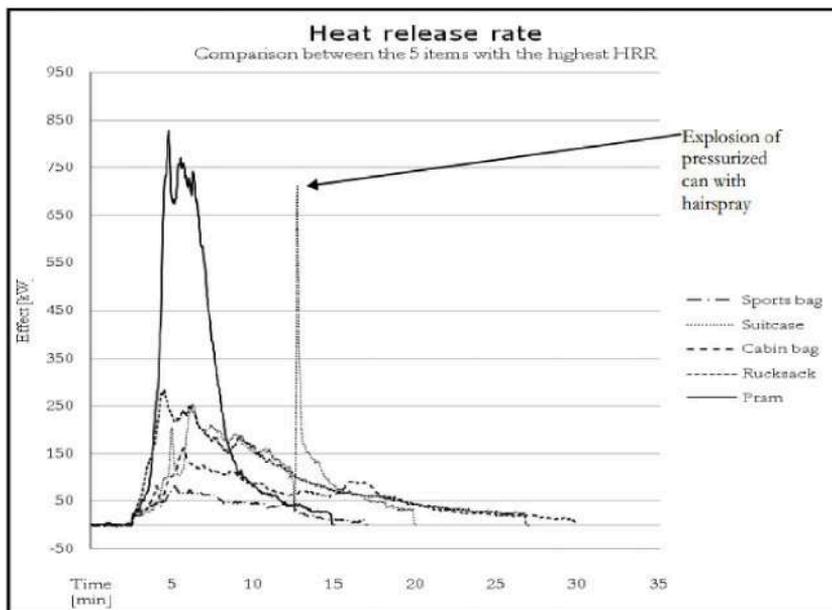
Penyebab sumber kebakaran dalam Stasiun Metro Bawah Tanah menurut Mia Kumm dalam studi *Carried Fire Load in Mass Transport Systems* di Stockholm [65], bahwa dari 1200 orang, 82% orang membawa barang bawaan dengan berat rata-rata

4.2kg. Barang bawaan tersebut diasumsikan terdiri atas bahan tekstil 37%, alat elektronik 17%, kertas 31%, plastik 15%, logam, makanan, dan lain-lain. Jenis barang bawaan penumpang pengguna stasiun bawah tanah tampak pada gambar 3.5



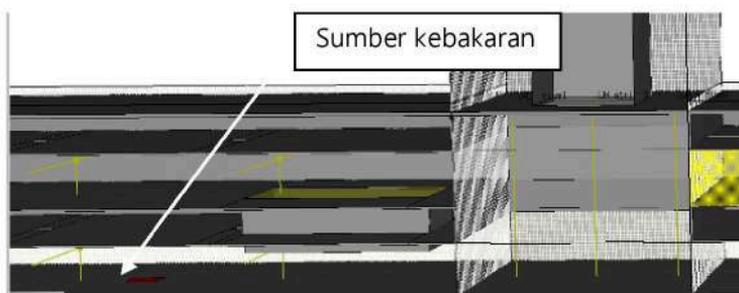
Gambar 3.5 Penyebab sumber kebakaran dalam Stasiun Metro Bawah Tanah yang bersumber dari penumpang [65]

Berdasarkan pengujian, jika barang bawaan diasumsikan adalah sebuah tas ransel dan *cabin bag*, akan memiliki nilai laju produksi kalor yang dijelaskan pada gambar 3.6 ketika terjadi kebakaran adalah masing-masing 160 kW dan 275 kW [65]. Dengan demikian, untuk kebakaran skala besar (>5000kW) dengan asumsi terjadi pada barang bawaan mungkin terjadi.



Gambar 3.6 Prediksi nilai laju produksi kalor untuk setiap beban kebakaran [65].

Perlu ditekankan, dalam studi ini kebakaran dalam stasiun bawah tanah difokuskan pada aspek keselamatan dan meninjau pola pergerakan, distribusi, dan konsentrasi asap tanpa disertai propaganda api. Dalam studi sebelumnya, W. Yanfu [66] telah melakukan eksperimen skala penuh untuk kebakaran kelas besar, yaitu 7.5MW. Dalam studi ini, sumber kebakaran diasumsikan, yakni 5-9MW untuk skala real yang senilai dengan 1.6-2.88kW untuk skala eksperimen 1:25. Sumber kebakaran diasumsikan terjadi selama 1200 detik untuk skala aktual atau sekitar 240 detik untuk skala eksperimen. Sumber kebakaran untuk studi ini menggunakan kolam api (*pool fire*) dengan menggunakan bahan bakar *gasoline* ($\dot{m}_{max} = 0.055 \text{ kg/s}$, dan $\Delta H_c = 42.700 \text{ kJ/kg}$). Berikut peletakan sumber kebakaran dalam simulasi digambarkan pada gambar 3.7



Gambar 3.7 Peletakan sumber kebakaran pada zona platform pada simulasi

Dalam menentukan luas wadah sumber kebakaran pada model melibatkan iterasi pada persamaan laju produksi kalor, \dot{Q} dan laju aliran massa bahan bakar tiap luasan persatuan kilogram, \dot{m}'' dikarenakan diameter wadah berdasarkan laju produksi kalor yang dapat diekspektasi lebih kecil dari 1m. Tinggi sumber kebakaran *pool fire*, L (Heskestad, 2008) [52] ditunjukkan pada persamaan (3.2):

$$L = -1.02 \cdot D_f + 0.23 \cdot \dot{Q}^{0.4} \quad (3.2)$$

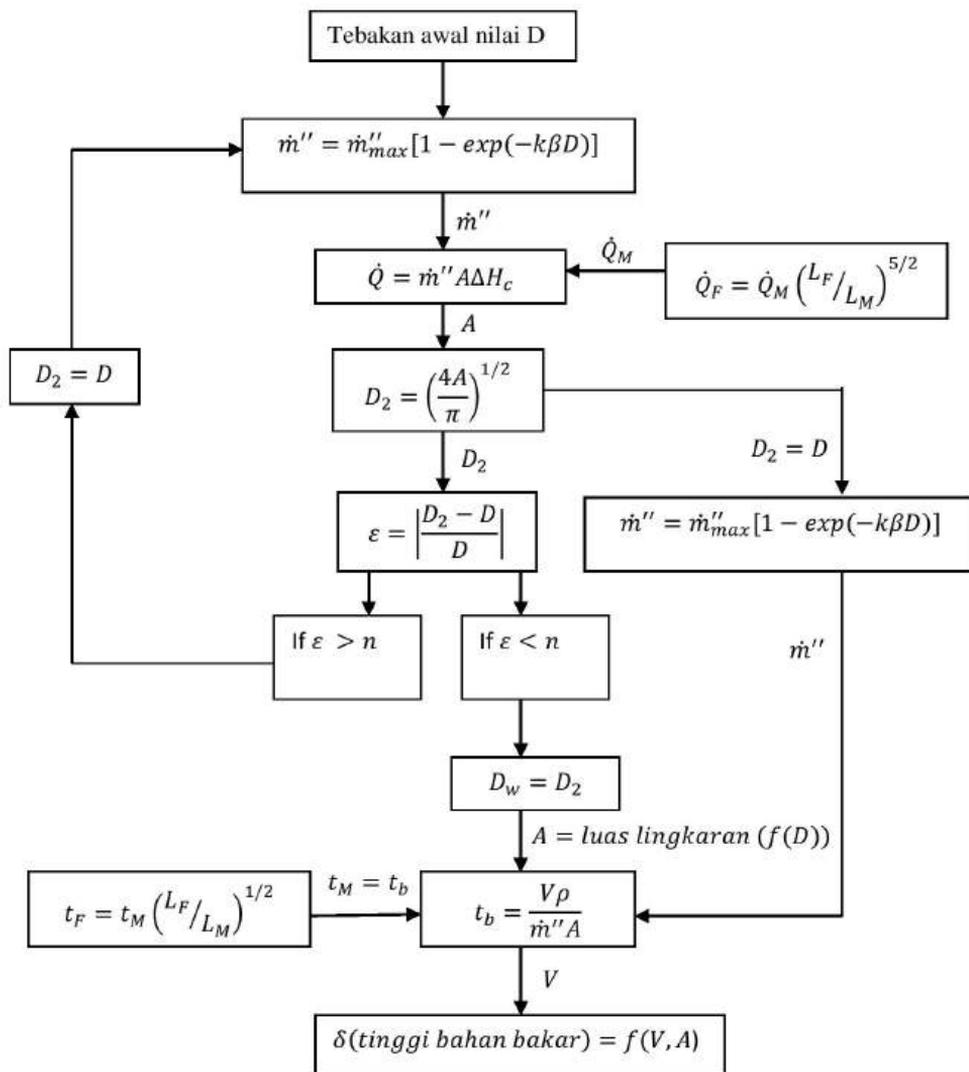
dan diameter wadah *pool fire*, D_f [52] ditunjukkan pada persamaan (3.3):

$$D_f = 0,2255 \dot{Q}^{0.4} - 0.9804 L \quad (3.3)$$

Dapat diperhatikan pada gambar 3.8, algoritma perhitungan [50] sumber kebakaran pada model. Bahan bakar yang akan digunakan pada eksperimen adalah gasolin dengan \dot{m}_{max}^* , $k\beta$, ΔH_c berdasarkan persamaan (2.44) dan (2.45) [50-51] adalah 0.055 kg/s, 2.1 m⁻¹, 42.7 MJ/kg, serta \dot{Q}_M sebesar 1.6-2.88kW, maka sesuai gambar 3.8 dilakukan iterasi sampai D_w (diameter wadah) dengan menetapkan $n = 2 \times 10^{-5}$ dan tebakan awal nilai D sebesar 0.1 m. Diperoleh nilai D_w dan A untuk masing-masing nilai laju produksi kalor diberikan pada tabel 3.4. Dengan menggunakan waktu pembakaran sebesar 140 detik serta \dot{m}^* dari D_w , diperoleh volume bahan bakar diberikan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4. Daftar karakteristik sampel kebakaran pada zona *platform* untuk HRR 5-9MW pemodelan skala 1:25

No.	Parameter	Besaran				
		1.6kW	1.92kW	2.24kW	2.56kW	2.88kW
1	Laju produksi kalor per unit area (kW/m ²)	354.31	375.08	392.95	410.66	425.65
2.	Volume bahan bakar (10 ⁻³ m ³)	0.081	0.092	0.100	0.110	0.121
3.	Tinggi nyala (m) [52]	0.21	0.22	0.24	0.24	0.26
4.	Diameter wadah bahan bakar (m)	0.076	0.081	0.085	0.089	0.093

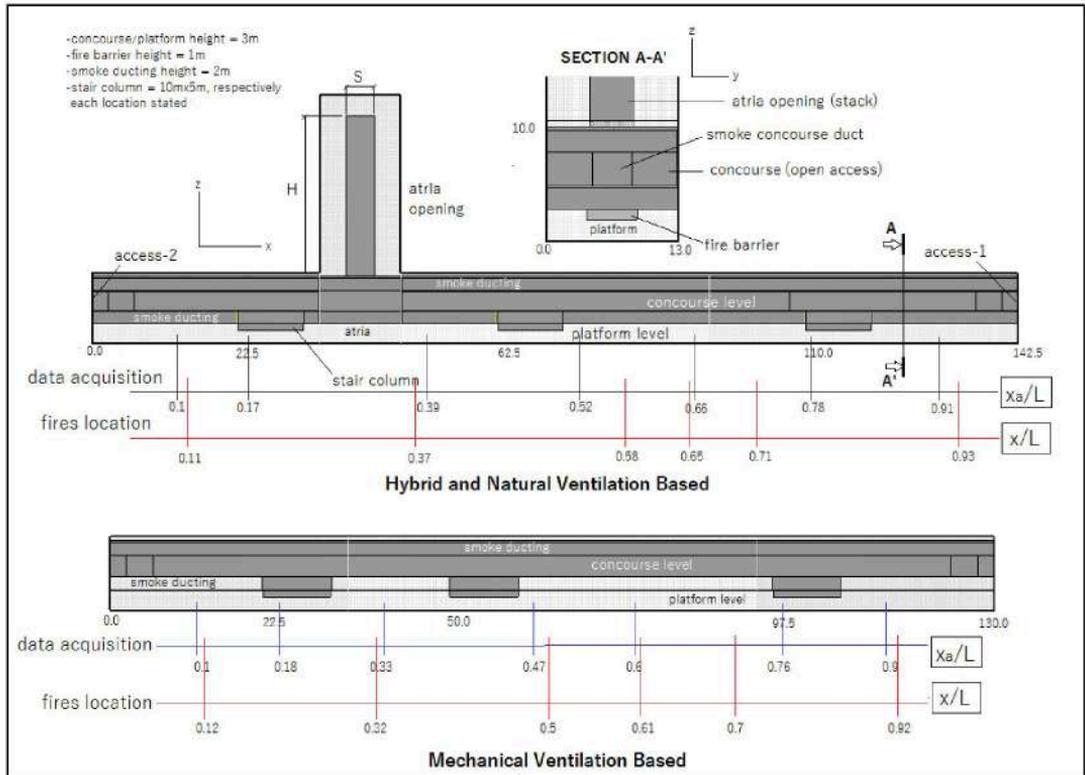


Gambar 3.8 Algoritma perhitungan diameter wadah dan ketinggian bahan bakar [50]

3.1.6 Lokasi Pengukuran dan Instrumentasi

Lokasi titik ukur pada simulasi ditetapkan sebanyak 7 titik, x_i/L , sedangkan lokasi kebakaran ditetapkan sebanyak 6 titik, x/L sepanjang pada zona *platform*. Setiap lokasi pengukuran memiliki karakteristik masing-masing dan berpengaruh

terhadap penyebaran asap. Lokasi pengukuran untuk kedua jenis sistem ventilasi seperti yang terlihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9. Lokasi pengukuran dan peletakan sumber kebakaran model stasiun.

Pada model simulasi, diberikan sejumlah alat ukur untuk meninjau parameter-parameter dalam dinamika asap kebakaran. Alat ukur tersebut meliputi termokopel, ketinggian lapisan asap, *beam detector*, laju alir massa dan debit, visibilitas, dengan spesifikasi penempatan pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Lokasi penempatan alat ukur dan fokus pembahasan pada simulasi.

No.	Alat Ukur	Lokasi penempatan	Keterangan
1.	Termokopel	- Pada tengah-tengah ruangan zona platform dan concourse setiap lokasi x_a/L pada ketinggian 0.08m (2m) dan 0.12 (3m).	Pembahasan difokuskan pada platform dan atrium

		- Pada bukaan atrium yakni ketinggian 0.4, 0.9, dan 1.4m	
2.	Beam detector	Pada setiap lokasi x_a/L PSD zona platform relevan terhadap ketinggian termokopel	Pembahasan difokuskan pada platform
3.	Visibilitas	Pada setiap lokasi x_a/L zona platform, concourse	Pembahasan difokuskan area platform
4.	Debit dan laju aliran massa	Pada setiap lubang difuser ventilasi mekanik, bukaan atrium, kolom tangga, ventilasi bukaan zona concourse utara dan selatan, 2 saluran akting utama ventilasi mekanik zona concourse,	Pembahasan difokuskan pada seluruh ventilasi untuk melihat vektor aliran yang terjadi.
5.	Ketinggian lapisan asap	Pada setiap variasi x/L zona platform concourse dan atrium	Pembahasan difokuskan pada atrium dan platform

3.1.7 Skenario Kebakaran

Skenario kebakaran pada model terjadi pada zona *platform* pada lokasi x/L tertentu, seperti yang dijelaskan pada gambar 3.8 dengan laju produksi kalor untuk kompartemen skala besar. Beberapa lokasi kebakaran sesuai gambar 3.8 berada pada kondisi kritis/terburuk dan merupakan jalur evakuasi menuju level *concourse* dengan tujuan untuk menganalisis tingkat keamanan dan penanganan dalam hal keselamatan kebakaran. Pengukuran utama skenario kebakaran dalam studi ini terjadi pada $x/L = 0.11, 0.37, 0.65,$ dan 0.93 dengan variasi pengukuran seperti dijelaskan pada tabel 3.6. Untuk kondisi terburuk, lokasi kebakaran yang digunakan adalah $x/L = 0.65$ berdasarkan pertimbangan analisis ketinggian lapisan asap dan visibilitas paling rendah, kapasitas ventilasi minimum, dan searah jalur evakuasi pada studi sebelumnya [67]. Dalam studi ini, penelitian terfokus pada penyebaran asap kebakaran ketika 240 detik fase kebakaran (*fire growth*) [68] dan 240 detik fase setelah pemadaman.

3.1.8 Variasi Pengukuran

Secara umum variasi pengukuran parameter pada studi ini adalah sistem pengendalian asap kebakaran dengan variasi konfigurasi ventilasi. Setiap konfigurasi ventilasi akan dilakukan analisis terkait efektivitas dalam manajemen asap kebakaran, aspek-aspek keselamatan kebakaran, dan perpindahan kalor konveksi yang terukur dalam parameter operasi. Parameter operasi meliputi variasi laju produksi kalor, kapasitas pembuangan ventilasi mekanik, lokasi kebakaran x/L , bukaan atrium (ventilasi alami) S/H . Berikut variasi parameter operasi dijelaskan pada tabel 3.6.

Tabel. 3.6 Parameter variasi operasi eksperimental skala 1:25.

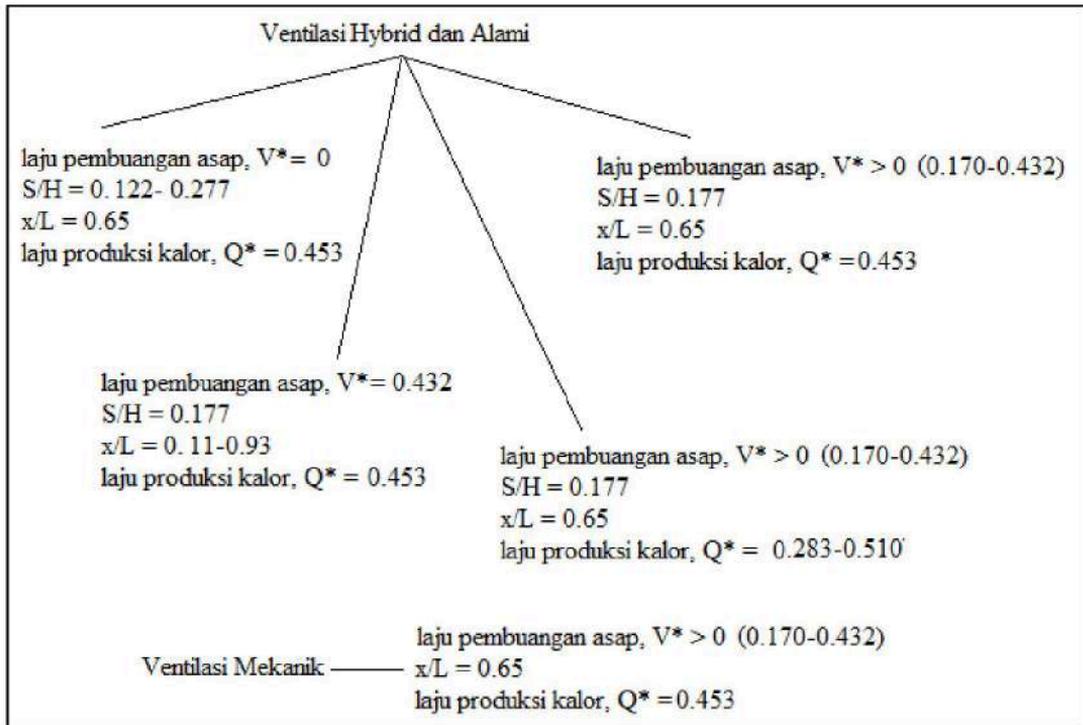
Parameter	Skala Aktual	Skala 1:25
1. Laju Produksi Kalor (kW)	5000	1.6
	6000	1.92
	7000	2.24
	8000	2.56
	9000	2.88
2. Ventilasi Mekanik (m^3/s)	11.11	0.0035
	16.67	0.0053
	22.22	0.0071
	27.78	0.0089
3. Waktu Aktivasi Maksimum Ventilasi Mekanik terhadap HRR (detik) [eq. 3.2]	32.7	5.7
	30.8	5.6
	29.3	5.4
	28.0	5.3
	27.0	5.2
4. Lokasi Sumber Kebakaran (x/L)	0.11, 0.37, 0.58, 0.65, 0.71, dan 0.93	
5. Perimeter Ventilasi Alami (S/H)	0.122, 0.133, 0.155, 0.177, 0.199, 0.222, 0.277	

Berdasarkan tabel 3.6, akan ditetapkan parameter analisis utama dalam studi ini untuk skala eksperimen, meliputi:

1. Pengamatan utama untuk laju produksi kalor sumber kebakaran ditetapkan sebesar 2.56kW atau $Q^* = 0.453$ [66].
2. Pengamatan utama untuk kapasitas ventilasi pembuangan ventilasi mekanik ditetapkan sebesar 0.0089 m^3/s atau $V^* = 0.432$ [37-38].

3. Pengamatan utama untuk bukaan atrium/ventilasi alami ditetapkan sebesar 0.177 [67].
4. Pengamatan utama untuk lokasi kebakaran ditetapkan pada $x/L = 0.65$ berdasarkan referensi [63, 67].

Dengan demikian, pengaturan rancangan parameter operasi untuk eksperimen dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pengaturan rancangan parameter operasi untuk eksperimen manajemen asap kebakaran berbasis konfigurasi ventilasi.

3.2 Metodologi Eksperimen Skala Laboratorium 1:25

Setelah melakukan simulasi, dilakukan validasi data melalui eksperimen model tipikal 1:25. Dalam metodologi eksperimen, seluruh konfigurasi dan titik-titik pengukuran sama dengan simulasi FDS yang dilakukan sebelumnya. Adapun langkah-langkah yang digunakan dalam studi ini adalah:

1. Analisis penyekalaan model eksperimen.
2. Perancangan model eksperimen skala laboratorium 1:25.

3. Perancangan eksperimen dan instrumentasi.
 - a. Merancang sistem ventilasi (mekanik, alami, dan kombinasinya).
 - b. Mengestimasi sumber kebakaran (kebakaran skala besar).
 - c. Menentukan lokasi titik ukur pengamatan.
 - d. Menempatkan instrumen/alat ukur eksperimen dan melakukan kalibrasi.
 - e. Menentukan skenario kebakaran.
 - f. Menentukan variasi parameter pengukuran eksperimen.

Untuk analisis dimensional dan penjelasan geometri model, konfigurasi sistem ventilasi, perancangan sumber kebakaran, pengaturan lokasi titik ukur pengamatan, skenario kebakaran, dan variasi parameter operasi telah dibahas sebelumnya pada metodologi simulasi dan sama halnya untuk diterapkan dalam model eksperimen. Untuk itu, dalam metodologi eksperimen akan dijelaskan beberapa hal terkait teknis eksperimen dan instrumentasi yang digunakan.

3.2.1 Perancangan Eksperimen Manajemen Asap Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah

Dalam merancang model eksperimen dilakukan analisis dimensional terlebih dahulu. Adapun analisis dimensional dari geometri model telah dibahas sebelumnya pada bagian metodologi simulasi 3.1.1. Untuk membuat pemodelan eksperimen digunakan material tahan api dan temperatur tinggi. Material model eksperimen dikonstruksi dengan menggunakan papan *calcium silicate* yang tidak mampu bakar ($\rho = 1050\text{kg/m}^3$, $k = 0.25\text{W/mK}$) dengan tebal 0.0035m. Material ini dipilih dengan pertimbangan sifat termal yang sesuai dengan analisis dimensional yang terdapat pada tabel 2.4 [53-33]. *Platform screen door* (PSD) dirancang tertutup dimodelkan dengan material kaca ($\rho = 2579\text{kg/m}^3$, $k = 0.8\text{ kW/mK}$) dengan tebal 0.0035m untuk memberikan kemudahan dalam pengukuran obskurasi dan pengamatan pergerakan asap dalam model. Secara umum, dimensi pemodelan eksperimen ditunjukkan pada gambar 3.11.



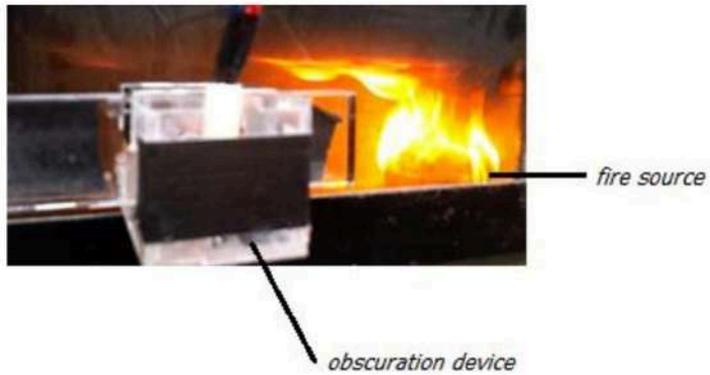
(a) berbasis ventilasi mekanik dengan tanpa bukaan atrium



(b) berbasis ventilasi hybrid dan alami dengan disertai bukaan atrium

Gambar 3.11 Pemodelan tipikal eksperimen stasiun metro bawah tanah skala laboratorium 1:25

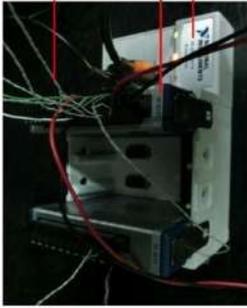
Lokasi titik ukur pada eksperimen ditetapkan sebanyak 7 titik, sedangkan lokasi kebakaran ditetapkan sebanyak 6 titik sepanjang pada zona *platform* untuk kedua jenis sistem ventilasi seperti yang terlihat pada gambar 3.9. Instrumentasi pada model eksperimen digunakan untuk 3 pengukuran utama, yaitu pengukuran temperatur, fluks kalor dan obskurasi. Mekanisme pengukuran eksperimen terkait pengaruh penyebaran asap kebakaran terhadap aspek keselamatan dijelaskan pada gambar 3.12.

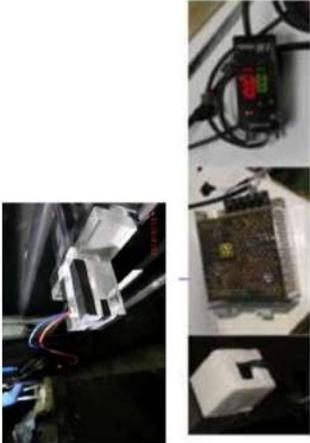
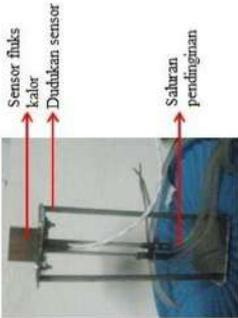


Gambar 3.12 Eksperimen pengaruh penyebaran asap kebakaran dalam zona *platform*

Adapun jenis, spesifikasi, dan posisi penempatan alat ukur dalam eksperimen dapat dilihat pada tabel 3.7

Tabel 3.7 Pengaturan instrumentasi eksperimen pada model tipikal stasiun metro bawah tanah skala laboratorium 1:25

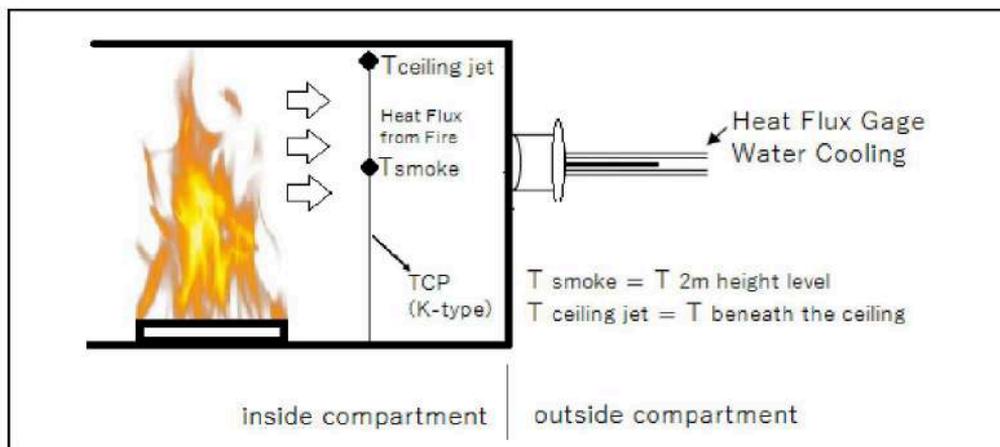
No.	Alat Ukur	Fungsi	Penempatan	Spesifikasi Alat
1.	Inverter 	mengatur frekuensi putaran blower dengan menyesuaikan besarnya tegangan yang masuk ke motor	luar model pada boks panel blower	Hitachi WJ200, 200V/0.75kW 3 phase, 50Hz
2.	Pressure Tap  	mengukur perbedaan tekanan dengan menggunakan pelat orifice untuk mengatur laju aliran udara ventilasi mekanik	pada saluran pembuangan ventilasi mekanik sisi upstream sepanjang 1.5m dan sisi downstream sepanjang 0.4m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keyence AP-47 Micro-pressure difference sensor head dengan akuisisi AP-V41AW amplifier tipe NPN ▪ pelat orifice yang dirancang sesuai standar ISO 5167 II dengan $\beta = d/D = 0.1, \alpha = 45^\circ$
3.	Termokopel 	mengukur distribusi temperatur sepanjang platform dan bukaan ventilasi alami	<ul style="list-style-type: none"> ▪ setiap lokasi x_n/L (lihat gambar 3.4) setinggi 0.08m dan 0.12m zona platform. ▪ bagian dalam bukaan ventilasi alami pada ketinggian 0.25, 0.5, 0.75, dan 1m. 	Termokopel tipe-K dengan data akuisisi cDAQ-9174 dan NI 9211 16-Ch ± 80 mV, 14 S/s, 24-Bit. Visualisasi oleh perangkat lunak LabView NI 2013

4.	<p>Sensor densitas optik</p> 	<p>mengukur intensitas ketebalan asap (opasitas) zona kebakaran</p>	<p>setiap lokasi x_0/L (lihat gambar 3.4) setinggi 0,08m zona platform.</p>	<p>7 buah sensor home-made laser beam detector dan sensor cahaya fotodiode [70] dengan akuisisi mikrokontroler ATmega16 dan downloader K125. Alat ini dikalibrasi dengan standar pengukuran berbasis sensor Keyence IB-01 Laser Thru beam Sensor (Sensor head) dan IB-1000 Laser Thru beam Sensor (Amplifier). Visualisasi oleh perangkat lunak CodeVision AVR V2.05.0</p>
5.	<p>Sensor heat flux (fluksmeter)</p> 	<p>mengukur fluks kalor akibat aliran kalor sumber kebakaran</p>	<p>pada lokasi kebakaran, x/L tertentu dengan ketinggian 0,08m zona platform</p>	<p>fluksmeter berbasis pendingin air No. 64-10SB-20 dengan data akuisisi APPA 109N. keluaran pengukuran alat ini dalam mV yang dikonversikan menjadi satuan kW/m^2 Visualisasi oleh perangkat lunak 100S Virtual DMM</p>
6.	<p>Sensor humiditas</p> 	<p>mengukur kelembapan udara dan temperatur rata-rata lingkungan</p>	<p>luar model stasiun</p>	<p>temperature-humidity meter tipe hygro-thermometer No. 407445</p>

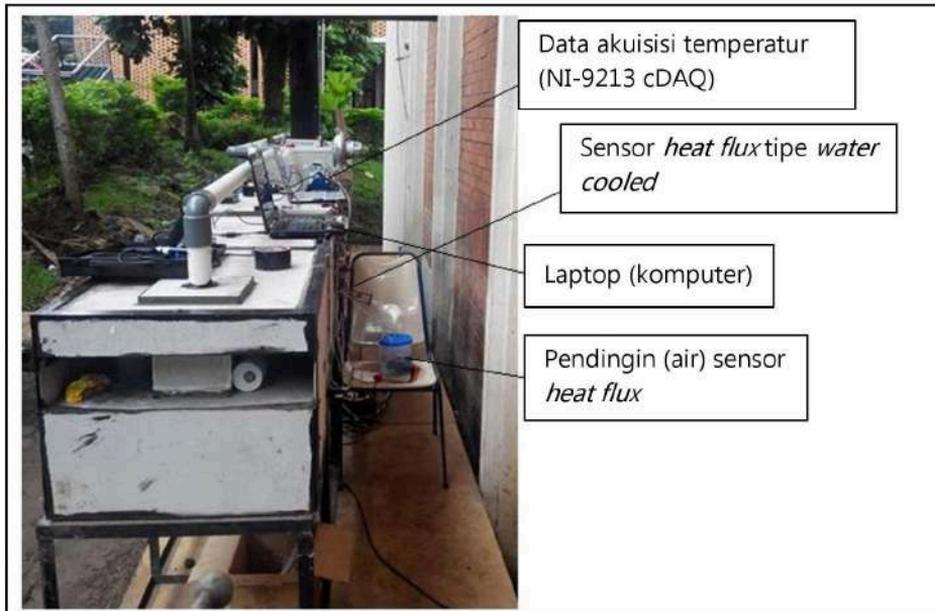
3.2.2 Perancangan Eksperimen Perpindahan Kalor Konveksi Kebakaran

Pengukuran fluks kalor bertujuan untuk mengetahui jumlah fluks kalor konveksi yang terjadi dalam kompartemen *platform* dalam 1 arah (1 dimensi) yang mengacu pada referensi [69]. Fluks kalor ini merepresentasikan fluks kalor yang diterima oleh evakuan/manusia dengan NFPA-130 [64] ditetapkan untuk kemampuhan fluks kalor harus $< 2.5\text{kW/m}^2$ [23-25].

Pengukuran fluks kalor dilakukan pada model eksperimen Stasiun Metro Bawah Tanah skala 1:25 yang terfokus pada zona *platform*. Pengukuran fluks kalor menggunakan sensor *heat flux* terstandar berbasis pendingin air (*water cooling*) [58-61]. Pengukuran dilakukan pada beberapa lokasi titik sesuai dengan lokasi kebakaran, seperti yang terdapat pada gambar 3.9 yang diletakkan pada ketinggian 8cm pada skala eksperimen. Eksperimen ini juga mengukur temperatur *ceiling jet* dan lapisan asap dimana masing-masing pada ketinggian tepat di bawah plafon (*ceiling*) $< 12\text{cm}$ dan ketinggian 8cm yang setara dengan ketinggian 3m dan 2m pada kondisi sebenarnya. Posisi peletakan sensor temperatur dan *heat flux* dijelaskan pada gambar 3.13 (a). Adapun teknik pengukuran dan perancangan eksperimen fluks kalor dan perpindahan kalor konveksi kebakaran dijelaskan pada gambar 3.13 (b).



(a) metodologi pengukuran fluks kalor aliran konveksi dalam kompartemen zor platform dalam eksperimen



(b) teknik pengambilan data eksperimen pengukuran fluks kalor

Gambar 3.13 Teknik pengukuran eksperimen fluks kalor dan temperatur pada model tipikal stasiun bawah tanah

3.2.3 Mekanisme Kalibrasi

Sebelum melakukan tahapan operasional dari masing-masing alat eksperimen untuk mengambil data penelitian, diperlukan proses kalibrasi untuk memastikan bahwa data yang didapat nantinya dari hasil pengukuran merupakan data yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan. Dalam eksperimen ini, proses kalibrasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kinerja, konsistensi, serta tingkat presisi dari sistem maupun alat-alat ukur yang digunakan dalam eksperimen. Proses kalibrasi ini tidak hanya dilakukan di saat pertama kali alat ukur digunakan, namun proses kalibrasi dilakukan secara periodik setiap kali pengambilan data akan dilakukan. Hal ini dikarenakan kondisi lingkungan dan sistem perangkat eksperimen yang dapat saja berubah setiap kali pengambilan data dilakukan sehingga akan berpengaruh juga terhadap standar kinerja dari alat ukur.

Dalam studi ini, alat ukur yang dilakukan kalibrasi hanya sensor temperatur (termokopel), perbedaan tekanan, dan obskurasi/densitas optik. Alat ukur fluks kalor

berbasis pendingin air telah tersertifikasi standar kalibrasi oleh perusahaan pembuatnya yang terlampir pada Lampiran III.

3.2.3.1 Kalibrasi Termokopel

Mekanisme kalibrasi termokopel tipe-K yang digunakan selama eksperimen dengan menggunakan termometer raksa sebagai kalibrator. Proses kalibrasi dilakukan pada temperatur uji berturut-turut 15, 20, dan 25°C dimana dilakukan pengambilan data pada termokopel dengan DAQ selama lima menit. Setelah itu, dilakukan perhitungan nilai deviasi/error yang terjadi dengan merata-ratakan hasil pengukuran setiap data temperatur uji dan ditentukan deviasi terhadap nilai rata-rata dan standar deviasi populasi terhadap jumlah data, $\sigma/(n)^{0.5}$. Dari data yang ada diplot sebuah kurva untuk memperoleh persamaan grafik yang akan dijadikan persamaan pengukuran termokopel pada eksperimen. Dengan probabilitas 99.7%, $\sigma = 3\sigma(x)$, ditentukan nilai deviasi yang baru dengan tujuan untuk memperoleh deviasi total. Kemudian, nilai deviasi total dijumlahkan untuk masing-masing pengukuran temperatur uji dan diperoleh seperti tabel 3.8.

Urutan	Termometer ©		Deviasi	Persamaan, $y = f(x)$	Data	$\Delta T \sigma_x =$ $\sigma/(n)^{0.5}$	Probabilitas (99.7 %) $\sigma = 3\sigma(x)$	Deviasi total
	raksa	termokopel				$\Delta T \sigma_x$	$\Delta T \sigma_x$	σ
1	15	15.210	0.046	1.001x-0.236	325	0.0026	0.0077	0.0190
	20	20.240	0.041	1.006x-0.324	326	0.0023	0.0068	0.0182
	25	25.200	0.050	1.007x-0.561	176	0.0038	0.0113	0.0227
					325			0.0599
2	15	15.380	0.027	0.9995x – 0.383	325	0.0015	0.0045	0.0159
	20	20.434	0.030	1.006x-0.324	326	0.0017	0.0050	0.0164
	25	25.388	0.032	1.005x-0.709	360	0.0017	0.0051	0.0164
								0.0487
3	15	13.910	0.031	1.1014x-0.881	325	0.0017	0.0052	0.0165
	20	18.860	0.025	1.006x-0.324	326	0.0014	0.0042	0.0155
	25	23.767	0.027	1.108x-1.21	360	0.0014	0.0043	0.0157
								0.0478
4	15	14.199	0.048	1.012x+0.636	325	0.0026	0.0079	0.0193

	20	19.127	0.043	1.006x-0.324	326	0.0024	0.0071	0.0185
	25	24.081	0.044	1.018x+0.315	360	0.0023	0.0070	0.0184
								0.0561
5	15	13.850	0.029	1.0098+1.013	325	0.0016	0.0048	0.0162
	20	18.800	0.024	1.006x-0.324	326	0.0013	0.0040	0.0154
	25	23.752	0.126	1.016x+0.695	360	0.0067	0.0200	0.0313
								0.0629
6	15	13.950	0.036	1.005x+0.974	325	0.0020	0.0059	0.0173
	20	18.940	0.028	1.006x-0.324	326	0.0015	0.0046	0.0160
	25	23.900	0.048	1.011x+0.655	360	0.0025	0.0075	0.0189
								0.0523
7	15	14.023	0.045	1.004x+0.901	325	0.0025	0.0075	0.0189
	20	19.023	0.032	1.006x-0.324	326	0.0018	0.0053	0.0166
	25	23.974	0.041	1.01x+0.58	360	0.0022	0.0065	0.0179
								0.0535
8	15	14.721	0.034	1.039x-0.318	325	0.0019	0.0057	0.0171
	20	19.597	0.026	1.006x-0.324	326	0.0014	0.0043	0.0156
	25	24.344	0.011	1.045x-0.643	360	0.0006	0.0018	0.0132
								0.0459
9	15	14.596	0.084	1.0388x-0.197	325	0.0046	0.0139	0.0253
	20	19.510	0.083	1.006x-0.324	326	0.0046	0.0138	0.0252
	25	24.221	0.042	1.045x-0.522	360	0.0022	0.0067	0.0181
								0.0686
10	15	15.941	0.028	1.102x-2.188	315	0.0016	0.0047	0.0161
	20	19.551	0.018	1.006x-0.324	305	0.0010	0.0031	0.0145
	25	24.901	0.063	1.108x-1.877	302	0.0036	0.0109	0.0223
								0.0529

3.2.3.2 Kalibrasi Sensor Beda Tekanan

Proses kalibrasi sensor tekanan dilakukan dengan mencari titik nilai 0 Pa pengukuran pada temperatur ruangan (27 °C) tanpa adanya sistem lain yang bekerja pada perangkat alat eksperimen. Dari hasil kalibrasi awal didapatkan bahwa karakteristik pengukuran tekanan pada kondisi temperatur ruangan adalah sebagai berikut:

- Rentang bacaan pengukuran : (-0,008)-(-0,01) Pa
- Nilai tengah bacaan pengukuran: (-0,009) Pa
- Kesalahan relatif : ±0,001 Pa

Dengan demikian, didapatkan bahwa kondisi 0 Pa pada pengukuran tekanan untuk sistem alat eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini berada pada nilai (-0,009)Pa. Dengan demikian, nilai beda temperatur yang didapatkan saat pengambilan data selama dilakukannya proses kebakaran terjadi dalam stasiun sebagai sampel uji akan ditambahkan dengan (-0,009) Pa.

3.2.3.3 Kalibrasi Sensor Densitas Optik

Proses kalibrasi sensor densitas penting dilakukan untuk mengetahui persamaan matematika umum dari perbandingan nilai intensitas awal (referensi) dengan nilai intensitas dari sampel kalibrasi, dimana dengan persamaan ini nantinya dapat dihitung nilai densitas optik dari asap hasil kebakaran pada *region* tertentu. Hal yang harus diperhatikan adalah pengaturan posisi jatuhnya sinar laser pada sensor cahaya fotodiode. Hal ini dikarenakan perbedaan letak jatuhnya sinar mempengaruhi hasil bacaan oleh sensor cahaya fotodiode sehingga percobaan dilakukan dengan sangat presisi dan hati-hati agar tidak ada perubahan posisi selama proses kalibrasi [70]. Sampel kalibrasi yang digunakan merupakan lima buah kaca dengan nilai densitas optik yang berbeda-beda, yaitu 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 dan 2, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.14.

Data yang diperoleh melalui sensor cahaya merupakan data analog. Sedangkan data yang ditampilkan di komputer merupakan data digital. Untuk mengubah data analog ke data digital diperlukan adanya ADC (*Analog to Digital Converter*). ADC merupakan salah satu fitur yang terdapat di *micro controller* ATmega 16 [70]. Tegangan *input* merupakan tegangan yang dihasilkan oleh perubahan intensitas cahaya yang diterima sensor fotodiode. Semakin besar intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode maka semakin kecil nilai tegangan *input*-nya, begitu pula sebaliknya. Sedangkan tegangan referensi merupakan tegangan masukan yang berasal dari mikrokontroler (+ 5volt). Rentang nilai bacaan dari sensor fotodiode adalah 0 – 1024 Candela.

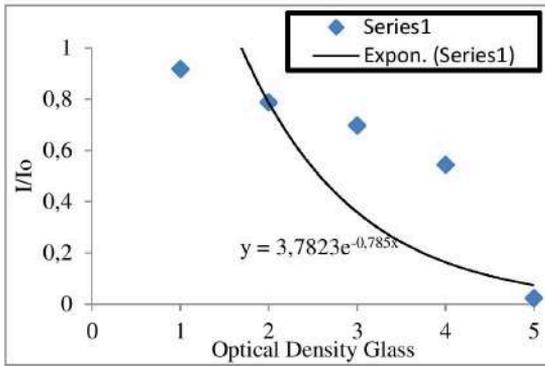


Gambar 3.14. Lima jenis kaca dengan nilai densitas optik yang berbeda-beda.

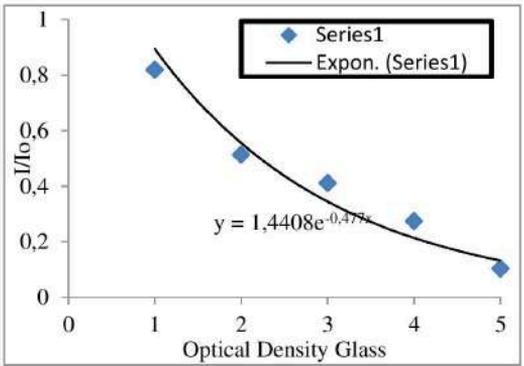
Nilai intensitas yang masuk ke sensor cahaya fotodiode tanpa adanya penghalang (kaca sampel kalibrasi) dianggap sebagai intensitas referensi (I_0) dan nilai intensitas cahaya yang masuk ke sensor cahaya fotodiode melalui kaca sampel kalibrasi dianggap sebagai intensitas pengukuran (I). Nilai I_0 dan I didapat dari hasil percobaan. Sedangkan nilai densitas optik didapat dari referensi kaca sampel kalibrasi yang telah dikalibrasi sebelumnya [70]. Hasil kalibrasi terhadap *belam detector* dapat dilihat pada tabel 3.9 dan gambar 3.15.

Tabel 3.9 Hasil Kalibrasi I_x dan I_0 untuk setiap OD Glass

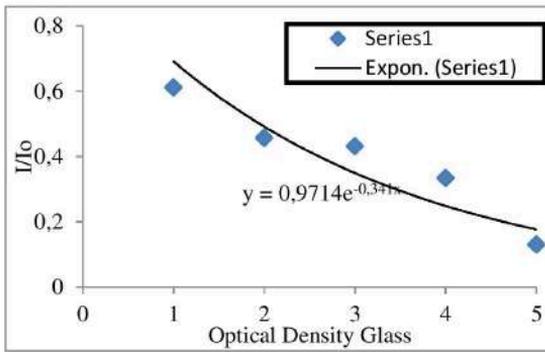
Sensor	Optical Density Glass, OD (ADC)					
	I_0	OD 0,1	OD 0,3	OD 0,5	OD 0,8	OD 2
	ADC	I	I	I	I	I
1	I/ I_0	0.917	0.786	0.697	0.543	0.022
	OD	0.038	0.104	0.157	0.266	1.662
2	I/ I_0	0.818	0.513	0.411	0.274	0.103
	OD	0.087	0.290	0.386	0.563	0.986
3	I/ I_0	0.610	0.456	0.431	0.333	0.130
	OD	0.214	0.341	0.365	-0.477	-0.887
4	I/ I_0	1	0.75	0.3	0.152	0.047
	OD	0	0.125	0.523	-0.818	1.33
5	I/ I_0	0.816	0.628	0.532	0.420	0.017
	OD	0.09	0.202	0.274	-0.376	1.77
6	I/ I_0	0.867	0.617	0.553	0.395	0.192
	OD	0.061	0.210	0.257	-0.403	-0.717
7	I/ I_0	0.845	0.615	0.604	0.415	0.018
	OD	0.073	0.211	-0.219	-0.382	1.740



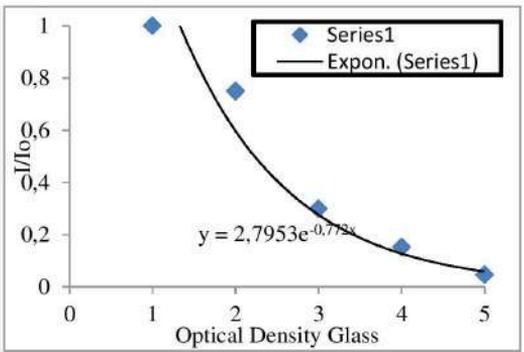
Sensor 1



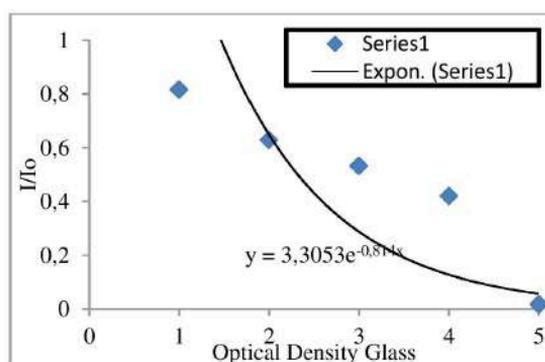
Sensor 2



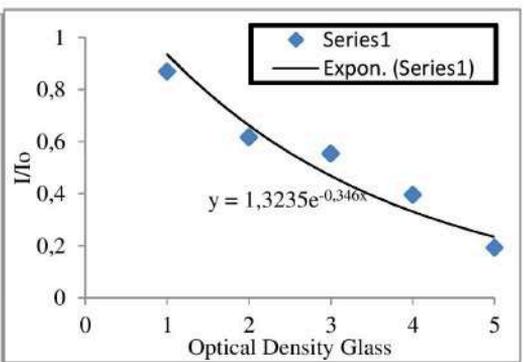
Sensor 3



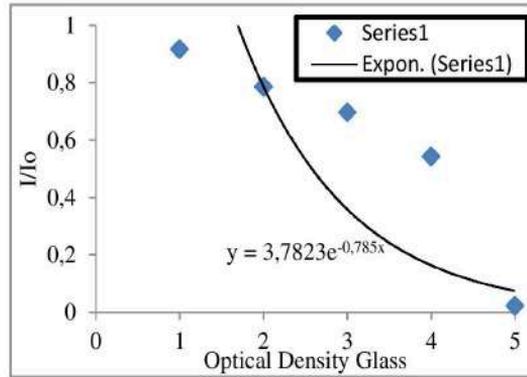
Sensor 4



Sensor 5



Sensor 6

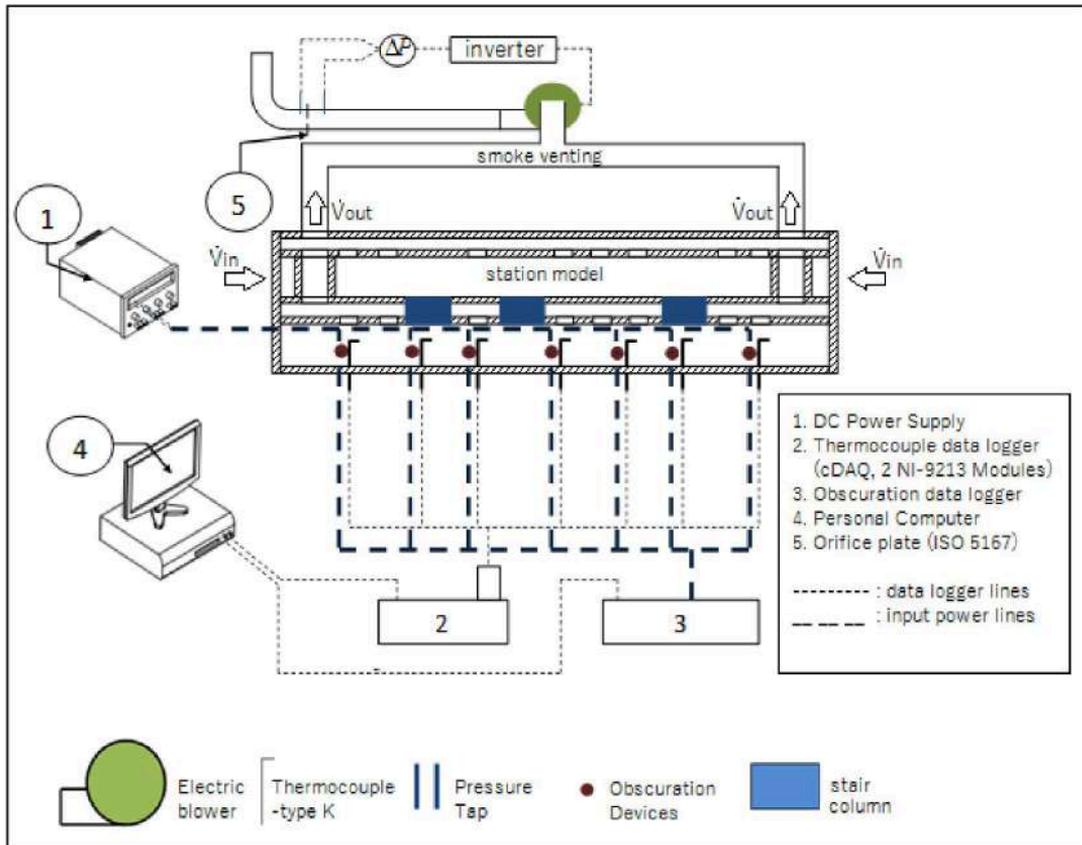


Gambar 3.15. Hasil persamaan kalibrasi sensor obskuras fotodioda untuk pengukuran densitas optik.

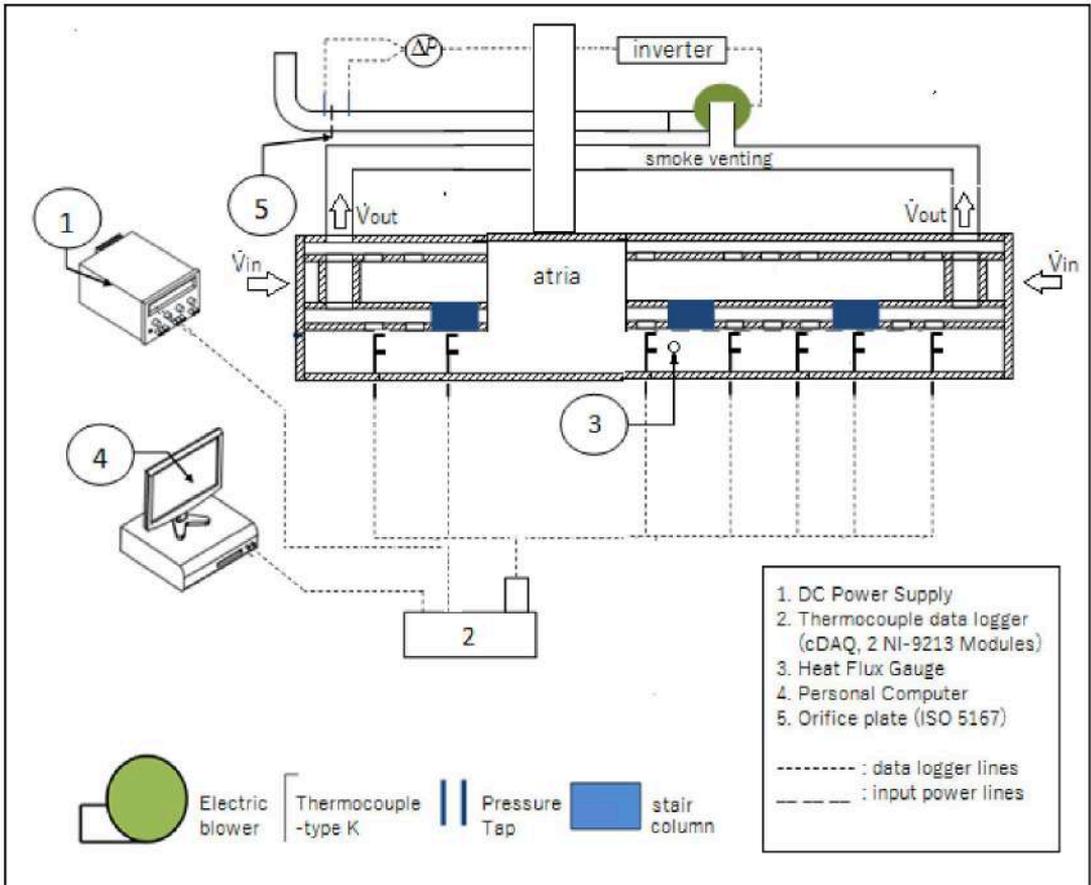
3.2.4 Konfigurasi Instrumen dan Pengukuran Eksperimen

Eksperimen kebakaran dilakukan setelah mengatur laju aliran udara pembuangan melalui ventilasi mekanik dan bukaan atrium ventilasi alami. Pengaturan laju aliran udara pembuangan dengan ventilasi mekanik dilakukan dengan mengubah nilai perbedaan tekanan yang terbaca pada alat ukur melalui pengaturan kapasitas blower pada *inverter* sedemikian sehingga menunjukkan nilai sesuai dengan laju volumetrik tertentu. Sementara itu, pengaturan ventilasi alami dilakukan dengan menempatkan bukaan di atas atrium sesuai dengan variasi S/H .

Eksperimen dilakukan dengan tiga pengukuran *real time*, yaitu temperatur, obskuras, dan fluks kalor dengan total eksperimen adalah 35 kali pengambilan data. Eksperimen dilakukan pada kondisi kelembaban lingkungan, RH = 75-95% dan temperatur antara 24-27°C yang dicatat setiap kali eksperimen. Skema pengukuran dan instrumentasi eksperimen digambarkan pada gambar 3.16.



(a) Perancangan eksperimen aspek keselamatan kebakaran dalam manajemen asap kebakaran melalui konfigurasi ventilasi pada model tipikal stasiun metro bawah tanah



(b) Perancangan eksperimen luks kalor dan perpindahan kalor konveksi oleh panas kebakaran pada model tipikal stasiun bawah tanah

Gambar 3.16 Skema perancangan eksperimen

3.3 Prosedur Eksperimen

Studi eksperimental dinamika asap kebakaran pada Stasiun Metro Bawah Tanah dilakukan melalui tiga prosedur penelitian, yaitu prosedur praeksperimen, eksperimen, dan pascaeksperimen. Adapun urutan proses eksperimen hingga menghasilkan data yang akan diolah dilakukan sebagai berikut.

3.3.1 Prosedur Praeksperimen

Adapun prosedur praeksperimen yang dilakukan adalah:

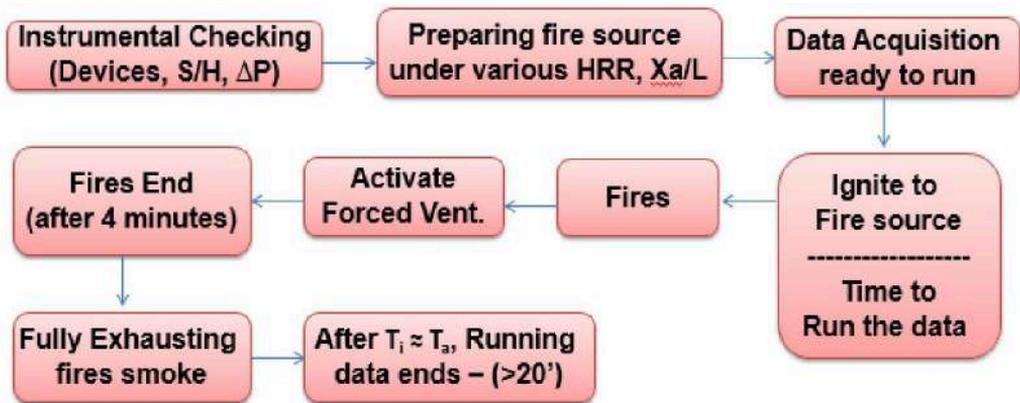
1. Menggunakan alat pelindung diri, seperti masker, sarung tangan, dan sepatu dalam mengupayakan keselamatan sebagai hal terpenting sebelum melakukan eksperimen.
2. Mempersiapkan alat ukur, data akuisisi, dan unit *display* pengambilan data selama eksperimen berlangsung. Berikut tabel 3.9 yang menjelaskan kebutuhan sensor, data akuisisi dan unit *display* selama eksperimen berlangsung.
3. Melakukan instalasi alat ukur, data akuisisi dan unit *display*. Kemudian, dilakukan pemeriksaan apakah sensor ukur dan modul sudah terhubung dengan baik. Untuk sensor beda tekanan diperlukan pengaturan ΔP (kPa) mengikuti rancangan pemodelan simulasi dengan analisis dimensional.
4. Melakukan kalibrasi alat ukur.
5. Mempersiapkan sampel sebagai sumber kebakaran dan pemantik.
6. Menentukan lokasi kebakaran seperti gambar 3.9.
7. Melakukan karakterisasi awal eksperimen dan pembacaan alat ukur sebelum pengambilan data untuk melihat apakah semua sistem telah bekerja dengan baik, mencegah kesalahan pengukuran dan agar hasil diperoleh dapat valid dan sesuai dengan prediksi pada pemodelan simulasi.

3.3.2 Prosedur Eksperimen

Sistematika proses eksperimen yang dilakukan sebagai berikut:

- a. Mengecek pembacaan termokopel, mengecek pembacaan skala pada inverter *blower* sudah siap pada persentase yang ditentukan sesuai kapasitas yang akan digunakan, mengecek kebersihan kaca jendela zona *platform* untuk pengukuran densitas optik, dan meyakinkan seluruh sensor sudah terpasang dengan baik.
- b. Mempersiapkan sumber kebakaran dan ventilasi alami dan kemudian ditempatkan sesuai ketentuan variasi yang dilakukan.
- c. Mempersiapkan *stopwatch* dan pemantik bahan bakar.

- d. Melakukan pengaturan mode siap untuk dilakukan penyimpanan data eksperimen
- e. Ketika penyalaan dilakukan dan sampel sumber kebakaran dibakar, *stopwatch* dimulai dan penghitungan aktivasi *blower* dimulai. Inverter *blower* akan aktif sesuai dengan laju produksi kalor yang tertera pada tabel 3.6 untuk skala pemodelan. Bersamaan dengan penyalaan dilakukan, pengambilan data temperatur dan densitas optik sudah dapat dimulai.
- f. Ketika sudah mencapai detik aktivasi ventilasi mekanik, *blower* siap dinyalakan sebagai proses pembuangan asap.
- g. Biarkan proses pengambilan data berlangsung hingga temperatur dan densitas optik menuju angka stabil atau menuju kondisi semula.



Gambar 3.17 Skematik proses pengambilan data eksperimen

Dalam eksperimen ini setidaknya dibutuhkan tiga orang, seperti pada gambar 3.18 dimana satu orang bertugas menyalakan sumber kebakaran, satu orang melihat bahwa bahan bakar sudah terbakar yang berarti proses pengambilan data dimulai, dan satu orang untuk mengaktifkan mode penyimpanan data densitas optik dan temperatur. Proses pengambilan data eksperimen ini dapat dilihat pada gambar 3.17.



Gambar 3.18 Proses eksperimen ini setidaknya membutuhkan tiga orang dengan tugasnya masing-masing.

3.2.3 Prosedur Pascaeksperimen

Prosedur pascaeksperimen mencakup semua metode yang dilakukan setelah berakhirnya suatu proses eksperimen, baik berupa persiapan alat untuk pengujian kembali maupun proses penonaktifan seluruh komponen alat eksperimen yang digunakan.

1. Memastikan bahwa semua data hasil pengukuran telah tersimpan dalam satu folder di dalam komputer dan siap untuk diolah setelah semua rangkaian eksperimen selesai dilakukan.
2. Kemudian, dilakukan pembersihan kaca pada zona *platform* yang digunakan untuk sensor densitas optik.
3. *Blower* dan *inverter* yang pengaturannya ada pada panel kontrol juga dimatikan dengan memutar sakelar pada posisi “*off*”.
4. Setelah itu angkat perangkat wadah bahan bakar dari dalam *platform* dan matikan semua aliran arus ke instrumen penelitian. Kemudian dilakukan pembersihan wadah bahan bakar agar siap digunakan pada eksperimen selanjutnya.
5. Merapikan modul data akuisisi kembali pada tempatnya.

6. Melakukan pengecekan terhadap semua kondisi perangkat eksperimen untuk memastikan bahwa semua komponen alat masih berada dalam kondisi baik untuk digunakan kembali.

Apabila eksperimen tidak akan dilanjutkan segera setelah eksperimen sebelumnya dilakukan, maka periksa semua terminal listrik yang digunakan untuk memastikan bahwa suplai listrik ke semua alat eksperimen telah dimatikan dan cabut kabel USB yang menghubungkan mikrokontroler ATmega 16 (komponen yang terhubung dengan sensor obskurasasi) dengan komputer. Selanjutnya mencabut data akuisisi temperatur (DAQ NI 9213) dan NI cDAQ - 9174 untuk menjaga keawetan dari alat data akuisisi yang digunakan.

BAB 4

Pengolahan Data dan Analisis

Setelah melakukan eksperimen dan pemodelan simulasi numerik dengan berbagai variasi pengukuran, dilakukan analisis terkait pengaruh manajemen asap berbasis konfigurasi ventilasi terhadap kriteria-kriteria keselamatan kebakaran. Ada dua hal yang perlu dipertimbangkan, yaitu analisis efektivitas konfigurasi ventilasi dan aspek-aspek keselamatan kebakaran, seperti visibilitas ketinggian lapisan asap, obskurasi, distribusi temperatur, distribusi jelaga asap, dan fluks kalor. Oleh karena itu, dalam studi ini akan dibahas tiga poin utama, yakni analisis performa konfigurasi ventilasi dalam manajemen asap, analisis parameter aspek keselamatan kebakaran, dan kondisi transien perpindahan kalor konveksi pada zona *platform*.

Sebagian besar data ditampilkan melalui analisis nondimensional. Analisis nondimensional digunakan untuk melihat pengaruh parameter keselamatan kebakaran agar berlaku dalam kondisi umum untuk desain stasiun model tipikal dengan dengan disertai atrium. Persamaan analisis nondimensional [71] terdapat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter dan Analisis Nondimensional [71]

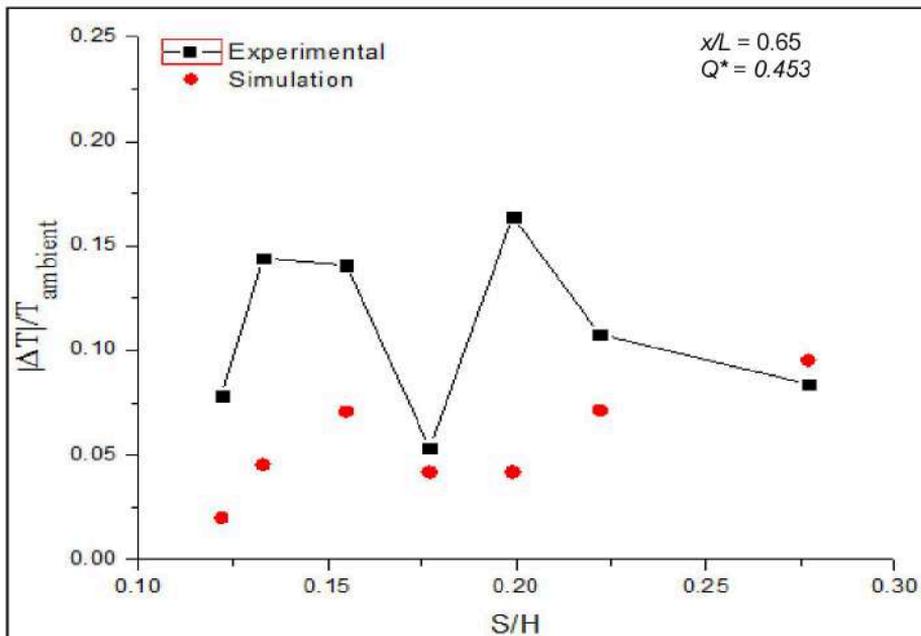
No.	Parameter	Analisis Nondimensional
1.	Waktu	$\tau = \frac{t g^{1/2} H^{3/2}}{A}$
2.	Laju volumetrik pembuangan asap	$\dot{V}^* = \frac{\dot{V}}{g^{1/2} \dot{Q}^* H^{5/2}}$
3.	Laju produksi kalor (HRR)	$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} H^{5/2} g^{1/2}}$
4.	Peningkatan temperatur lapisan asap	$\Delta T^* = \frac{\Delta T}{T_{\infty} \dot{Q}^{*2/3}}$
5.	Tinggi lapisan asap	$y = \frac{z}{H}$
6.	Kecepatan aliran arah horizontal	$v^* = \frac{v}{(gh)^{1/2}} = v / \left[\frac{\dot{Q}_c g}{r \rho_a c_p T_a} \right]^{1/3}$

Dalam studi ini, kondisi kebakaran dikondisikan pada skenario terburuk yang berlokasi pada $x/L = 0.65$ dengan laju produksi kalor, $Q^* = 0.453$ pada desain eksisting dengan kondisi laju volumetrik ventilasi, $V^* = 0.432$ dan perimeter bukaan atrium ventilasi alami, $S/H = 0.177$. Analisis yang dilakukan berfokus pada manajemen asap kebakaran dalam Stasiun Metro Bawah Tanah dari hasil eksperimen dan simulasi numerik yang dilakukan. Manajemen asap kebakaran ditinjau dari masing-masing variasi konfigurasi sistem ventilasi (ventilasi mekanik, alami, dan *hybrid*), posisi sumber kebakaran, dan laju produksi kalor terhadap keselamatan kebakaran.

4.1 Performa Konfigurasi Ventilasi dalam Manajemen Asap Kebakaran

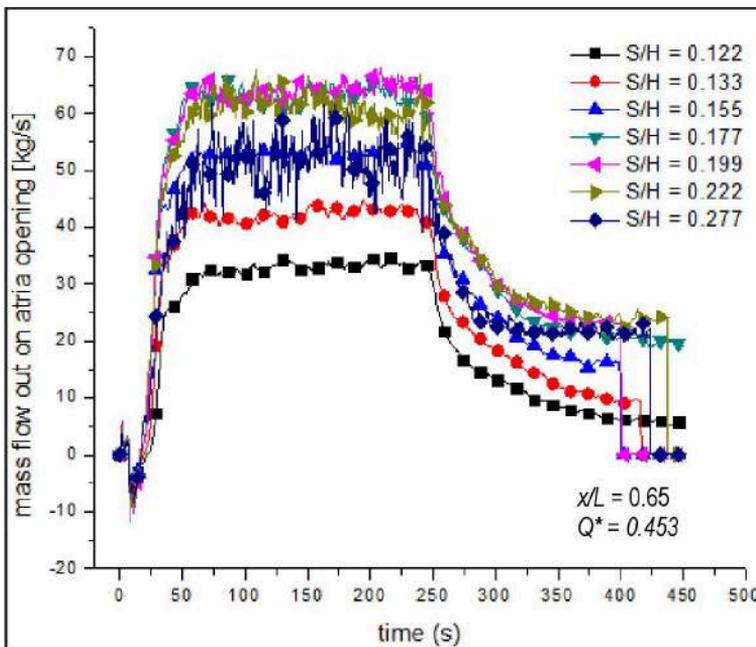
Dalam analisis performa konfigurasi ventilasi, meliputi analisis efektivitas pembuangan, laju alir massa pada bukaan ventilasi, dan fenomena *plug-holing* untuk ventilasi alami dan mekanik.

4.1.1 Analisis Efektivitas Pembuangan Asap Kebakaran



Gambar 4.1 Perbedaan temperatur sepanjang bukaan atrium dalam variasi perimeter bukaan atrium, S/H .

Gambar 4.1 menunjukkan nilai perbedaan temperatur pada ventilasi alami terlihat memiliki kondisi yang berbeda-beda untuk setiap variasi S/H . Hasil eksperimen memberikan *trend* yang lebih tinggi karena dipengaruhi kondisi lingkungan. Semakin besar nilai perbedaan temperatur, memberikan efek semakin baik dalam pembuangan asap melalui bukaan atrium ventilasi alami. Nilai perbedaan temperatur tidak dapat diprediksi akan menunjukkan *trend* yang linear terhadap peningkatan S/H karena belum tentu hasil pembakaran yang terbang dengan persentase asap lebih tinggi terhadap persentase udara. Dengan demikian, nilai optimum untuk S/H yang digunakan harus dilihat berdasarkan nilai laju alir massa yang terbang.



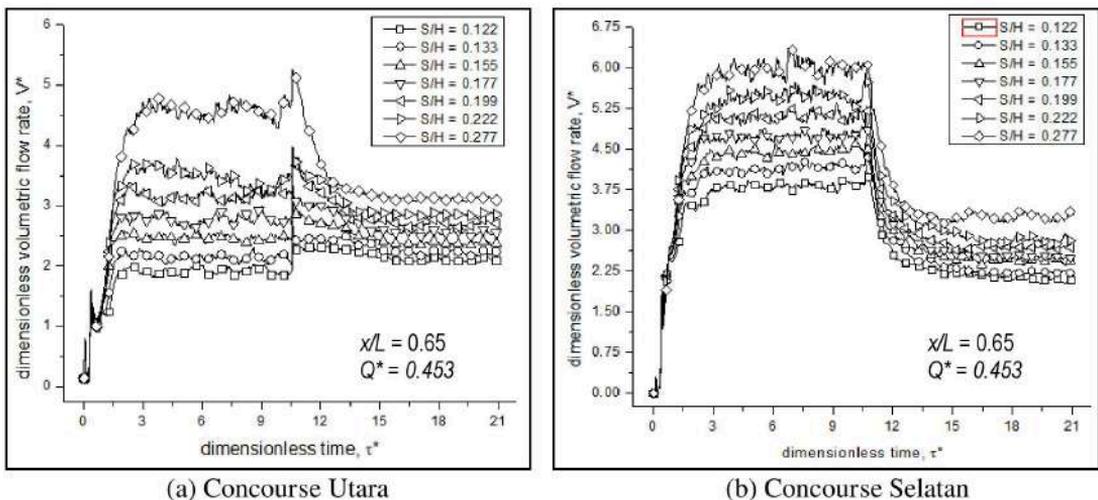
Gambar 4.2 Laju alir massa yang dikeluarkan melalui bukaan atrium ventilasi alami dengan variasi S/H

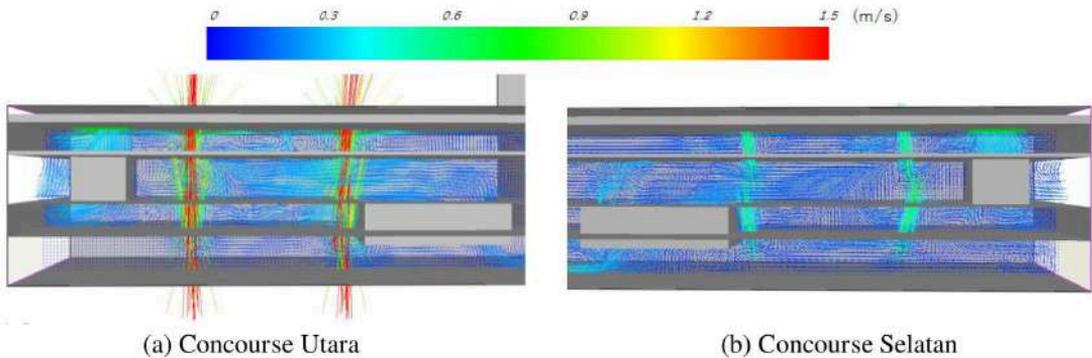
Gambar 4.2 menunjukkan laju alir massa hasil pembakaran yang terbang melalui ventilasi alami terhadap variasi S/H . Kondisi optimum pembuangan terjadi pada kondisi S/H yang memiliki kecenderungan konstan (tidak ada pulsasi/amplitudo yang terjadi relatif kecil untuk nilai tertentu) dan mencapai nilai maksimum selama kebakaran terjadi, yaitu $S/H = 0.177$ atau 0.199 . Efek pulsasi ketika proses

pembuangan asap hanya terjadi pada kondisi $S/H = 0.277$. Efek ini terjadi akibat pengaruh perlawanan laju alir massa ventilasi mekanik sehingga membentuk pola fluktuatif. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa sistem konfigurasi atrium dan ventilasi alami yang terpasang sudah memenuhi kriteria untuk mengurangi efek pulsasi dan efektivitas pembuangan.

4.1.2 Analisis Laju Alir Pembuangan Asap pada Ventilasi Alami

Gambar 4.3 menunjukkan laju aliran udara yang masuk melalui bukaan zona *concourse* dimana hanya melalui zona inilah udara lingkungan masuk untuk kebutuhan ventilasi. Hasil menunjukkan bahwa pola aliran pada *concourse* utara dan selatan berbeda. Ketika proses kebakaran laju alir udara yang masuk melalui *concourse* selatan lebih dominan dari *concourse* utara akibat posisi sumber kebakaran yang dekat dengan *concourse* selatan. Akan tetapi ketika padam, laju aliran udara masuk pada *concourse* utara dan *concourse* selatan menunjukkan batas nilai yang sama karena pengaruh faktor kebakaran sudah tidak terjadi lagi.

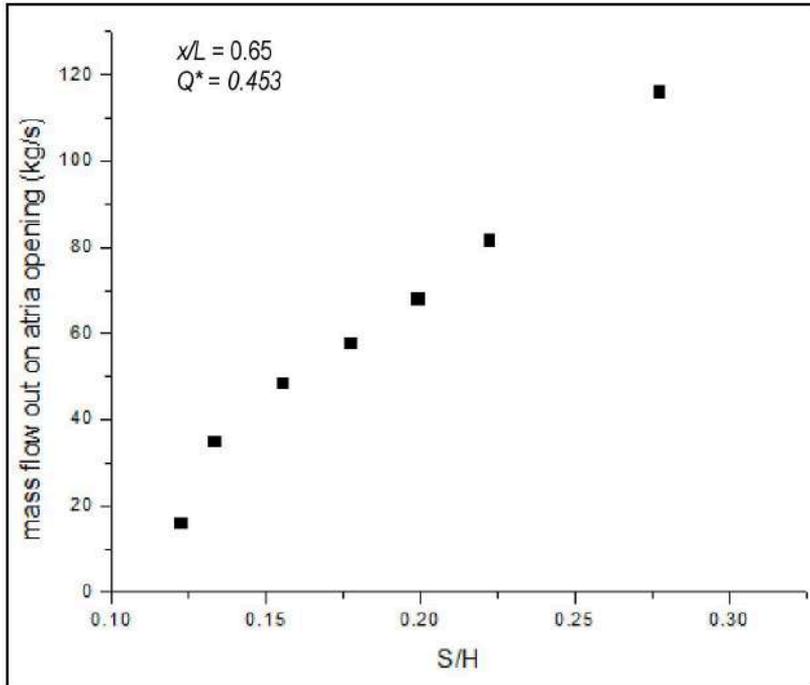




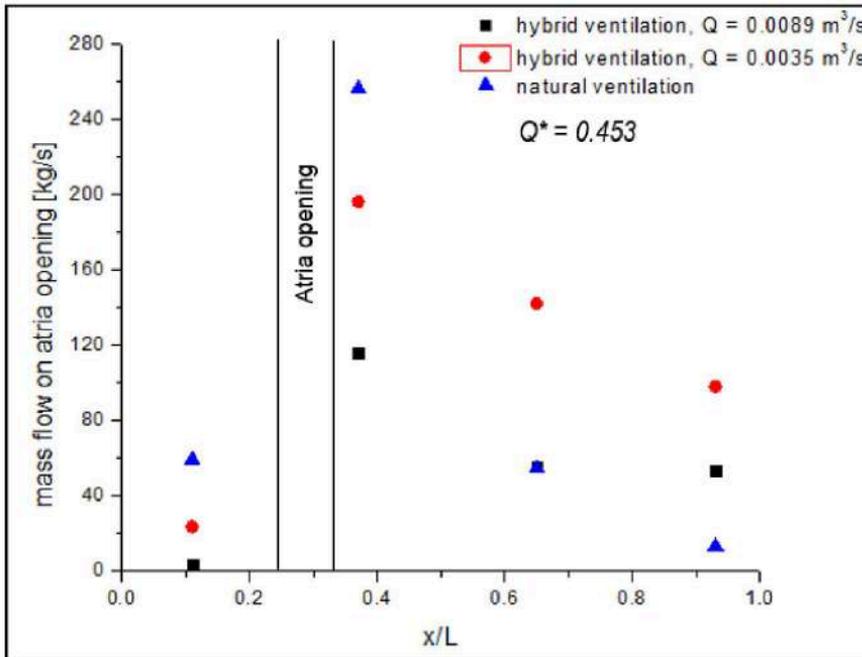
Gambar 4.3 Laju aliran volumetrik aliran udara masuk pada bukaan zona *concourse* untuk variasi S/H dengan visualisasi vektor aliran udara.

Gambar 4.4 menunjukkan laju pelepasan asap kebakaran rata-rata yang terjadi selama kebakaran pada $x/L = 0.65$ menghasilkan *trend* grafik yang linear terhadap variasi S/H . Dengan demikian semakin besar S/H maka laju aliran akan semakin besar. Peningkatan laju aliran yang dilepaskan tidak menunjukkan efektivitas ventilasi alami, karena memungkinkan terjadinya efek *plug-holing*. Efek ini terjadi ketika persentase udara dan asap yang dilepaskan lebih dominan udara kompartemen sehingga asap akan turun pada level tertentu. Penurunan asap ini akan membahayakan ketika proses evakuasi. Oleh karena itu, fenomena *plug-holing* menjadi hal yang harus dicegah dan diperlukan informasi kondisi kritis terkait laju aliran volumetrik agar tidak terjadi hal tersebut.

Gambar 4.5 menunjukkan laju aliran massa asap yang keluar melalui bukaan atrium pada berbagai konfigurasi ventilasi. *Trend* yang dihasilkan menunjukkan semakin jauh dari atrium, akan berpengaruh terhadap laju aliran massa yang dilepaskan. Sementara itu, dengan adanya pengaruh keberadaan ventilasi mekanik pada ventilasi *hybrid*, akan menyebabkan penurunan laju aliran massa pembuangan asap.



Gambar 4.4 Laju pelepasan asap kebakaran rata-rata terhadap variasi S/H



Gambar 4.5 Laju aliran massa keluar melalui bukaan atrium pada berbagai konfigurasi ventilasi

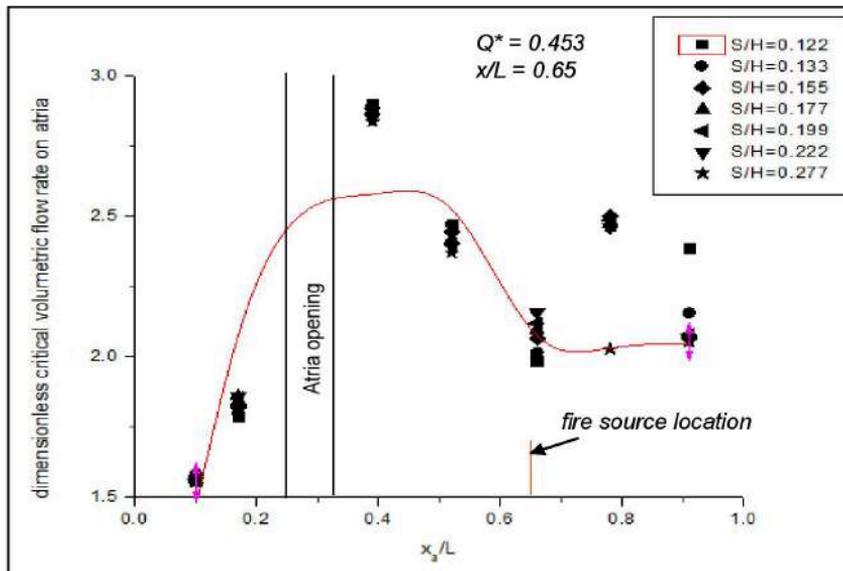
4.1.3. Analisis Fenomena *Plug-holing* pada Bukaannya Atrium dan Ventilasi Mekanik

Untuk mengetahui apakah sistem pembuangan asap sudah efektif dengan pengaruh keberadaan ventilasi mekanik dan alami melalui bukaan atrium dalam stasiun bawah tanah dilakukan analisis fenomena *plug-holing*. Fenomena ini dikenal dengan penurunan ketinggian asap pada zona kebakaran akibat terjadinya peningkatan kecepatan pembuangan pada ventilasi. Hal ini akan membuat pembuangan asap menjadi tidak efektif dan akses udara bersih akan terganggu.

Fenomena *plug-holing* dapat dicegah dengan menerapkan sistem pembuangan asap melalui ventilasi mekanik dengan kondisi tunak/*steady*. Karena ketinggian lapisan asap meningkat, gaya apung lapisan asap akan meningkat sehingga akan mengurangi efek *plug-holing*. Gaya utama yang bekerja ketika terjadi *plug-holing* adalah gaya kinetik sistem pembuangan (*fan*) dan gaya apung lapisan asap. Ketika gaya kinetik dominan, fenomena *plug-holing* akan terjadi, dan sebaliknya ketika gaya apung yang dominan maka tidak akan terjadi *plug-holing*. Gaya kinetik bergantung pada laju volumetrik sistem pembuangan asap, sedangkan gaya apung bergantung pada temperatur dan ketinggian lapisan asap. Ketika gaya-gaya ini seimbang pada sisi masuk sistem pembuangan, aliran pada sisi masuk akan mencapai maksimum tanpa terjadinya *plug-holing*. *Plug-holing* dapat dicegah dengan menggunakan sejumlah pembuangan asap sehingga laju aliran pada setiap sisi masuk berada di bawah atau pada kondisi maksimum [72]. Untuk mengetahui kriteria *plug-holing*, digunakan metode pengukuran laju volumetrik kritis pembuangan asap dan rasio ketebalan asap terhadap perimeter bukaan atrium. Hal ini sesuai dengan rumus yang diberikan pada persamaan (2.32) dan (2.33). Dalam pembahasan ini, fenomena *plug-holing* akan dikaji pada sistem ventilasi paksa yang berbasis *fan* dan alami melalui bukaan atrium untuk sistem konfigurasi ventilasi paksa, *hybrid*, dan mekanik.

4.1.3.1 Analisis Fenomena *Plug-holing* pada Bukaannya Atrium

Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh lokasi titik ukur terhadap laju volumetrik kritis yang terjadi sepanjang *platform* ketika kebakaran terjadi pada $x/L = 0.65$. Grafik ini menggambarkan titik-titik kritis sebelum terjadinya efek *plug-holing*. Dengan demikian, setiap variasi S/H tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap titik laju aliran kritis karena memberikan *trend* dengan nilai yang hampir sama. *Trend* grafik ini juga menunjukkan kecenderungan setiap lokasi terjadinya efek *plug-holing* akibat distribusi temperatur dan ketinggian lapisan asap yang berbeda-beda untuk lokasi kebakaran pada $x/L = 0,65$. Daerah yang dekat dengan lokasi kebakaran akan memberikan pengaruh terjadinya *plug-holing* yang berpeluang sama karena distribusi temperatur dan ketinggian lapisan asap daerah ini cukup tinggi. Hal ini karena pengaruh bukaan atrium sebagai ventilasi alami kurang optimum dibandingkan dengan ventilasi mekanik. Sedangkan, untuk lokasi yang semakin dekat dengan atrium akan memberikan titik laju volumetrik pembuangan asap kritis yang relatif tinggi akibat pengaruh bukaan atrium sehingga lapisan asap dan distribusi tekanan relatif rendah. Dengan demikian, perlu dipertahankan laju aliran yang terjadi pada batas maksimum terhadap variasi S/H tertentu.

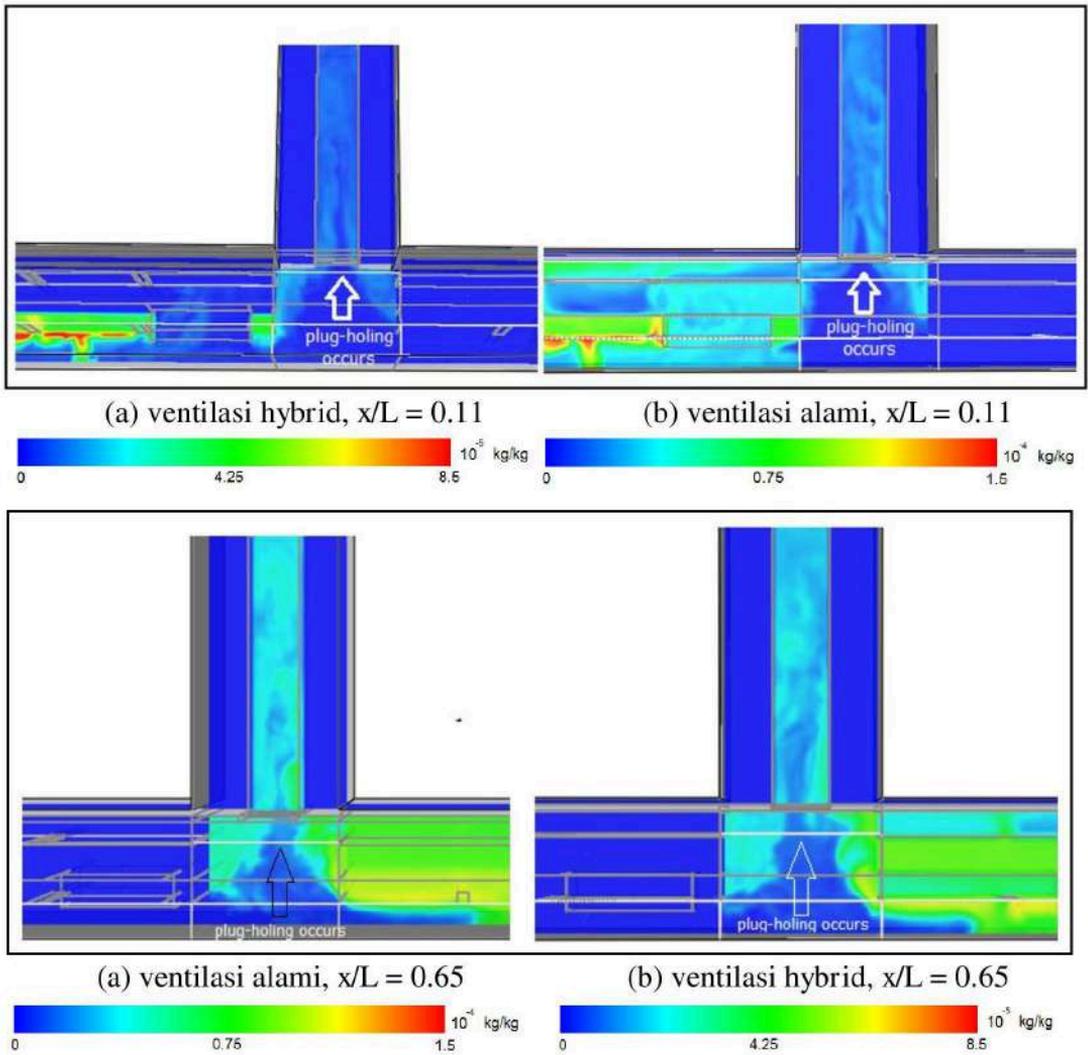


Gambar 4.6 Pengaruh distribusi temperatur sepanjang platform terhadap laju aliran volumetrik pembuangan asap kritis pada variasi S/H

Visualisasi efek *plug-holing* dalam model stasiun bawah tanah ini dapat dilihat pada gambar 4.7. Gambar 4.7 menjelaskan bahwa dari konfigurasi ventilasi alami dan *hybrid* masih memungkinkan terjadinya efek *plug-holing* akibat besar kebakaran yang terjadi. Hal ini dikarenakan laju produksi asap pada bukaan atrium lebih kecil dari laju ventilasi yang terjadi. Ventilasi *hybrid* memberikan kemungkinan yang cukup besar terjadinya *plug-holing* akibat keberadaan ventilasi mekanik. Dengan adanya ventilasi mekanik, akses udara luar yang masuk ke kolom tangga akan semakin besar dan terbawa menuju *inlet* ventilasi mekanik sehingga efek bukaan atrium kurang dapat dirasakan. Ditambah lagi akibat pengaruh *fire barrier* membuat asap sebagian besar akan terjadi aliran balik dan aliran kalor tidak dapat dikendalikan sepenuhnya menuju ventilasi alami. Dengan demikian, massa jelaga asap yang terbuang melalui bukaan atrium semakin kecil sehingga gaya yang dominan adalah gaya kinetik yang akan menimbulkan *plug-holing* pada bukaan atrium. Pengaruh ventilasi mekanik ini terhadap fenomena *plug-holing* lebih lanjut akan dibahas pada bagian khusus.

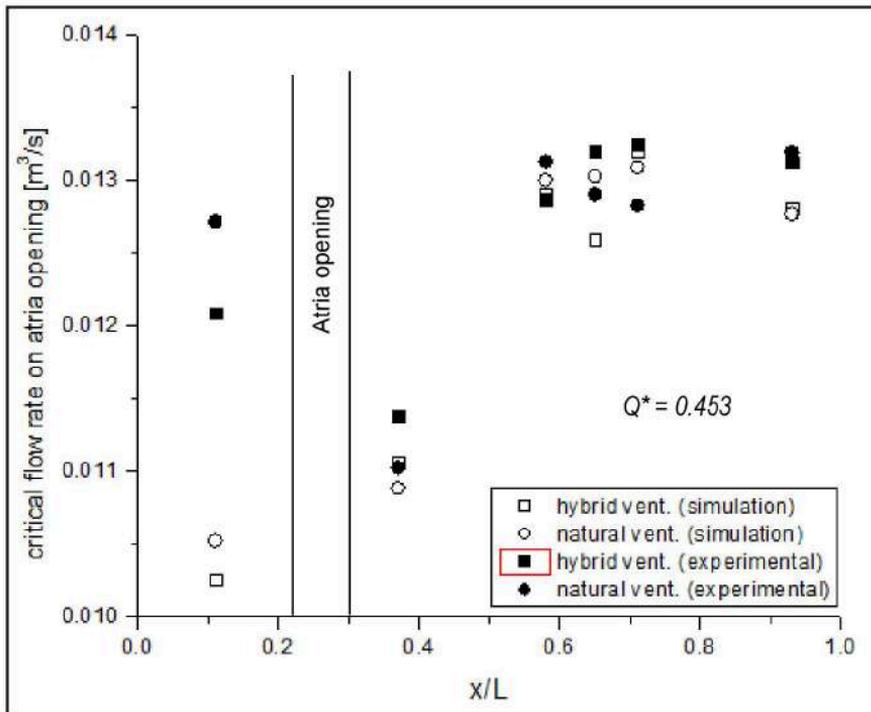
Sedangkan, sistem ventilasi alami membuat gaya *buoyancy* semakin meningkat dan aliran kalor banyak yang masuk ke dalam saluran udara ventilasi mekanik dan terjebak di dalamnya. Hal ini diakibatkan pengaruh atrium yang terlalu jauh, *fire barrier*, dan aliran udara luar yang berasal dari bukaan *concourse* yang menciptakan turbulensi asap sehingga asap terjebak dengan temperatur rendah. Hal ini berakibat aliran kalor akibat keberadaan ventilasi alami menjadi kurang optimum sehingga laju volumetrik pembuangan asap sebagian besar diisi oleh udara kompartemen (*entrained air*).

Fenomena *plug-holing* yang terjadi dalam atrium tidak akan menyebar ke dalam *platform* atau *concourse* karena ketinggian lapisan asap dalam atrium di atas level 0.12m atau di atas 3m untuk skala penuh. Dengan demikian, fenomena *plug-holing* dalam studi ini tidak membahayakan evakuasi. Selain memang ketinggian lapisan asap yang lebih dari 0.12, juga aliran ventilasi akan mendorong menuju bukaan atrium sehingga tidak akan masuk ke dalam zona *platform*.



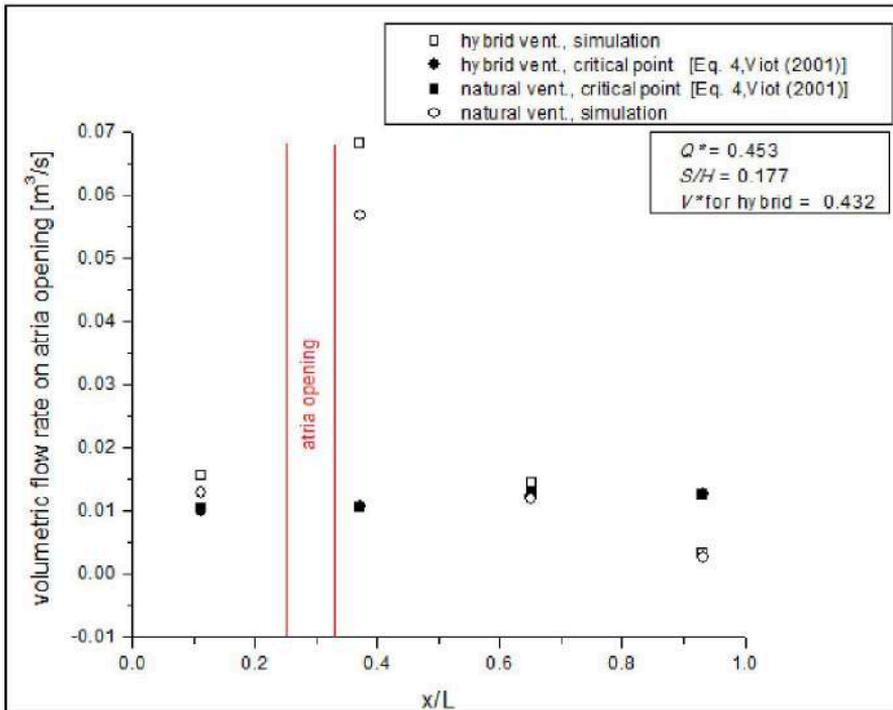
Gambar 4.7 Visualisasi fraksi massa jelaga yang terbentuk untuk fenomena plug-holing pada bukaan atrium dengan variasi konfigurasi ventilasi ketika kebakaran terjadi pada $x/L = 0.11$ dan $x/L = 0.65$

Pengaruh lokasi kebakaran terhadap laju aliran volumetrik pembuangan asap kritis pada bukaan atrium dengan variasi konfigurasi dengan pendekatan empiris menurut Viot (2001) [44] dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Pengaruh lokasi sumber kebakaran terhadap laju alir volumetrik kritis untuk kondisi ventilasi alami dan *hybrid* menurut Viot *et.al* (2001) [44].

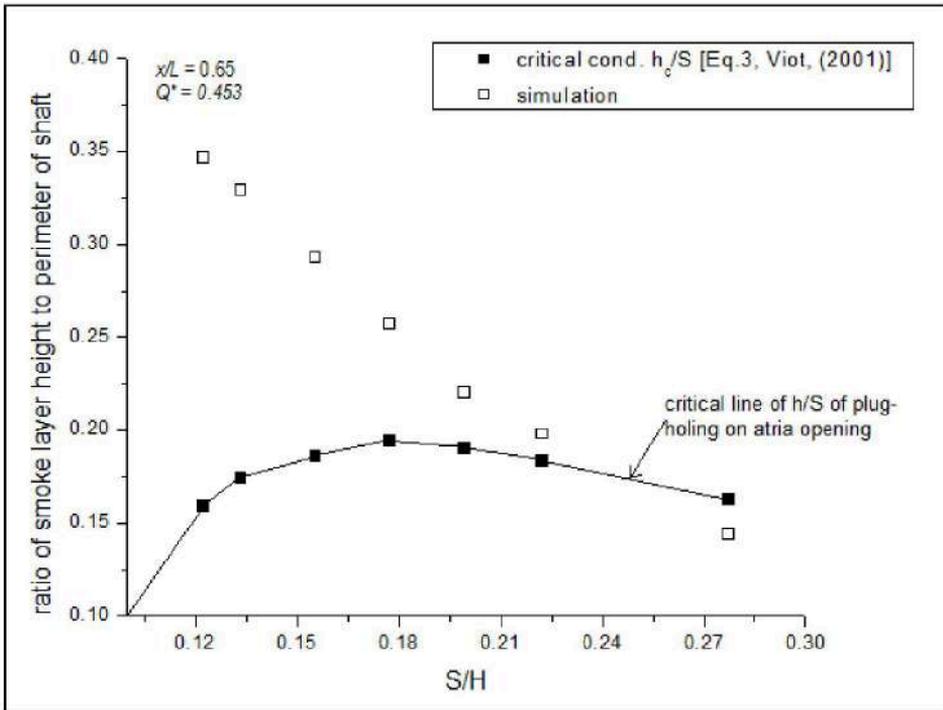
Trend grafik menggambarkan hasil eksperimen dan hasil simulasi memiliki korelasi yang baik. Hal ini dapat disimpulkan bahwa untuk lokasi kebakaran pada $x/L > 0.5$ akan memberikan kisaran laju aliran kritis yang mendekati konstan pada level $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$ dan untuk lokasi kebakaran $x/L < 0.4$ memberikan kisaran laju aliran volumetrik kritis pada level $0.011 < x < 0.013$. Oleh karena itu, untuk menghindari efek *plug-holing* dengan kondisi kebakaran terburuk tidak diperbolehkan laju aliran volumetrik pembuangan asap lebih dari $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ untuk skala pemodelan.



Gambar 4.9 Perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek *plug-holing* dalam model eksperimen menurut analisis laju volumetrik bukaan ventilasi alami.

Untuk mengetahui apakah telah terjadi fenomena *plug-holing* dalam pemodelan stasiun pada studi ini dapat dilihat pada gambar 4.9. Hasil pendekatan empiris dengan hasil simulasi memberikan informasi bahwa untuk lokasi kebakaran hingga $x/L = 0.65$ telah terjadi fenomena *plug-holing*. Hal ini ditunjukkan oleh laju volumetrik pembuangan asap yang terjadi melalui bukaan atrium pada simulasi telah melebihi kriteria laju volumetrik kritis menurut pendekatan empiris. Selain itu, dapat dikatakan bahwa hanya lokasi $x/L > 0.65$ sistem ventilasi yang dominan bekerja adalah sistem ventilasi mekanik dibandingkan dengan pengendalian asap menuju ventilasi alami. Dengan demikian, ukuran perimeter bukaan ventilasi alami, S/H yang terpasang memberikan efek gaya kinetik yang lebih besar dibandingkan gaya *bouyancy* akibat perkembangan lapisan asap. Untuk itu, perlu ditinjau kembali pengaruh ukuran perimeter, S/H bukaan ventilasi alami terhadap ketebalan asap yang

terjadi dalam mengetahui efektivitas pembuangan asap kebakaran dalam zona *platform*.

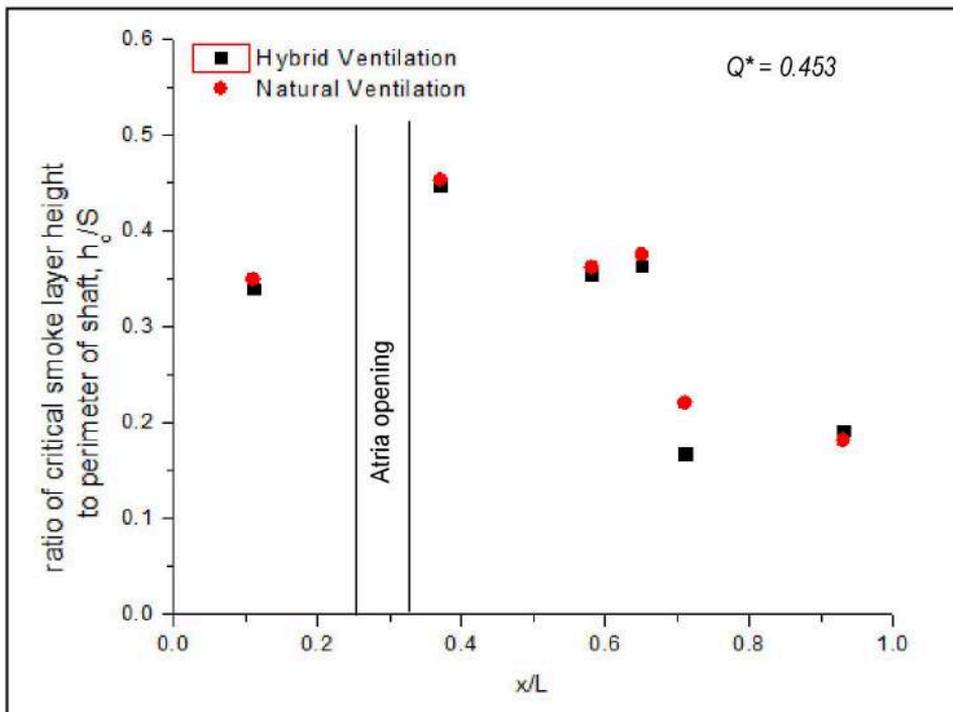


Gambar 4.10 Perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek *plug-holing* dalam model eksperimen menurut analisis ketinggian lapisan asap untuk setiap variasi bukaan atrium, S/H .

Dalam pembahasan sebelumnya diperoleh hasil bahwa dibutuhkan peninjauan kembali terkait ukuran perimeter bukaan ventilasi alami yang tepat untuk mengatasi ketidakefektifan pembuangan asap. Hal ini sangat dibutuhkan untuk mempercepat pengendalian asap kebakaran di zona *platform* agar lapisan asap dapat dikendalikan secepat mungkin sebelum mencapai level tidak aman di bawah 2m. Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek *plug-holing* dalam model eksperimen menurut analisis ketinggian lapisan asap untuk setiap variasi bukaan atrium, S/H pada $x/L = 0.65$. Dapat dijelaskan bahwa kurva yang dibentuk titik-titik kritis oleh persamaan empiris [44] memiliki nilai maksimum pada $S/H = 0.177$. Nilai ini menunjukkan bahwa ukuran perimeter, $S/H = 0.177$ memberikan titik kritis yang lebih tinggi sehingga peluang terjadinya *plug-*

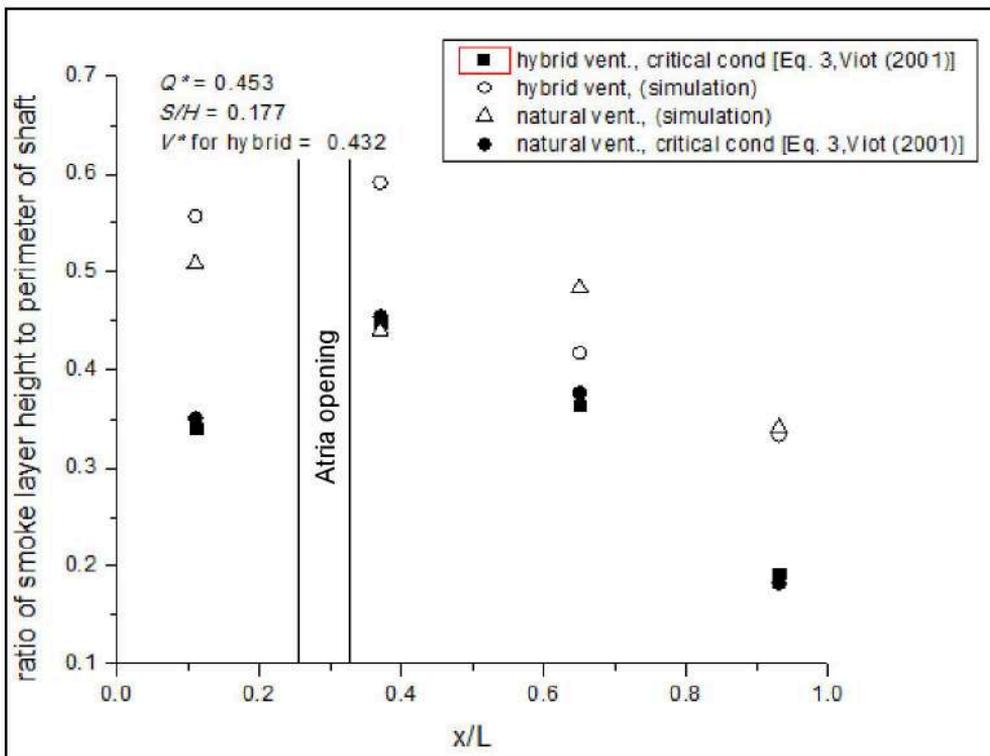
holing menjadi lebih kecil. Akan tetapi, *trend* grafik dari simulasi yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan linear negatif yang berarti semakin bertambahnya nilai S/H maka, ketebalan asap yang terjadi pada bukaan atrium menjadi semakin kecil. Berdasarkan *trend* kedua grafik yang dihasilkan, untuk $S/H = 0.277$ yang memenuhi kriteria bebas terjadinya *plug-holing* karena berada di bawah titik kritis sedangkan untuk variasi $S/H < 0.277$ telah terjadi *plug-holing* dalam model eksperimen.

Sementara itu, pengaruh lokasi kebakaran terhadap ketinggian lapisan asap dalam bukaan atrium untuk sistem ventilasi *hybrid* dan alami menurut pendekatan empiris [44] dapat dilihat pada gambar 4.11. *Trend* grafik menunjukkan semakin jauh lokasi kebakaran dari bukaan ventilasi alami, semakin kecil pula kemungkinan terjadinya efek *plug-holing* yang dibuktikan dengan semakin menurunnya ketebalan lapis asap pada bukaan atrium.



Gambar 4.11 Pengaruh lokasi kebakaran terhadap rasio ketinggian lapisan asap dengan ukuran perimeter ventilasi alami, h_c/S untuk kondisi ventilasi alami dan *hybrid* menurut Viot et.al (2001) [44].

Dengan perbandingan hasil pemodelan simulasi, diketahui bahwa pada semua lokasi kebakaran mengindikasikan terjadinya efek *plug-holing* yang dijelaskan pada gambar 4.12. Hal ini sesuai dengan prediksi laju aliran volumetrik pada bukaan atrium yang mengindikasikan hal yang sama. Dengan demikian, dari dua pendekatan tersebut dapat dikatakan bahwa fenomena *plug-holing* pada pemodelan yang dilakukan memang masih terjadi bahkan terjadi hampir di semua lokasi. Akan tetapi, walaupun di semua lokasi mengindikasikan terjadinya *plug-holing* pada bukaan atrium, tidak akan memengaruhi jatuhnya korban akibat menurunnya lapisan asap karena asap tidak akan turun sampai pada level 3m. Hal ini sudah dijelaskan melalui ketinggian jelaga lapisan asap pada gambar 4.7. dengan demikian, desain $S/H = 0.177$ sudah cukup mampu manajemen asap kebakaran sehingga asap tidak turun sampai pada ketinggian *platform*.



Gambar 4.12 Perbandingan hasil prediksi simulasi dengan pendekatan empiris [44] terkait efek *plug-holing* dalam model eksperimen menurut analisis ketinggian lapisan asap untuk setiap lokasi kebakaran.

Fenomena *plug-holing* ternyata tidak hanya terjadi pada bukaan atrium, tetapi juga pada *inlet* ventilasi mekanik. Berbeda dengan terjadinya *plug-holing* pada bukaan atrium, fenomena *plug-holing* pada ventilasi mekanik akan sangat berbahaya karena asap langsung berdampak pada para evakuan dan pemadam kebakaran. Analisis yang sama untuk ventilasi mekanik akan dilakukan terkait fenomena *plug-holing*.

4.1.3.2 Analisis Fenomena *Plug-holing* pada Ventilasi Mekanik

Ketika kebakaran terjadi, ventilasi mekanik cukup memegang peranan penting dalam mengendalikan asap kebakaran. Akan tetapi, perlu ditekankan bagaimana pengaturan laju aliran pembuangan asap agar fenomena *plug-holing* pada ventilasi mekanik zona *platform* dan *concourse* tidak terjadi. Untuk mengetahui performa ventilasi mekanik dalam mengendalikan asap kebakaran pada zona *concourse* dan *platform* digunakan pendekatan Bilangan Froude dalam analisisnya [73].

$$F = \frac{u_e A}{\left[g \frac{\Delta T}{T_0} \right]^{0.5} d^{2.5}} \quad (4.1)$$

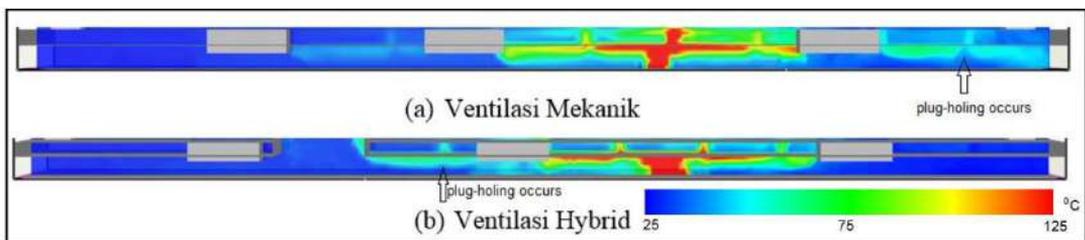
dimana, u_e merupakan lecepatan aliran pembuangan asap (m/s), A merupakan luas area pembuangan asap (m²), d merupakan ketinggian lapisan asap (m), ΔT merupakan peningkatan temperatur rata-rata lapisan asap (K), T_0 merupakan temperatur lingkungan (K), dan g merupakan percepatan gravitasi (m/s²).

Arti fisik dari persamaan (4.1) [73] adalah rasio gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang relevan dengan aliran *buoyancy* akibat kebakaran. Untuk mengetahui terjadinya *plug-holing*, ada bilangan Froude kritis, $F_{critical}$ ketika bilangan Froude pada kondisi tertentu melebihi kondisi kritis. Kondisi ini terjadi ketika udara yang berada di bawah lapisan asap tertarik menuju *inlet* ventilasi mekanik. Former [74] telah menunjukkan bahwa $F_{critical} = 1.5$ dapat diterapkan untuk ventilasi yang dekat dengan pusat kumpulan asap dan 1.1 cocok untuk ventilasi dekat dengan sisi-sisi kumpulan asap [75]. Dalam pembahasan ini, fenomena *plug-holing* akan dibahas untuk kondisi

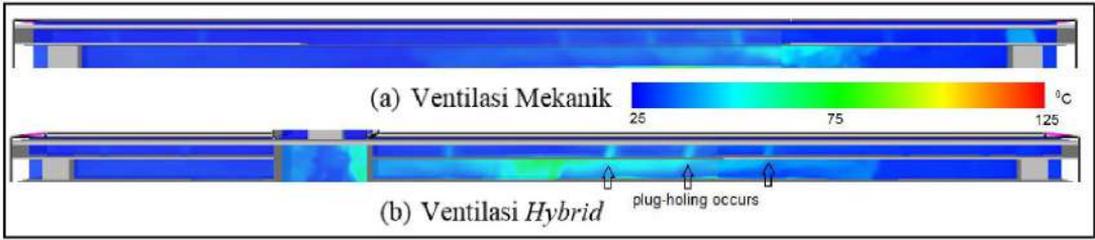
kebakaran terbakar, yakni $x/L = 0.65$ dengan konfigurasi ventilasi *hybrid* dan mekanik.

Untuk melihat kemungkinan terjadinya *plug-holing*, distribusi temperatur melalui pendekatan visual dapat digunakan untuk ventilasi mekanik pada lantai *platform* dan *concourse* yang dijelaskan pada gambar 4.13 dan 4.14. Pada zona *platform* (gambar 4.13) *plug-holing* di *inlet* ventilasi mekanik terlihat pada $x/L = 0.93$ terdapat *plug-holing* sementara ventilasi *hybrid* diindikasikan terjadi pada $x/L = 0.4$. Sementara itu, pada zona *concourse* (gambar 4.14) *plug-holing* di *inlet* ventilasi mekanik tidak ada indikasi terjadi *plug-holing* untuk seluruh lokasi untuk ventilasi *hybrid* diindikasikan terjadi pada $x/L = 0.58, 0.65, \text{ dan } 0.71$.

Dari kedua hasil ini dapat disimpulkan bahwa efek *plug-holing* pada lokasi tertentu terjadi karena gaya *buoyancy* akibat kumpulan asap pada daerah tersebut lebih besar dibandingkan gaya kinetik aliran pembuangan pada *inlet* ventilasi mekanik. Hal ini berlaku untuk pada zona *platform* dan *concourse*. Gaya *buoyancy* terbesar berada pada daerah yang dekat dengan sumber kebakaran sementara lokasi lain yang terkena efek akibat penyebaran asap, gaya *buoyancy* semakin kecil. Dengan demikian, laju aliran ventilasi mekanik perlu dipertahankan pada level tertentu agar jangan sampai melebihi kecepatan aliran produksi asap. Akan tetapi, tentu ini juga akan membahayakan karena akan mengakibatkan lapisan asap akan turun dengan cepat.

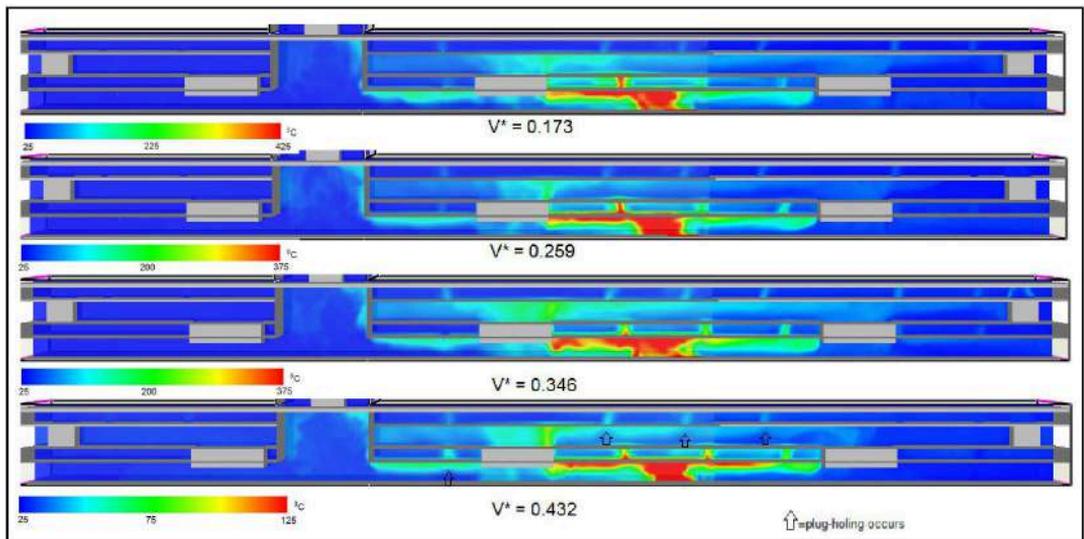


Gambar 4.13 Distribusi temperatur untuk melihat kemungkinan terjadinya fenomena *plug-holing* pada inlet ventilasi mekanik zona *platform* dengan $V^* = 0.432$



Gambar 4.14 Distribusi temperatur untuk melihat kemungkinan terjadinya fenomena *plug-holing* pada *inlet* ventilasi mekanik zona *concourse* dengan $V^* = 0.432$.

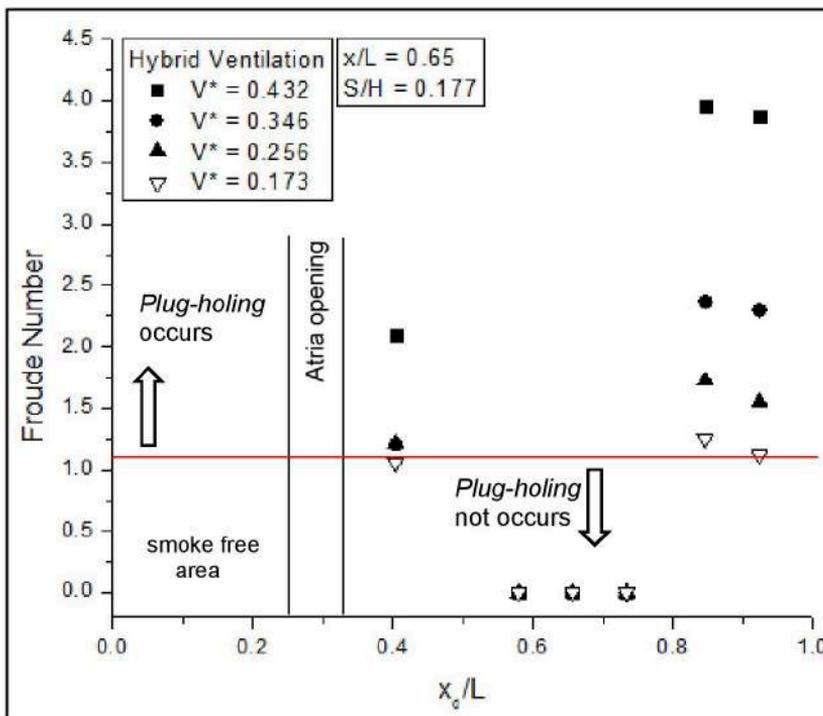
Untuk mengetahui pengaruh laju volumetrik ventilasi alami terhadap efek *plug-holing*, dapat diprediksi melalui visualisasi distribusi temperatur pada zona *platform* dan *concourse* yang disajikan pada gambar 4.15. Berdasarkan gambar 4.15 diperoleh informasi bahwa pada $V^* = 0.173 - 0.346$ tidak terjadi *plug-holing* untuk kedua lantai. Hal ini karena gaya *buoyancy* lapisan asap akibat kebakaran $Q^* = 0.453$ sesuai dengan atau lebih besar dari gaya kinetik akibat laju volumetrik pembuangan asap pada kedua lantai.



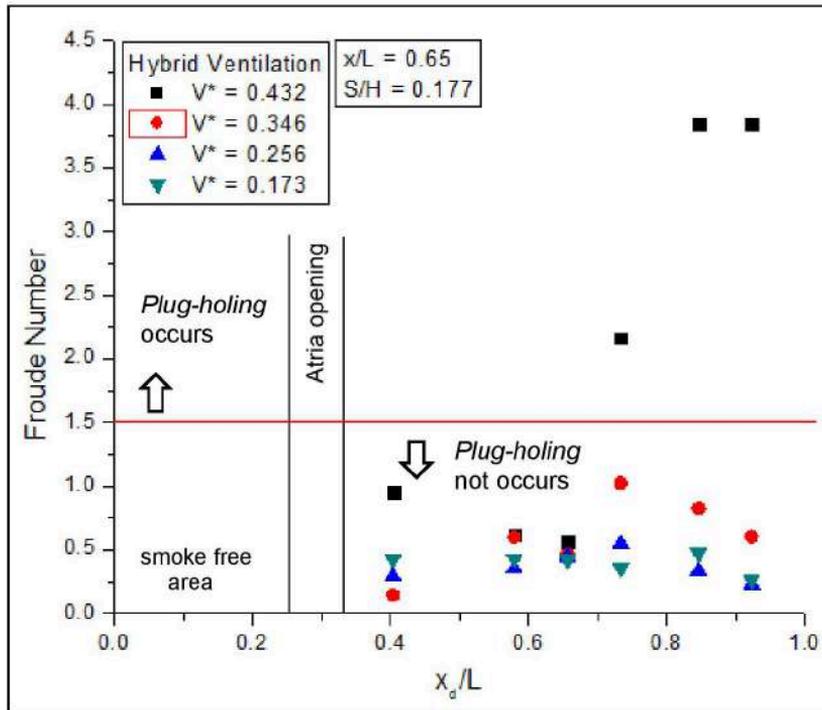
Gambar 4.15. Prediksi lokasi *plug-holing* pada *inlet* ventilasi mekanik menggunakan visualisasi distribusi temperatur dengan variasi laju volumetrik ventilasi.

Untuk menyiasatinya, perlu dilakukan penambahan jumlah *inlet* ventilasi mekanik yang diatur pada laju alir tertentu sedemikian sehingga laju aliran kapasitas pembuangan sama dengan kriteria laju pergantian udara. Hal ini akan membuat efektivitas pembuangan menjadi baik dan ketinggian lapisan asap dapat dipertahankan agar tetap pada level aman.

Setelah efek *plug-holing* diprediksi dengan pendekatan visual distribusi temperatur, pendekatan analitis juga perlu dilakukan. Dengan menggunakan kriteria Former [74], fenomena *plug-holing* pada *inlet* ventilasi mekanik untuk zona *concourse* dan *platform* disajikan pada gambar 4.16. Hasil menjelaskan bahwa zona *concourse* diprediksi telah terjadi *plug-holing* dengan risiko lebih besar dibandingkan zona *platform*. Hal ini karena pada beberapa lokasi *inlet* ventilasi mekanik pada zona *concourse* untuk laju laju volumetrik ventilasi, $V^* > 0.173$ telah terjadi *plug-holing*, sedangkan pada zona *platform* fenomena *plug-holing* hanya terjadi pada pengaturan laju volumetrik ventilasi, $V^* > 0.346$ pada lokasi $x_d/L > 0.7$.



(a) Zona Concourse



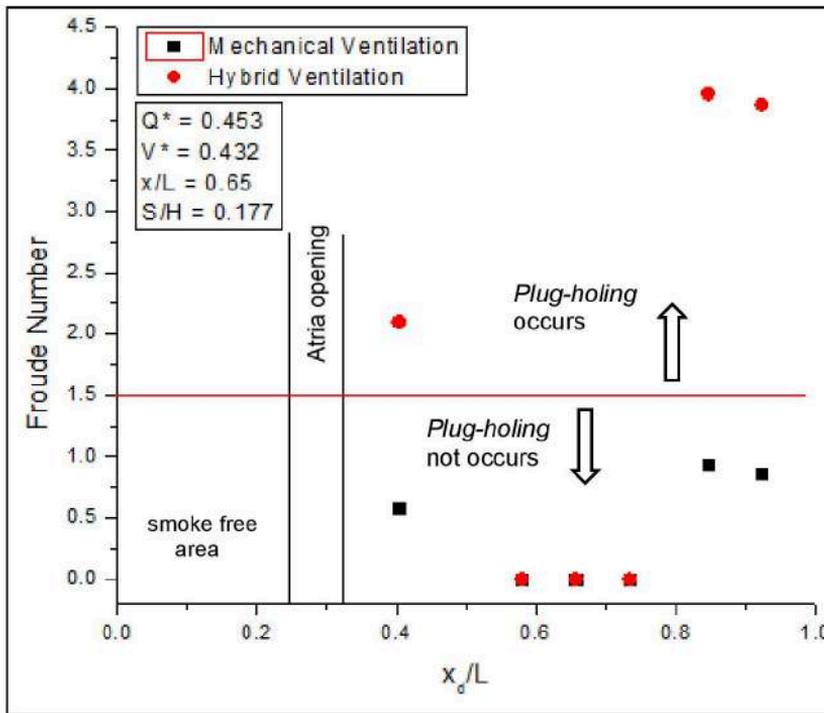
(b) Zona Platform

Gambar 4.16 Prediksi fenomena *plug-holing* pada *inlet* ventilasi mekanik menurut persamaan (4.1) dengan kriteria Former [74] untuk ventilasi *hybrid*.

Fenomena *plug-holing* pada zona *concourse* terjadi akibat aliran asap yang mengalir melalui kolom tangga memiliki gaya *bouyancy* yang rendah sehingga efektivitas pembuangan asap menjadi rendah. Akan tetapi, pada prediksi visualisasi distribusi temperatur efek ini tidak terlihat. Dengan demikian, perlu dilakukan peninjauan apakah kriteria Former [74], yaitu pada bilangan Froude = 1.1 dalam studi ini cocok untuk memprediksi fenomena *plug-holing* untuk lokasi yang jauh dari lokasi kebakaran.

Penggunaan ventilasi *hybrid* ternyata tidak mencerminkan efektivitas pembuangan asap melalui ventilasi mekanik. Hal ini dijelaskan pada gambar 4.17 yang menyatakan pada beberapa *inlet* ventilasi mekanik zona *platform* yang digunakan sebagai tempat terjadinya kebakaran terdapat beberapa lokasi terjadi *plug-holing*. Pemberian ventilasi alami ternyata memberikan efek tambahan terhadap laju

pergantian udara (*air change rate*). Peningkatan laju pergantian udara ini menimbulkan gaya *bouyancy* asap menjadi semakin kecil yang ditunjukkan dengan semakin rendahnya peningkatan temperatur pada lapisan asap.



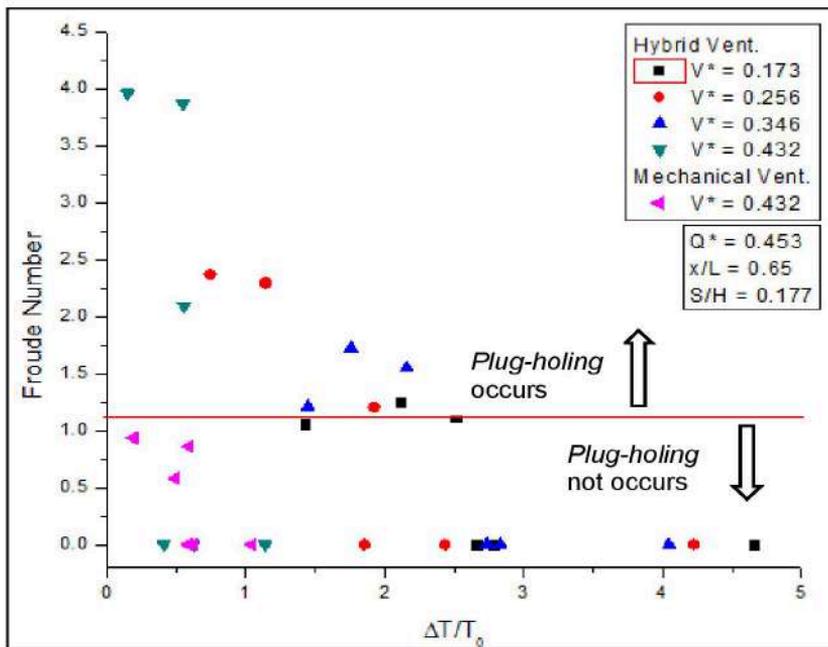
Gambar 4.17 Perbandingan prediksi fenomena *plug-holing* pada *inlet* ventilasi mekanik zona *platform* menurut persamaan (4.1) dengan kriteria Former [74] untuk ventilasi mekanik dan *hybrid*.

Aliran kalor pada lapisan asap dan konveksi kebakaran sebagian dikendalikan oleh ventilasi alami pada bukaan atrium. Hal ini akan membuat gaya kinetik pada ventilasi mekanik pada lokasi tersebut menjadi dominan sehingga efektivitas pembuangan menjadi rendah. Dengan demikian, pengaturan jumlah, posisi peletakan, dan laju volumetrik ventilasi mekanik merupakan hal penting untuk menjaga agar efektivitas pembuangan asap dapat maksimum.

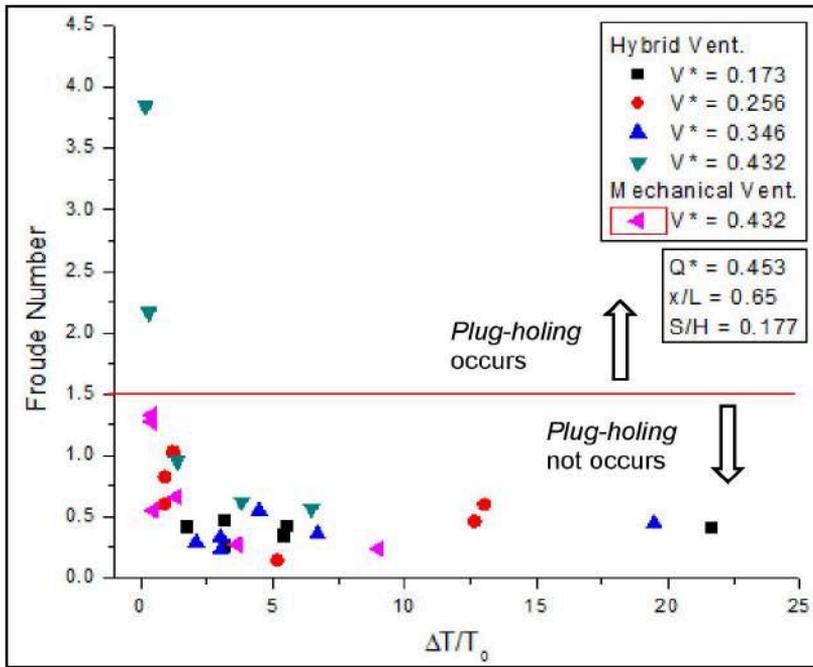
Untuk melihat pengaruh kenaikan temperatur lapisan asap terhadap bilangan Froude ditunjukkan oleh gambar 4.18. Kecenderungan pola hubungan eksponensial yang menunjukkan semakin kecil peningkatan temperatur lapisan asap, semakin besar

bilangan Froude. Dengan kata lain, semakin besar kemungkinan terjadi *plug-holing* pada lokasi tersebut. Fenomena *plug-holing* pada zona *platform* ternyata sangat kecil untuk semua variasi laju volumetrik ventilasi dibandingkan zona *concourse*.

Mengingat pada pembahasan sebelumnya terkait peninjauan kembali penggunaan kriteria Former [74] untuk zona *concourse*, dapat ditelaah kembali melalui gambar 4.18 (a). Berdasarkan kecenderungan peningkatan temperatur terhadap bilangan Froude melalui persamaan (4.1) dan visualisasi distribusi sepanjang zona *concourse* tidak mencerminkan korelasi yang baik. Hal ini dijelaskan dengan ketidakstabilan/ketidakkonsistenan peningkatan temperatur lapisan asap di sekitar *inlet* ventilasi mekanik zona *concourse* sehingga memiliki nilai bilangan Froude yang besar. Hal ini tidak terjadi pada zona *platform* dimana peningkatan temperatur lapisan asap akan memiliki nilai Froude yang cenderung semakin kecil. Dengan demikian, disimpulkan bahwa kriteria Former [74] tidak cocok untuk menentukan *plug-holing* untuk lokasi yang tidak memiliki dinamika penyebaran dan kestabilan lapisan asap cukup stabil sehingga sulit dibandingkan dengan kondisi visualisasi distribusi temperatur.



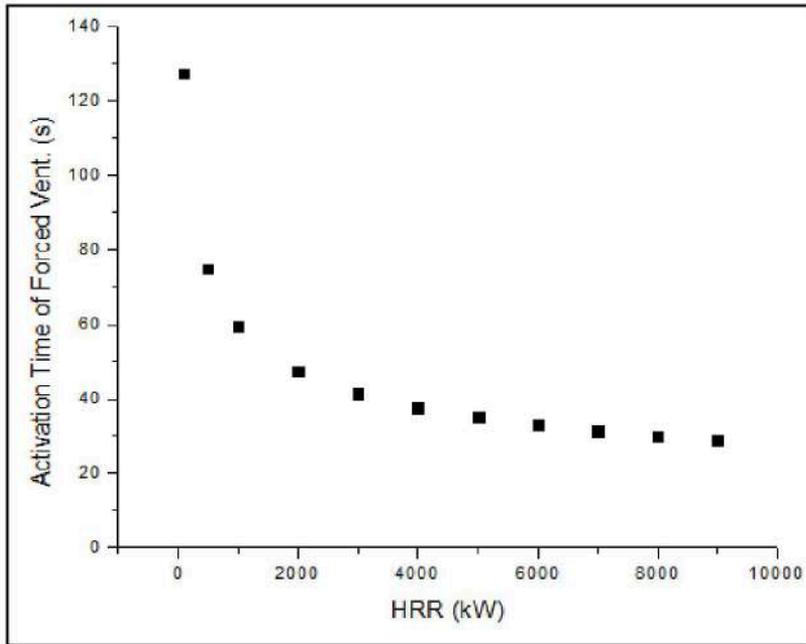
(a) zona concourse



(b) Zona Platform

Gambar 4.18 Pengaruh peningkatan temperatur lapisan asap terhadap bilangan Froude pada *inlet* ventilasi mekanik zona *concourse* menurut kriteria Former [74].

Dalam pembahasan sebelumnya telah dikatakan bahwa pengaturan jumlah, posisi peletakan, dan laju volumetrik ventilasi mekanik merupakan hal penting untuk menjaga agar efektivitas pembuangan asap dapat maksimum. Pengaturan waktu aktivasi ventilasi mekanik yang tepat ternyata juga membantu mencegah *plug-holing* dini sehingga lapisan asap dapat dipertahankan pada kondisi aman. Gambar 4.19 menunjukkan pola kecenderungan eksponensial waktu aktivasi ventilasi mekanik seiring peningkatan laju produksi kalor. Aktivasi ventilasi mekanik harus dilakukan sedemikian sehingga asap tidak mencapai di luar batas aman. Mengacu pada NFPA 92-B [41], waktu terbaik aktivasi ventilasi mekanik merupakan fungsi area kompartemen, laju produksi kalor, dan ketinggian lapisan asap aman sehingga diupayakan tidak melebihi nilai yang ditentukan. Dengan demikian, pada studi ini, waktu sekitar 38 detik setelah kebakaran untuk skala 1:25 merupakan batas maksimum aktivasi ventilasi mekanik.



Gambar 4.19 Pengaruh laju produksi kalor terhadap waktu aktivasi ventilasi mekanik.

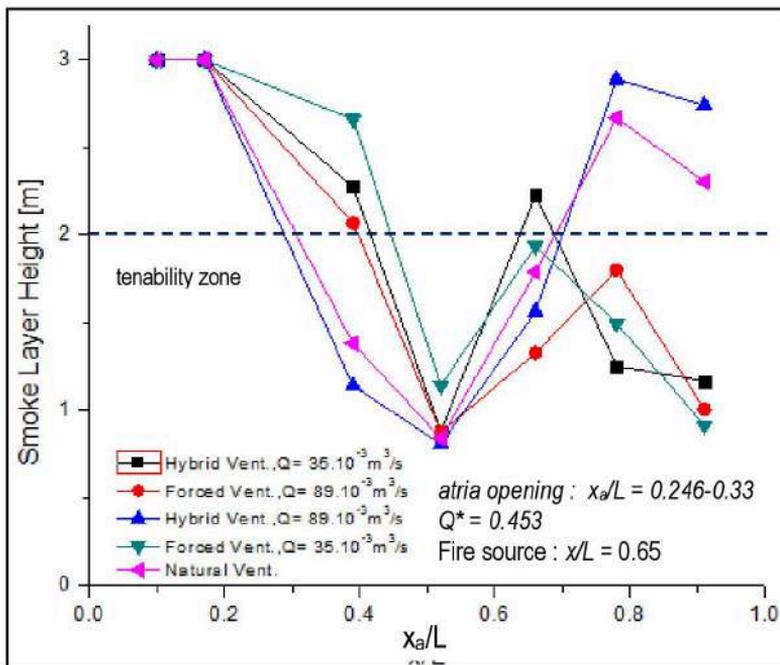
4.2 Analisis Parameter Aspek Keselamatan Kebakaran

Parameter aspek keselamatan kebakaran yang akan dianalisis meliputi ketinggian lapisan asap, visibilitas, obskurasi, distribusi fraksi massa jelaga, dan peningkatan temperatur lapisan asap. Analisis ini digunakan untuk melihat apakah kondisi desain eksisting dengan parameter pengendalian sesuai standar yang diberikan mampu memberikan dan mempertahankan kondisi aman selama proses evakuasi.

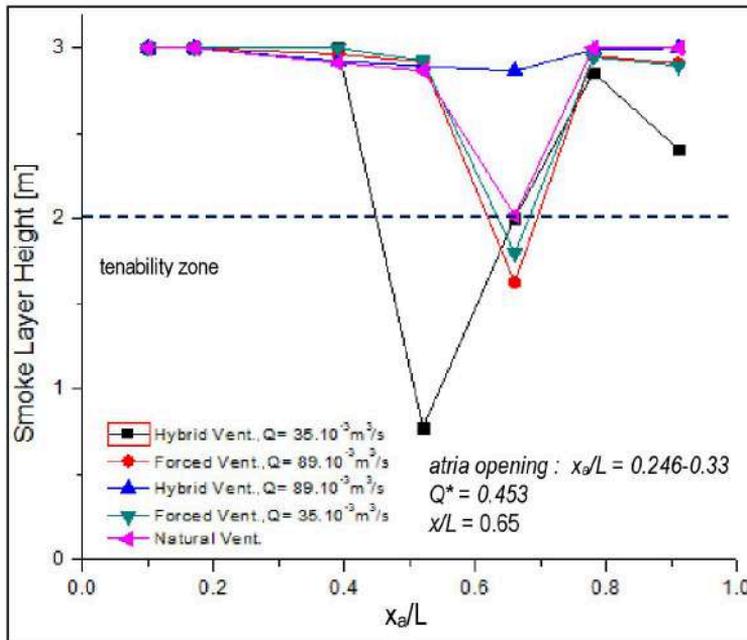
4.2.1 Analisis Ketinggian Lapisan Asap

Gambar 4.20 menunjukkan pola ketinggian lapisan asap ketika fase kebakaran dan fase setelah padam untuk seluruh lokasi titik pengukuran dengan variasi konfigurasi ventilasi. Ketika kebakaran terjadi pada lokasi $x/L = 0.65$, ketinggian asap akan mencapai nilai maksimum di bawah 1m pada titik ukur $x_a/L = 0.52$. Pada dasarnya, untuk sebagian besar lokasi titik ukur kondisi pengukuran melewati batas

aman asap turun hingga di bawah ketinggian 1.5-2m. Akan tetapi, performa terbaik ditunjukkan oleh konfigurasi ventilasi *hybrid* dengan kapasitas $Q = 8,9.10^{-3}m^3/s$ ($V^* = 0.432$) dan ventilasi alami dimana ada empat titik dalam batas aman sepanjang *platform*. Sementara itu, ketika melewati fase padam, ketinggian lapisan asap rata-rata kembali normal. Pada studi ini, konfigurasi ventilasi *hybrid* dengan $Q = 8,9.10^{-3}m^3/s$ menunjukkan pola terbaik dimana di semua lokasi titik ukur lapisan asap hampir tidak ada.



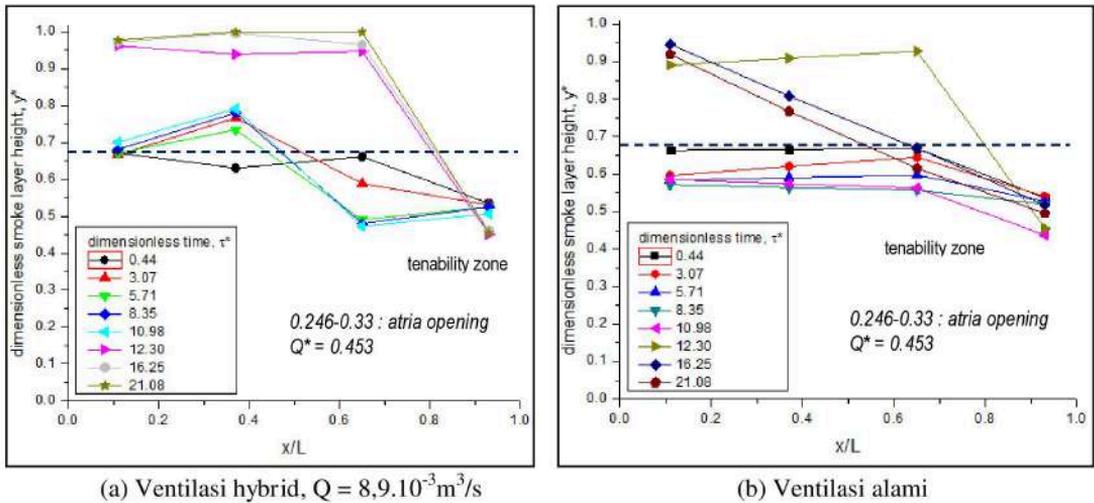
(a) Fase Kebakaran



(b) Setelah Padam

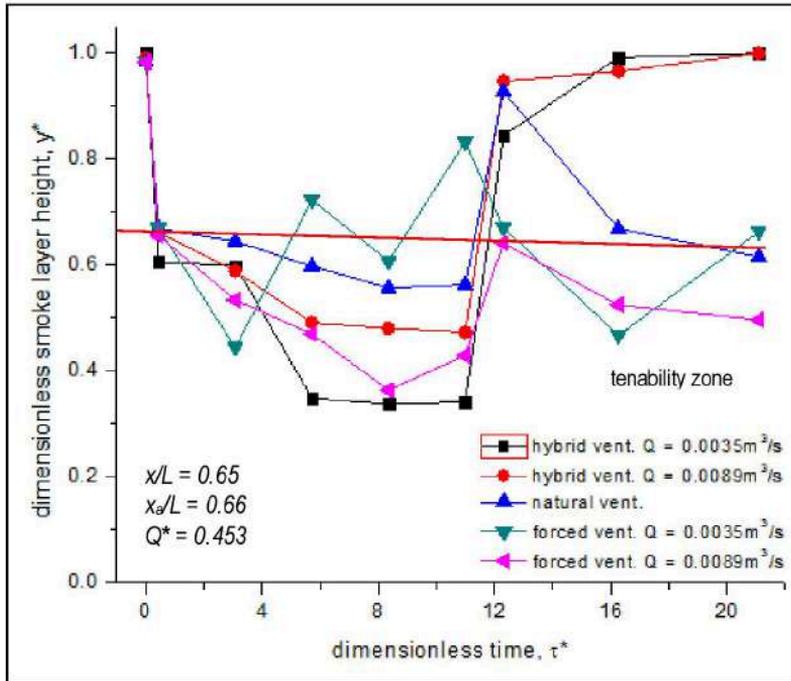
Gambar 4.20 Ketinggian lapisan asap sepanjang zona *platform* untuk fase kebakaran dan setelah padam pada $x/L = 0.65$ dengan variasi konfigurasi ventilasi.

Gambar 4.21 menunjukkan pengaruh lokasi kebakaran terhadap laju penurunan lapisan asap pada konfigurasi ventilasi alami dan *hybrid* ($Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ atau $V^* = 0.432$). Pada dasarnya pola laju penurunan antara kedua variasi menunjukkan hal yang sama dan masih berada dalam level aman di atas 1.5m. Akan tetapi, seiring bertambahnya waktu, beberapa lokasi ketinggian lapisan asap ventilasi *hybrid* hampir tidak ada. Sementara itu, ventilasi alami relatif memiliki ketinggian asap yang bervariasi 1.5-2.7m. Hal ini menunjukkan ketika fase kebakaran selesai, masih ada asap yang tertinggal/terjebak pada zona *platform* sehingga diperlukan ventilasi mekanik untuk menghisapnya. Dengan demikian, ventilasi mekanik memang diperlukan dalam manajemen asap kebakaran.



Gambar 4.21. Pengaruh lokasi kebakaran terhadap laju penurunan lapisan asap pada konfigurasi ventilasi.

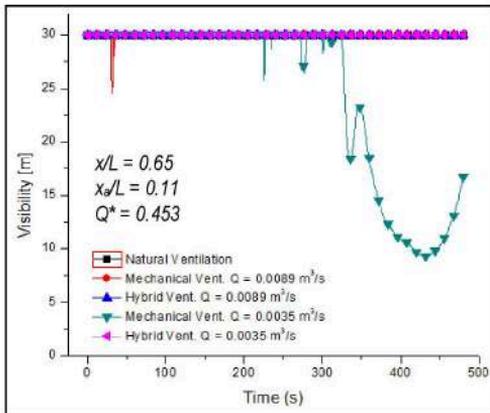
Gambar 4.22 menunjukkan pengaruh waktu terhadap ketinggian lapisan asap dengan variasi konfigurasi ventilasi. Hasil menunjukkan dari semua konfigurasi ventilasi, ventilasi *hybrid* menunjukkan pola ketinggian lapisan asap terbaik dimana ketika fase kebakaran turun mencapai level 0.5 terhadap ketinggian *platfom* dan ketika melewati fase padam, ketinggian lapisan asap naik hingga akhirnya tidak ada. Akan tetapi, walau asap mencapai ketinggian di bawah 2m belum tentu visibilitas dan level obskurasasi dalam batas yang tidak aman. Hal ini akan dibahas lebih lanjut pada pengukuran visibilitas dan obskurasasi.



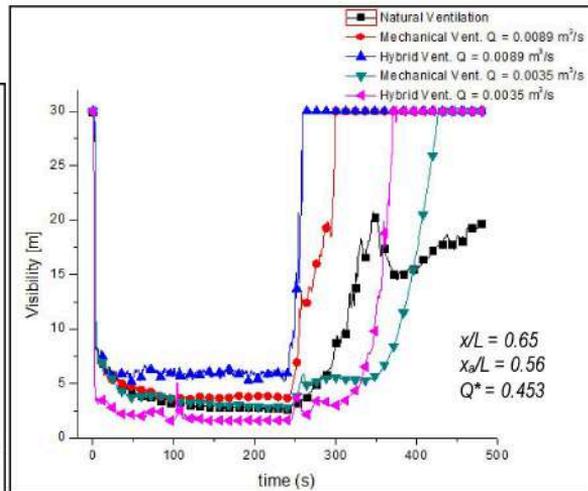
Gambar 4.22. Pengaruh waktu terhadap ketinggian lapisan asap dengan variasi konfigurasi ventilasi.

4.2.2 Analisis Visibilitas dan Obskurasi Zona Platform

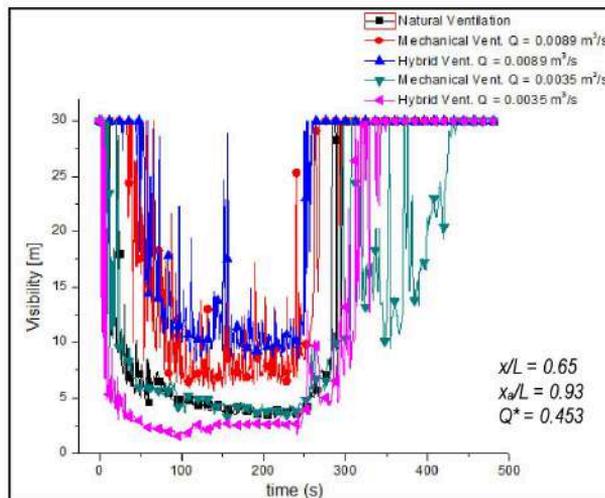
Gambar 4.23 menunjukkan pengaruh waktu terhadap visibilitas yang terjadi pada zona platform dengan variasi konfigurasi ventilasi. Secara umum terlihat bahwa keberadaan atria dan laju pergantian udara (ACH) yang cukup dapat membantu dalam mengendalikan asap, khususnya pada lokasi titik ukur $x_a/L = 0.11$. Ketika fase kebakaran terjadi pada $x/L = 0.65$, pada lokasi titik ukur $x_a/L = 0.56$ visibilitas yang terjadi memang sangat buruk. Akan tetapi, pada lokasi titik ukur $x_a/L = 0.93$ menunjukkan nilai visibilitas sangat baik hanya pada konfigurasi ventilasi *hybrid* dengan $Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($V^* = 0.432$) dengan level visibilitas di atas 10m. Dengan demikian, ketika kebakaran terjadi penggunaan ventilasi *hybrid* dengan laju pertukaran udara yang cukup sangat membantu dalam proses evakuasi. Selain itu, masih ada dua jalur alternatif dengan visibilitas aman untuk proses evakuasi menuju level *concourse*, yaitu pada $x_a/L = 0.11$ dan 0.93 .



(a) $x_q/L = 0.11$



(b) $x_q/L = 0.56$

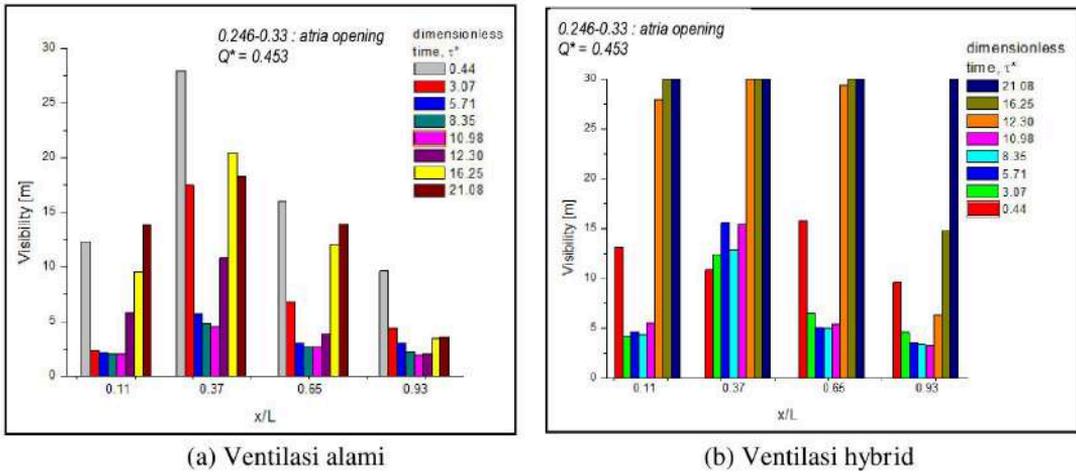


(c) $x_q/L = 0.93$

Gambar 4.23 Pengaruh waktu terhadap visibilitas yang terjadi pada zona *platform* dengan variasi konfigurasi ventilasi untuk $x_q/L = 0.11, 0.56$ dan 0.93 dengan lokasi kebakaran $x/L = 0.65$.

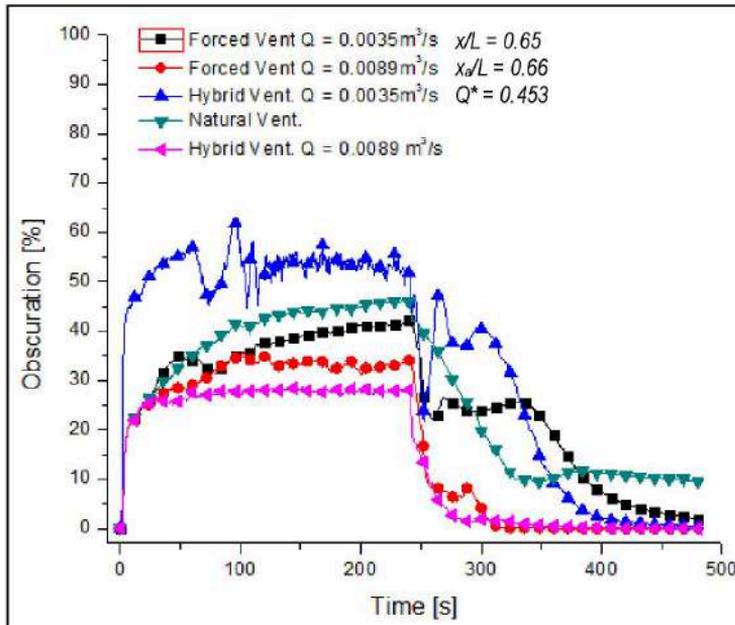
Gambar 4.24 menunjukkan pengaruh lokasi sumber kebakaran terhadap laju visibilitas untuk konfigurasi ventilasi alami dan *hybrid*. Dapat dikatakan bahwa ketika fase kebakaran memiliki laju penurunan visibilitas yang sama, tetapi ketika melewati fase padam menunjukkan hal yang berbeda dimana untuk visibilitas ventilasi *hybrid* mencapai nilai maksimum 30m sedangkan ventilasi alami mengalami penurunan

seiring semakin jauhnya lokasi kebakaran. Terbatasnya sistem ventilasi menyebabkan lokasi kebakaran yang jauh tidak dapat mengendalikan asap kebakaran.

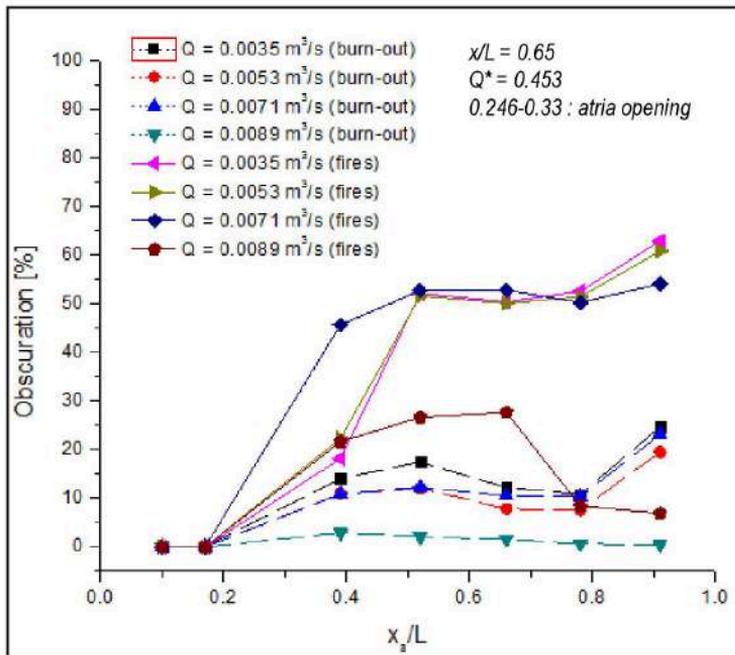


Gambar 4.24 Pengaruh lokasi sumber kebakaran terhadap laju visibilitas untuk konfigurasi ventilasi alami dan *hybrid*.

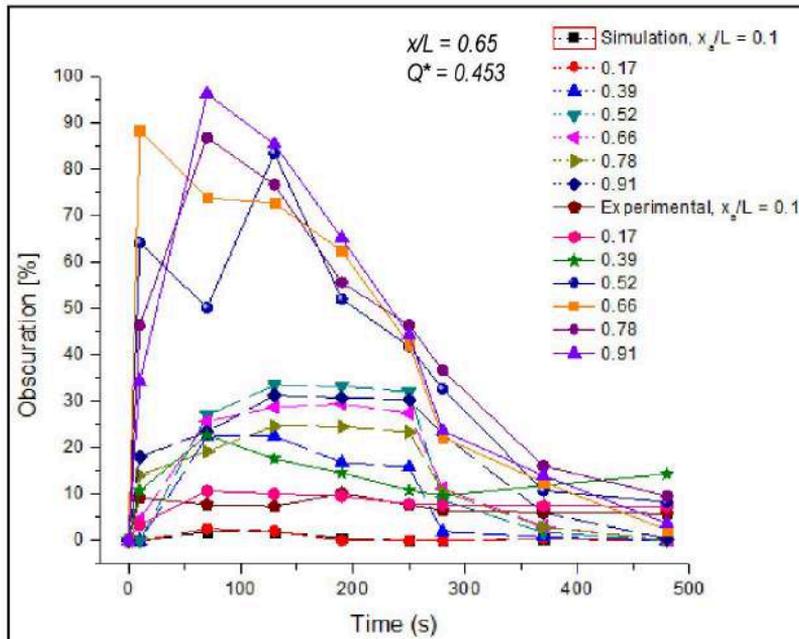
Gambar 4.25 menunjukkan bahwa ventilasi *hybrid* memberikan nilai persentase obskurasi terendah dimana tingkat ketinggian lapisan asap yang terjadi dipertahankan di bawah level 0.3. Peningkatan kapasitas ventilasi mekanik dengan meningkatkan laju pertukaran udara memberikan efek yang lebih baik dalam meningkatkan obskurasi ketika kebakaran. Sementara itu, gambar 4.26 menunjukkan bahwa ketika fase kebakaran terjadi, dibutuhkan laju ventilasi mekanik yang tepat sesuai dengan laju produksi kalor dan batas aman ketinggian asap. Ketika laju ventilasi mekanik tidak sesuai dengan standar *ACH* yang dibutuhkan, tidak akan memberikan efek pengurangan level obskurasi ketika kebakaran. Hal yang sama terjadi ketika fase setelah padam, laju ventilasi mekanik yang sesuai akan mampu mengendalikan asap kebakaran hingga dalam kondisi bebas asap.



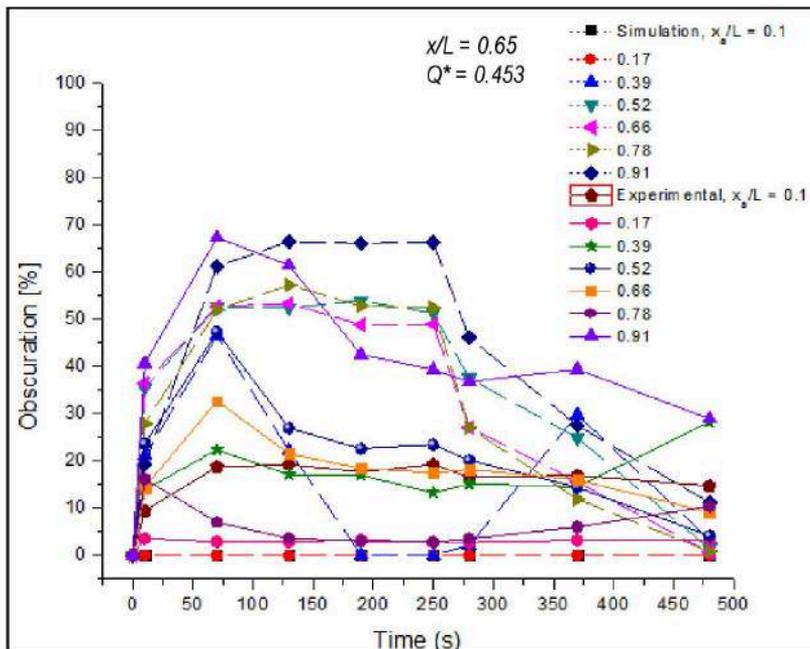
Gambar 4.25 Pengaruh waktu terhadap persentase obscuration asap pada variasi konfigurasi ventilasi



Gambar 4.26 Pengaruh lokasi titik ukur terhadap persentase obscuration ketika fase kebakaran dan setelah padam.



(a) Ventilasi mekanik

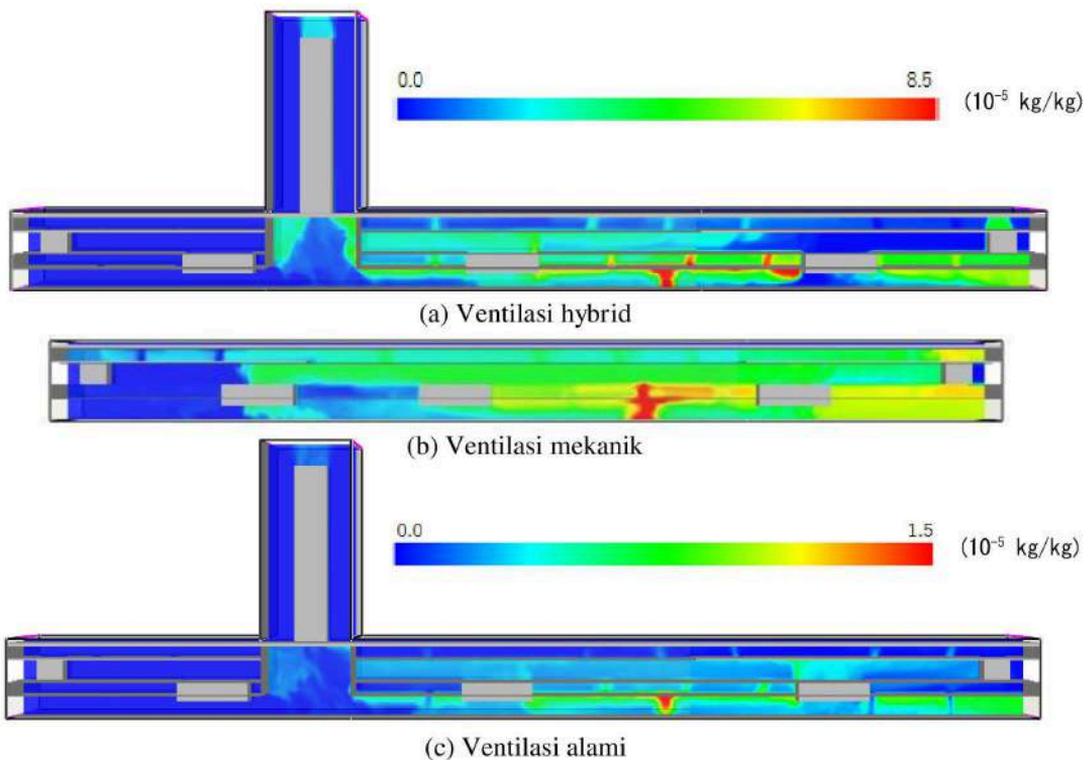


(b) Ventilasi hybrid

Gambar 4.27 Perbandingan hasil eksperimen dan simulasi numerik terkait pengaruh waktu terhadap persentase obscuration untuk konfigurasi ventilasi mekanik dan hybrid.

Gambar 4.27 menunjukkan bahwa *trend* grafik hasil simulasi dan eksperimen memberikan pola yang sesuai. Ventilasi *hybrid* memberikan efek positif dalam mengendalikan asap kebakaran dengan level obskurasi maksimum pada level 0.5-0.7 sedangkan ventilasi mekanik dapat mencapai level di atas 0.9. Hal ini menunjukkan semakin besar kapasitas ventilasi yang digunakan akan memberikan efek positif terhadap penurunan ketinggian lapisan asap.

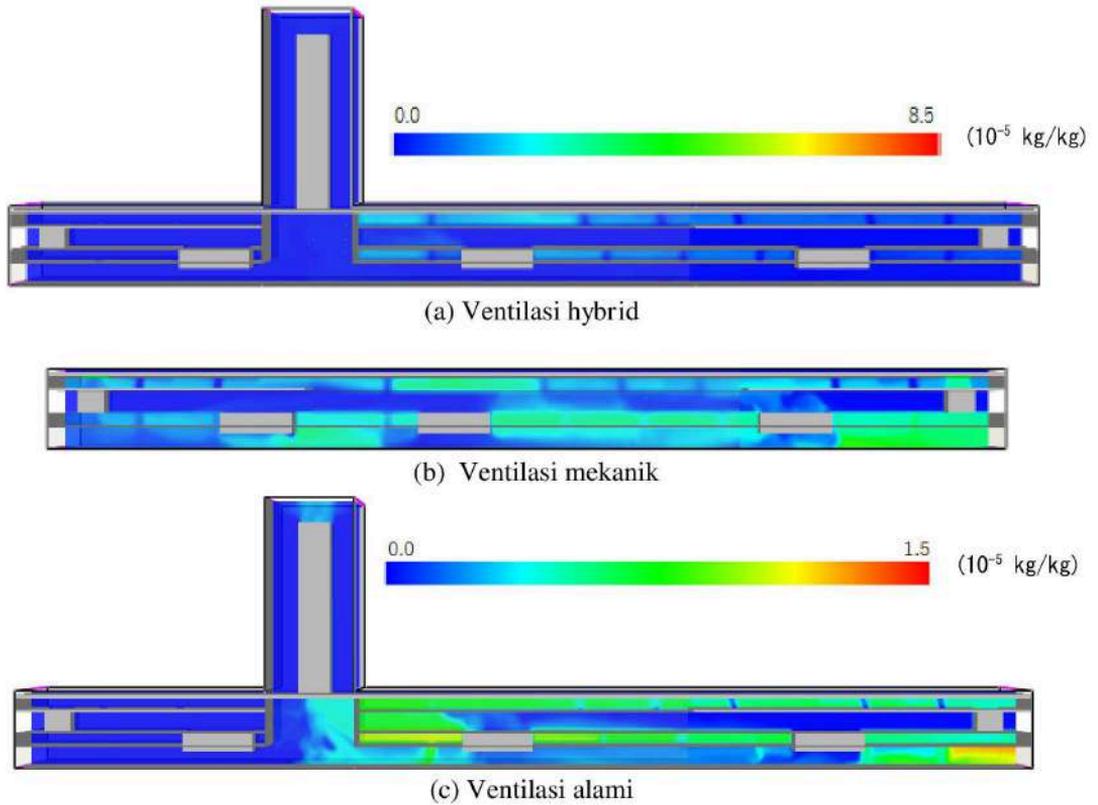
4.2.3 Analisis Distribusi Fraksi Massa Jelaga



Gambar 4.28 Perbandingan visualisasi fraksi massa jelaga untuk berbagai jenis konfigurasi ventilasi pada saat 3 menit kebakaran

Gambar 4.28 dan 4.29 menunjukkan ketika kebakaran terjadi, ventilasi *hybrid* memberikan efek yang kurang baik terhadap pembentukan jelaga dibandingkan ventilasi alami. Akan tetapi laju pelepasan ventilasi *hybrid* lebih baik dibanding ventilasi mekanik dan alami sehingga penyebaran asap dapat dilokalisasi dan

intensitas asap yang masuk ke dalam zona *concourse* lebih sedikit. Sementara itu, ketika fase padam, ventilasi *hybrid* memberikan performa terbaik dalam mengendalikan asap dibuktikan dengan seluruh area *platform* menjadi bebas asap. Untuk ventilasi mekanik dan alami, fraksi jelaga hingga 600 detik setelah padam belum mampu dikendalikan karena keterbatasan sistem ventilasi.

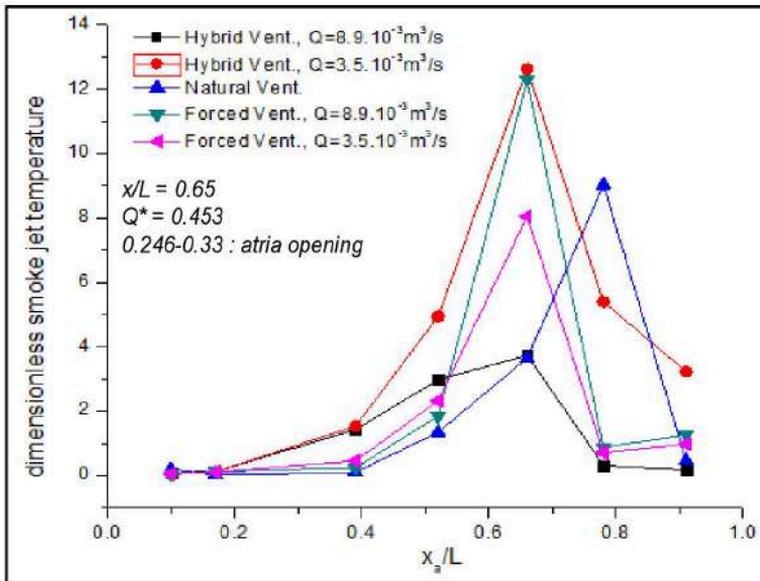


Gambar 4.29 Perbandingan visualisasi fraksi massa jelaga untuk berbagai jenis konfigurasi ventilasi pada saat 10 menit setelah padam.

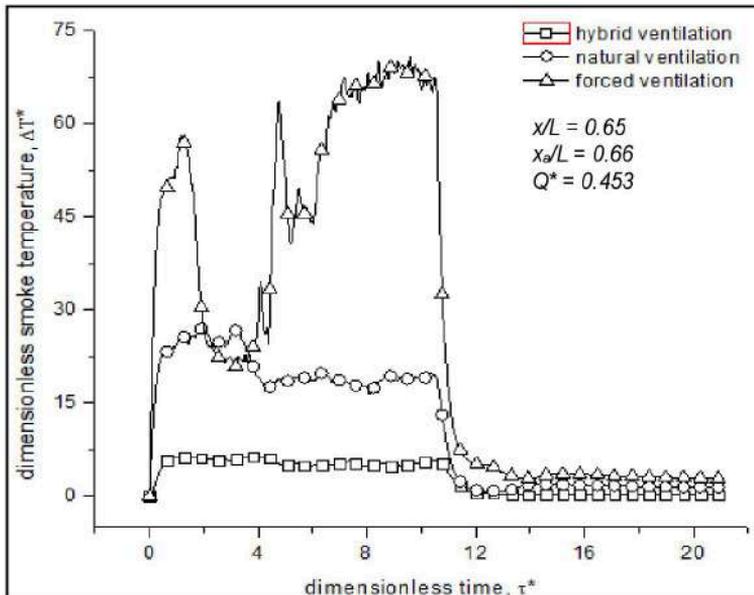
4.2.4 Analisis Laju Peningkatan Temperatur dalam Zona Platform

Gambar 4.30 menunjukkan distribusi temperatur sepanjang lokasi titik ukur zona *platform*, dimana ventilasi *hybrid* dengan kapasitas $Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($V^* = 0.432$) memberikan temperatur asap pada *ceiling* hampir 40% lebih rendah dibandingkan ventilasi alami. Untuk lokasi titik ukur yang lain, ventilasi *hybrid* dengan kapasitas

tersebut relatif memberikan distribusi temperatur yang aman dibandingkan konfigurasi ventilasi lainnya.

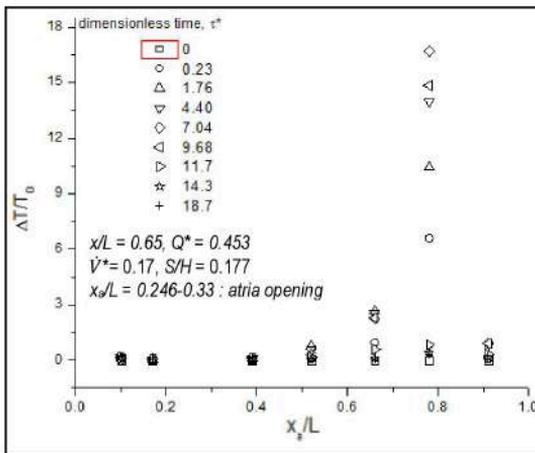


Gambar 4.30. Pengaruh lokasi titik ukur terhadap temperatur asap di bawah plafon/ceiling dengan variasi konfigurasi ventilasi.

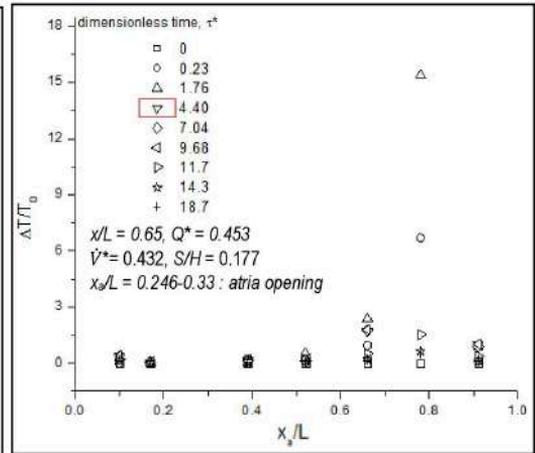


Gambar 4.31 Pengaruh waktu terhadap temperatur lapisan asap zona *platform* dengan variasi ventilasi.

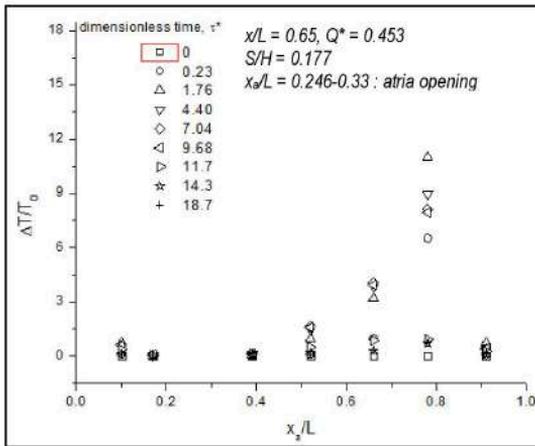
Gambar 4.31 menunjukkan distribusi temperatur pada ketinggian level manusia memiliki efek terendah dimana hanya sekitar peningkatan 5% terhadap kondisi lingkungan. Ventilasi mekanik memberikan efek terburuk dimana temperatur rata-rata mencapai peningkatan hingga 70% dari kondisi lingkungan. Dengan demikian, ventilasi *hybrid* memberikan efek yang lebih baik dalam mengendalikan panas kebakaran dan cepat mengondisikan kembali normal setelah kebakaran.



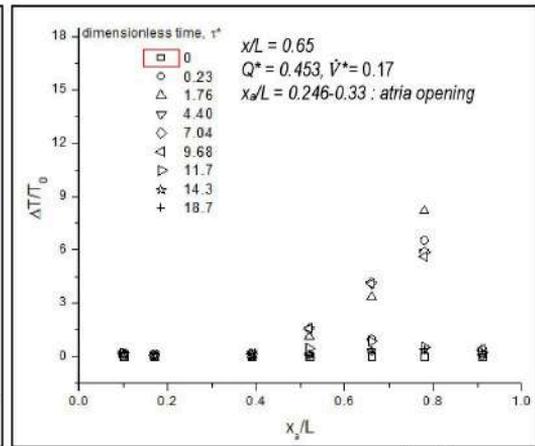
(a) Ventilasi hybrid $Q = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



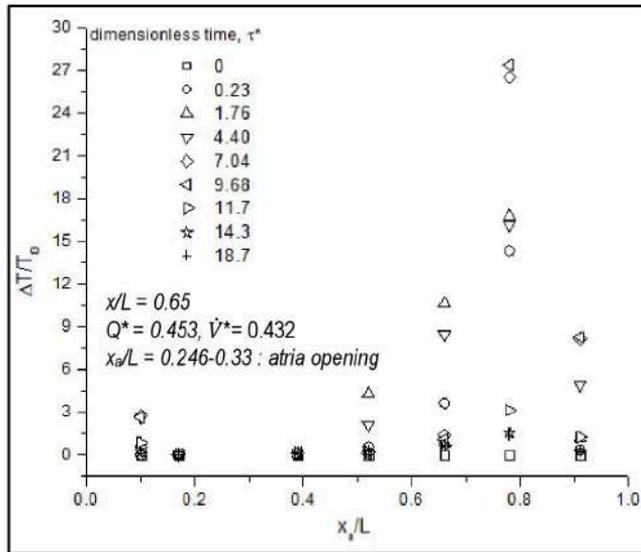
(b) Ventilasi hybrid $Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



(c) Ventilasi alami



(d) Ventilasi mekanik $Q = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$



(e) Ventilasi mekanik $Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Gambar 4.32 Pengaruh posisi titik ukur terhadap dinamika laju temperatur asap zona kebakaran untuk berbagai konfigurasi ventilasi.

Gambar 4.32 menginformasikan bahwa konfigurasi ventilasi memberikan efek yang bervariasi terhadap distribusi temperatur. Laju penurunan temperatur terbaik pada ventilasi *hybrid* dengan kapasitas $Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($V^* = 0.432$) dimana terjadi peningkatan temperatur dalam waktu singkat akan cepat dikondisikan ke dalam batas temperatur aman, yakni pada level $\frac{\Delta T}{T_0} = 3$. Untuk konfigurasi ventilasi lain, lokalisasi temperatur agak sulit dikondisikan terlihat dengan adanya laju peningkatan pada beberapa lokasi titik ukur. Hal ini menginformasikan bahwa selain mampu mengondisikan laju peningkatan temperatur, ventilasi *hybrid* dengan kapasitas $Q = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ mampu mengendalikan panas sepanjang zona *platform*.

4.3 Analisis Hasil Eksperimen Kondisi Transien Perpindahan Kalor Konveksi Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah

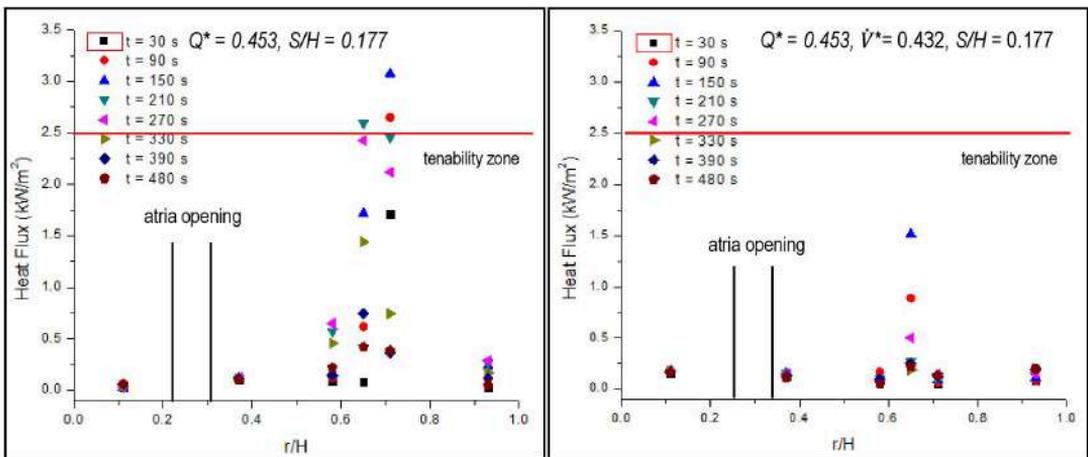
Perilaku transien perpindahan kalor konveksi dalam studi ini dijelaskan melalui analisis fluks kalor dan koefisien perpindahan kalor konvektif akibat aliran konveksi sumber kebakaran dan peningkatan temperatur lapisan asap. Dalam analisis

ini diharapkan memberikan kriteria aman akibat aliran kalor sumber kebakaran selama proses evakuasi berlangsung.

4.3.1 Analisis Fluks Kalor Kebakaran

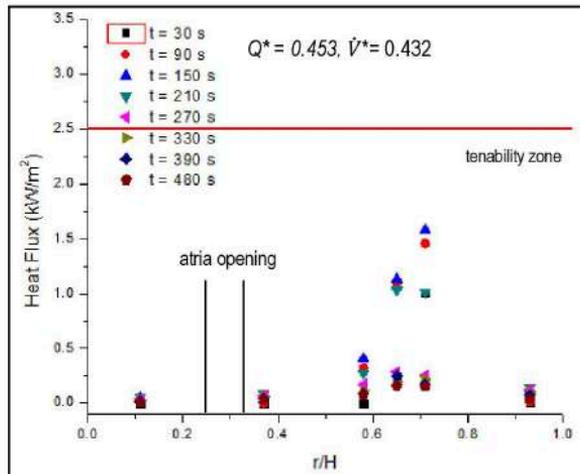
Gambar 4.33 menginformasikan bahwa ventilasi mekanik dan *hybrid* memberikan efek yang baik dalam laju peningkatan fluks kalor. Sementara itu, ventilasi alami dan ventilasi mekanik memberikan efek penyebaran fluks kalor pada beberapa lokasi. Akan tetapi, penyebaran fluks kalor yang dihasilkan dalam batas aman yakni di bawah level 2.5 kW/m^2 . Dengan demikian, ventilasi alami memberikan efek yang kurang baik dalam mengendalikan panas kebakaran. Pengaruh ventilasi mekanik yang sesuai dengan laju pertukaran udara memberikan efek yang lebih baik dibuktikan dengan sepanjang waktu memberikan kondisi aman terhadap panas kebakaran.

Secara umum, nilai fluks kalor rata-rata dalam kondisi daerah kemamputahan (aman) selama kebakaran dan setelah padam dijelaskan pada gambar 4.34.



(a) Ventilasi alami

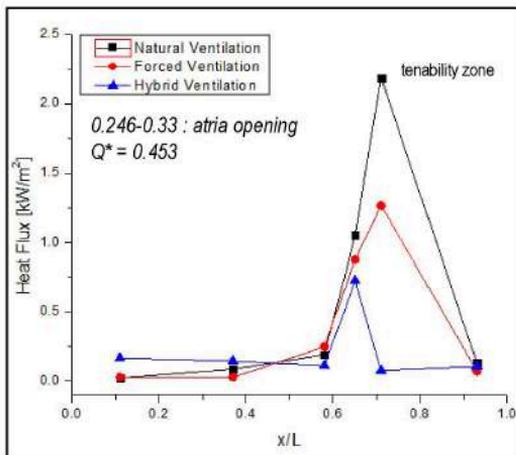
(b) Ventilasi hybrid



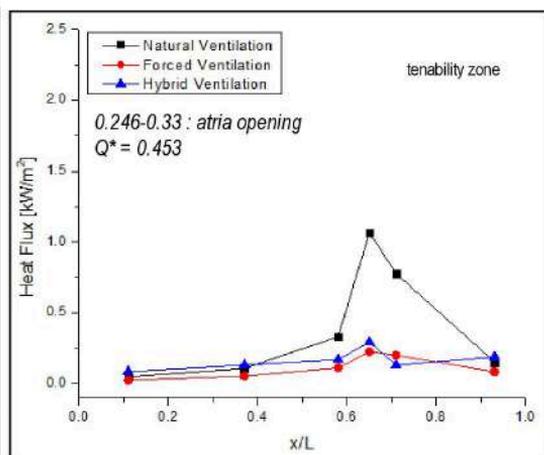
(c) Ventilasi mekanik

Gambar 4.33 Pengaruh lokasi kebakaran terhadap laju fluks kalor dalam variasi konfigurasi ventilasi.

Hasil ini memberikan kesimpulan bahwa untuk setiap konfigurasi ventilasi ternyata mampu memberikan kriteria sama dengan fluks kalor di bawah 2.5 kW/m^2 . Dengan demikian, laju volumetrik ventilasi dengan $ACH=10$ ($V^* = 0.432$) dapat mengendalikan panas kebakaran dengan baik dan mampu menjaga hingga fase setelah padam.



(a) selama kebakaran

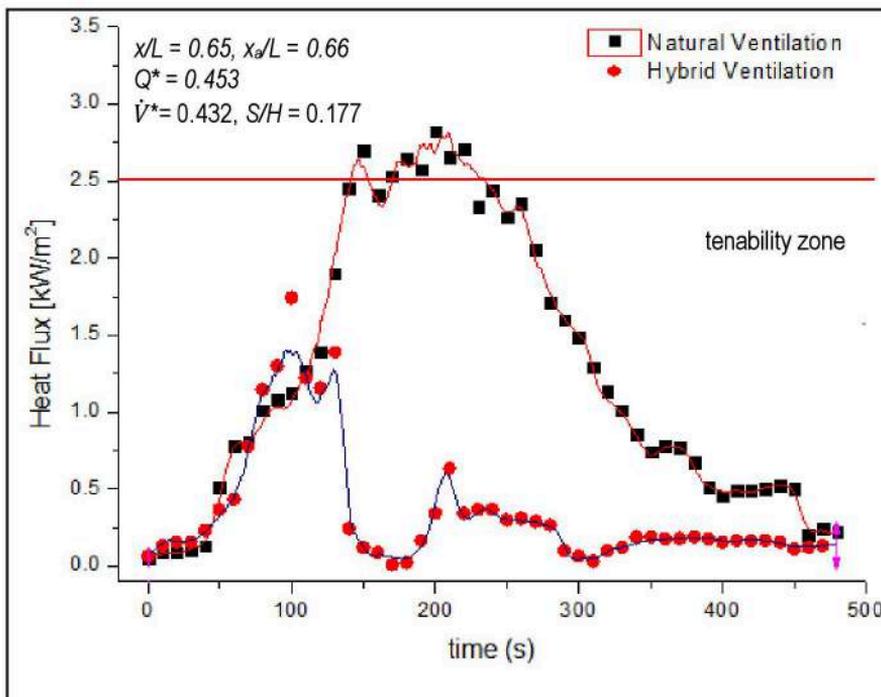


(b) setelah padam

Gambar 4.34 Pengaruh lokasi kebakaran terhadap nilai rata-rata fluks kalor dalam variasi konfigurasi ventilasi.

4.3.2 Analisis Nilai dan Korelasi Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi

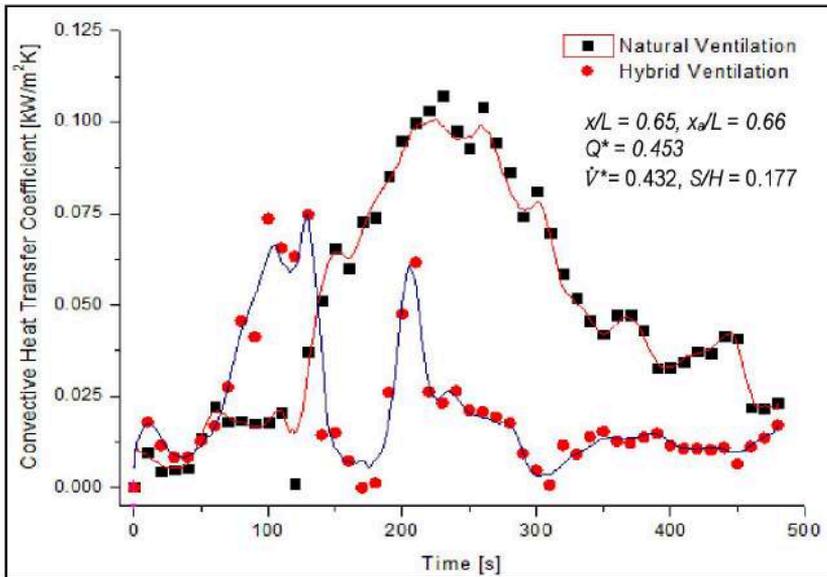
Gambar 4.35 dan 4.36 menjelaskan bahwa efek peningkatan fluks kalor memiliki nilai maksimum yang bervariasi sesuai dengan konfigurasi ventilasi. Hal ini tentunya sebanding dengan koefisien perpindahan kalor konveksi. Fluks kalor ventilasi alami memberikan nilai di atas batas aman 2.5kw/m^2 dengan peningkatan linear selama fase kebakaran. Fluks kalor maksimum ventilasi *hybrid* terjadi pada level di bawah 2.5kw/m^2 dan terjadi lebih cepat 100% dibandingkan nilai maksimum fluks kalor ventilasi alami. Hal ini menunjukkan penggunaan ventilasi alami memang tidak direkomendasikan dalam mengendalikan panas kebakaran.



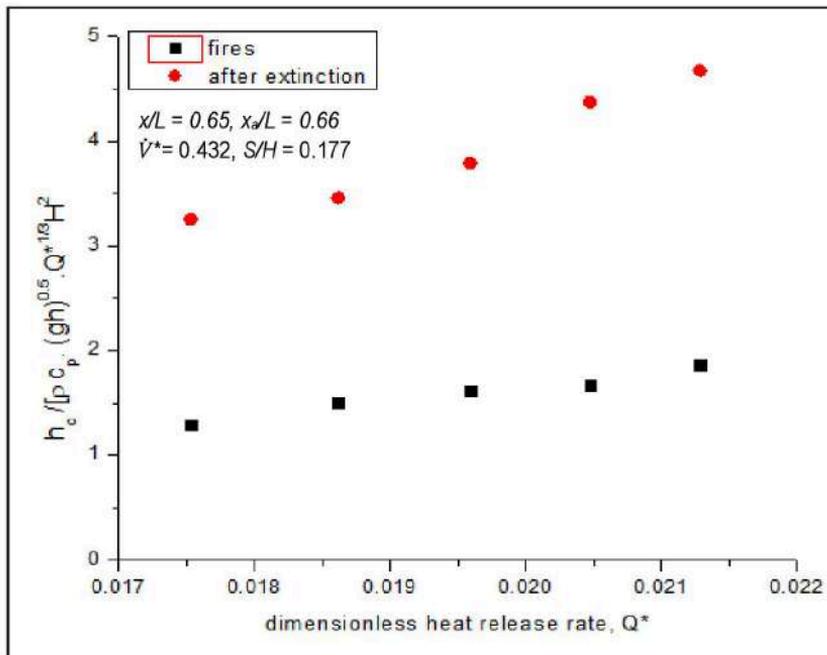
Gambar 4.35 Pengaruh waktu terhadap fluks kalor untuk konfigurasi ventilasi alami dan *hybrid*.

Gambar 4.37 menjelaskan bahwa ketika fase kebakaran, dengan peningkatan laju produksi kalor tidak akan memberikan efek signifikan terhadap peningkatan koefisien perpindahan kalor, h . Akan tetapi, ketika fase setelah padam, nilai koefisien perpindahan kalor konveksi akan meningkat cukup besar seiring peningkatan laju

produksi kalor. Perlu diketahui bahwa aliran kalor ketika kebakaran akan mengalami pertumbuhan secara vertikal.



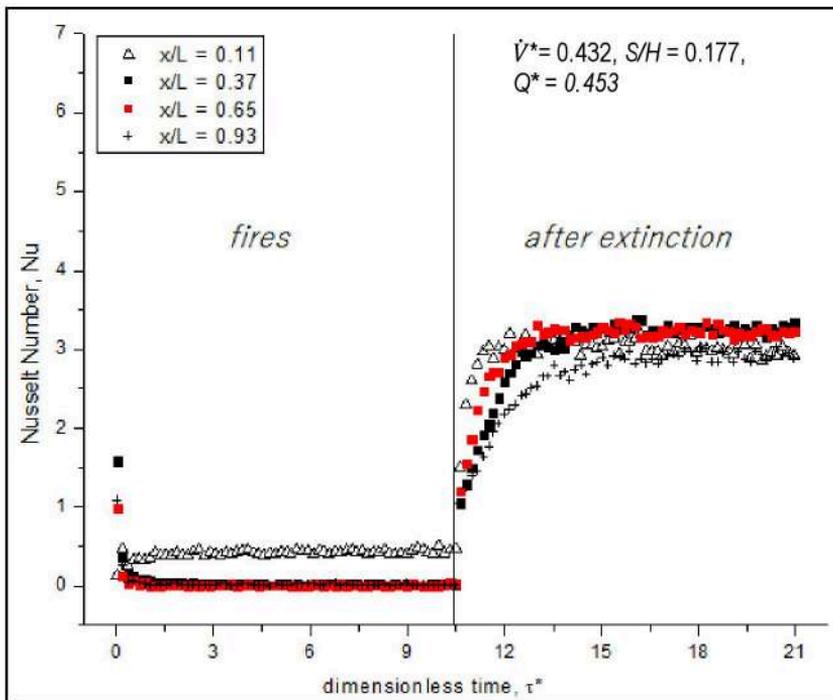
Gambar 4.36 Pengaruh waktu terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi untuk konfigurasi ventilasi alami dan hybrid



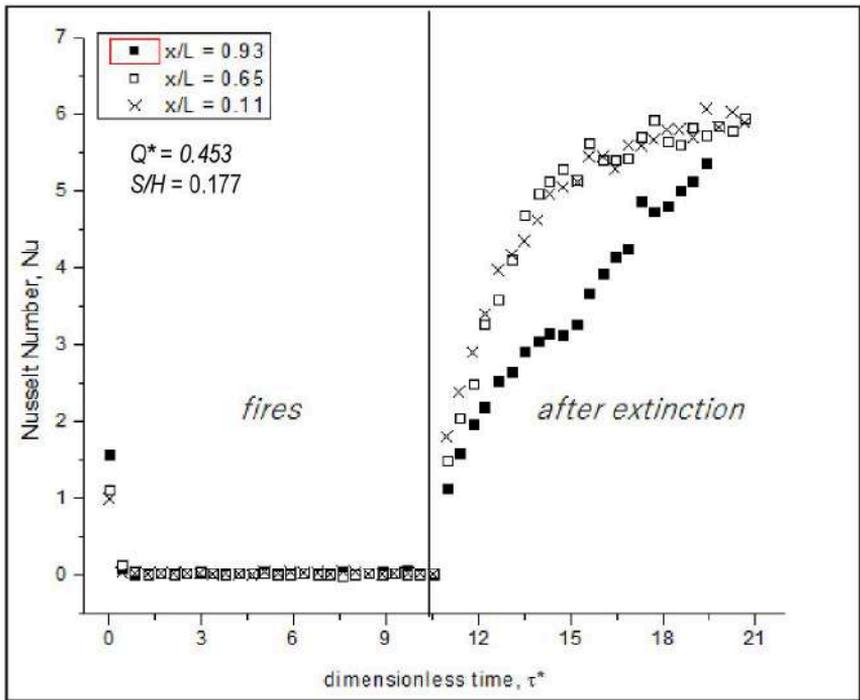
Gambar 4.37 Pengaruh laju produksi kalor terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi selama kebakaran dan setelah padam

Ketika sudah mencapai kondisi tunak, aliran fluks akan menyebar secara horizontal dan akan turun. Peningkatan fluks kalor jauh lebih rendah dibandingkan kenaikan temperatur yang mengakibatkan nilai h cenderung meningkat kecil. Ketika fase kebakaran selesai, laju penurunan fluks kalor tidak secepat laju penurunan temperatur sehingga nilai h akan naik. Kenaikan ini akan terjadi seiring bertambahnya laju produksi kalor.

Bilangan Nusselt merupakan rasio antara nilai fluks kalor konduksi terhadap fluks kalor konveksi dari *pool fires*. Gambar 4.38 menjelaskan bahwa ketika fase kebakaran faktor konduksi menjadi sangat dominan dibandingkan nilai konveksi sehingga menghasilkan bilangan Nusselt cenderung asimtotik sangat kecil. Ketika fase kebakaran selesai, bilangan Nusselt akan naik secara eksponensial hingga akhirnya konstan pada level tertentu. Hal ini menandakan nilai fluks kalor konveksi lebih dominan dibandingkan nilai fluks kalor konduksi ketika fase setelah pemadaman. Untuk pola yang dihasilkan, ventilasi *hybrid* memberikan bilangan Nusselt yang lebih kecil dibandingkan ventilasi alami karena aliran panas konveksi lebih cepat dikendalikan dibandingkan ventilasi alami.



(a) Ventilasi hybrid



(b) Ventilasi alami

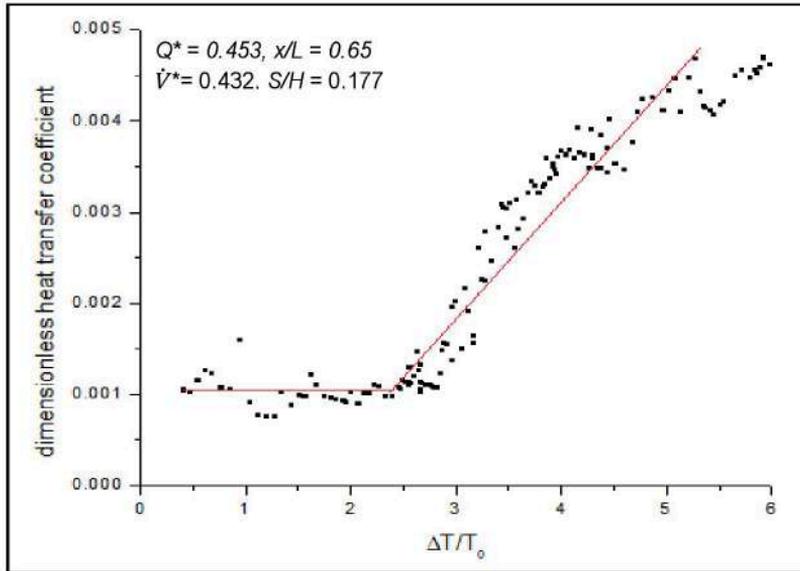
Gambar 4.38 Pengaruh waktu terhadap bilangan Nusselt pada *pool fires* dengan kondisi ventilasi *hybrid* dan alami.

Gambar 4.39 dan 4.40 merupakan analisis korelasi bilangan tak berdimensi antara kenaikan temperatur ΔT terhadap laju perubahan koefisien perpindahan kalor konveksi, h . Luas yang diberikan di bawah garis kurva regresi menunjukkan nilai fluks kalor. Dapat dikatakan bahwa ketika fase kebakaran, nilai ΔT terhadap h tidak menunjukkan hubungan linear, melainkan ada kondisi relatif konstan dalam selang ΔT tertentu dan kemudian akan meningkat tajam. Untuk itu, dapat dibuat korelasi hubungan nilai koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap perubahan temperatur untuk fase kebakaran dirumuskan pada persamaan (4.2) dan (4.3).

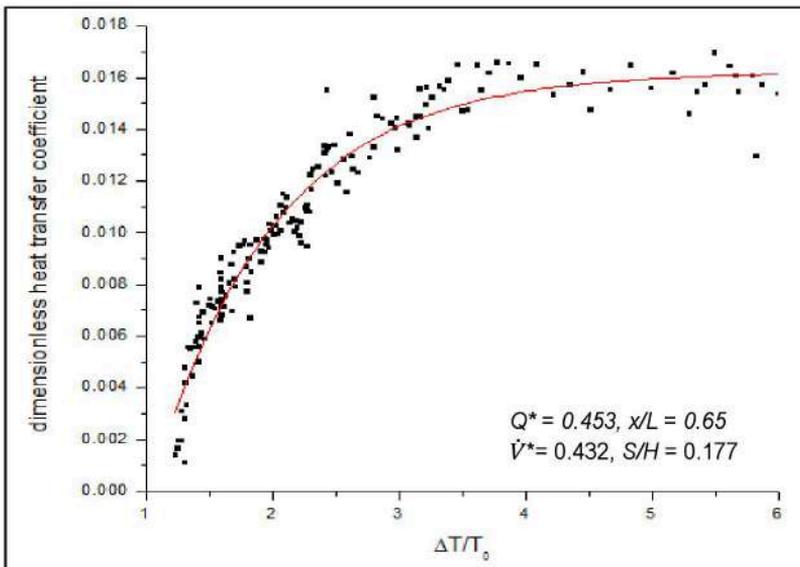
Untuk Ventilasi *Hybrid*:

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{\frac{1}{2}}} = \begin{cases} 0.001 & \text{untuk } 0 < \frac{\Delta T}{T_\infty} < 2.4 \\ 0.0009 \frac{\Delta T}{T_\infty} + 0.0012 & \text{untuk } 2.4 < \frac{\Delta T}{T_\infty} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{\frac{1}{2}}} = \begin{cases} 0.0009 & \text{untuk } 0 < \frac{\Delta T}{T_\infty} < 2.5 \\ 0.0004 \frac{\Delta T}{T_\infty} + 4 \cdot 10^{-5} & \text{untuk } 2.5 < \frac{\Delta T}{T_\infty} \end{cases} \quad (4.3)$$



(a) fase kebakaran



(b) setelah padam

Gambar 4.39 Pengaruh dinamika temperatur terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi, h untuk ventilasi *hybrid* dalam analisis nondimensional.

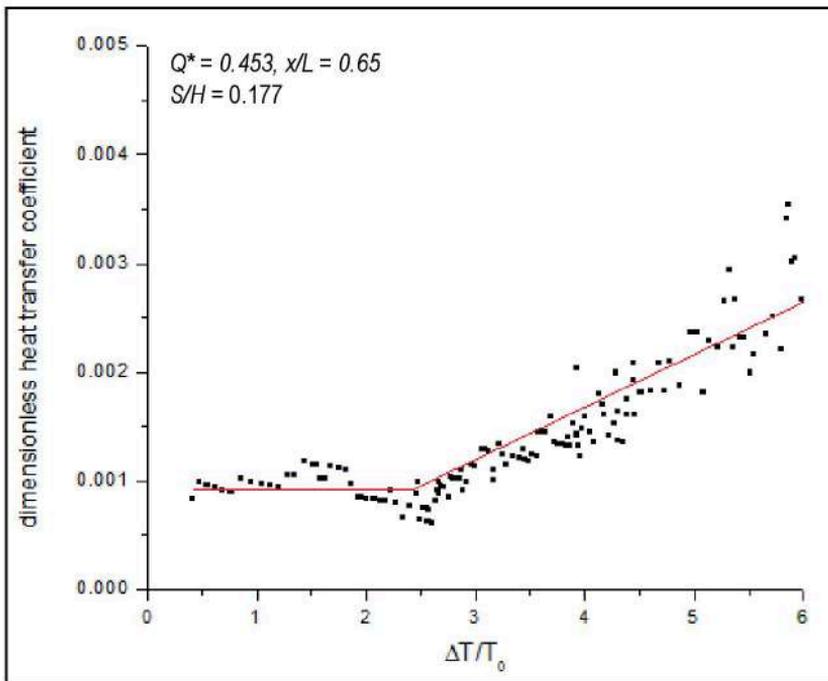
Ketika fase kebakaran selesai, laju perubahan nilai h terhadap ΔT menunjukkan eksponensial dimana untuk ventilasi *hybrid* menunjukkan nilai relatif lebih kecil dari ventilasi alami. Untuk itu, dapat dibuat korelasi hubungan nilai koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap perubahan temperatur setelah fase padam diberikan pada persamaan (4.4) dan (4.5)

Untuk Ventilasi *Hybrid*:

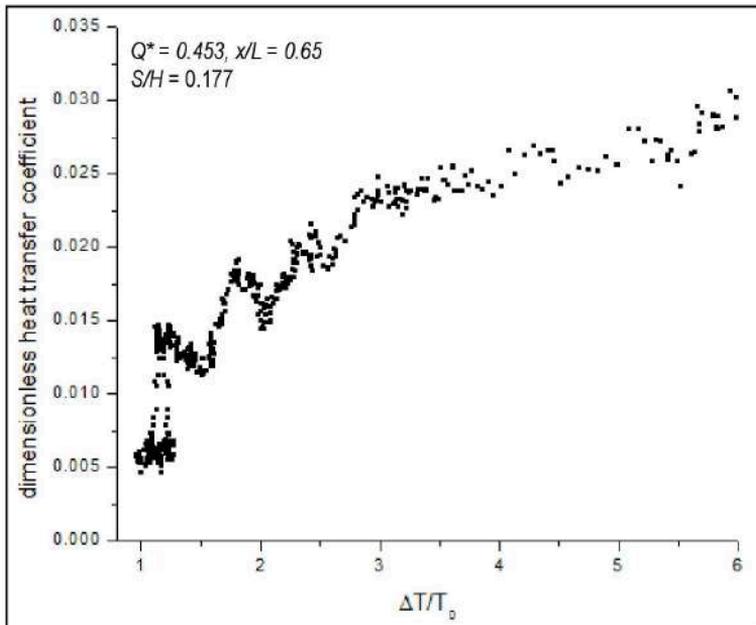
$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{1/2}} = 0.0163 - 0.046 e^{-1.034 \frac{\Delta T}{T_\infty}} \quad (4.4)$$

Untuk Ventilasi Alami:

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{1/2}} = 0.0125 \ln \frac{\Delta T}{T_\infty} + 0.0081 \quad (4.5)$$



(a) fase kebakaran



(b) setelah padam

Gambar 4.40 Pengaruh dinamika temperatur terhadap koefisien perpindahan kalor konveksi untuk ventilasi alami dalam analisis nondimensional.

Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Dari keseluruhan penelitian tentang studi eksperimen dan simulasi numerik manajemen asap kebakaran model tipikal Stasiun Metro Bawah Tanah, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil validasi simulasi dan eksperimen memiliki *trend* grafik yang sesuai dan cukup merepresentasikan kondisi sebenarnya.
2. Pendekatan parameter berdasarkan standar (*prescriptive based*) yang dilakukan dalam perancangan simulasi dan eksperimen dapat diterapkan dalam pengendalian asap kebakaran skala besar.
3. Ventilasi *hybrid* dan laju pertukaran udara yang memadai dengan mengombinasikan kapasitas ventilasi mekanik dengan laju pergantian udara setiap jamnya, $ACH = 10$ dan rasip perimeter terhadap ketinggian ventilasi alami, $S/H = 0.177$ direkomendasikan untuk pengendalian asap kebakaran skala besar dengan skenario kebakaran terburuk.
4. Ventilasi alami efektif untuk pengendalian asap kebakaran untuk volume kompartemen tertentu dan untuk lokasi tertentu dimana efek cerobong yang dihasilkan tergantung pada kondisi lingkungan dan perbedaan temperatur yang terjadi. Untuk studi ini, ventilasi alami tidak direkomendasikan penggunaannya karena memberikan efek yang kurang baik dan belum mampu mengendalikan asap kebakaran pada level aman.
5. Pada studi ini, ventilasi mekanik memiliki performa lebih efektif dibandingkan ventilasi alami berdasarkan analisis efektivitas pembuangan asap dan parameter keselamatan kebakaran. Hal ini karena ventilasi mekanik mampu bekerja lebih

dahulu ketika produksi asap kebakaran terjadi sehingga penyebaran dan efeknya mampu direduksi.

6. Penggunaan ventilasi mekanik harus memperhitungkan laju volumetrik kritis agar terhindar dari efek *plug-holing* dimana laju volumetrik aliran asap yang dibuang lebih sedikit dibandingkan laju volumetrik udara kompartemen. Penambahan jumlah *fan* dan waktu aktivasi yang tepat dapat mencegah efek *plug-holing*.
7. Selama kebakaran, faktor perpindahan kalor konduksi jauh lebih dominan dari faktor konveksi akibat panas sumber kebakaran. Akan tetapi setelah fase padam, faktor perpindahan kalor konveksi memiliki efek yang signifikan.
8. Korelasi baru terkait koefisien perpindahan kalor konveksi telah dikembangkan untuk konfigurasi ventilasi alami dan *hybrid* dimana nilai koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap perubahan temperatur untuk fase kebakaran sebagai berikut.

Untuk ventilasi *hybrid*:

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{\frac{1}{2}}} = \begin{cases} 0.001 & \text{untuk } 0 < \frac{\Delta T}{T_\infty} < 2.4 \\ 0.0009 \frac{\Delta T}{T_\infty} + 0.0012 & \text{untuk } 2.4 < \frac{\Delta T}{T_\infty} \end{cases}$$

Untuk ventilasi alami:

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{\frac{1}{2}}} = \begin{cases} 0.0009 & \text{untuk } 0 < \frac{\Delta T}{T_\infty} < 2.5 \\ 0.0004 \frac{\Delta T}{T_\infty} + 4 \cdot 10^{-5} & \text{untuk } 2.5 < \frac{\Delta T}{T_\infty} \end{cases}$$

Sedangkan nilai koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap perubahan temperatur setelah fase padam sebagai berikut:

Untuk Ventilasi *Hybrid*:

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{1/2}} = 0.0163 - 0.046 e^{-1.034 \frac{\Delta T}{T_\infty}}$$

Untuk Ventilasi Alami:

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gh)^{1/2}} = 0.0125 \ln \frac{\Delta T}{T_\infty} + 0.0081$$

5.2 Saran

Berdasarkan studi eksperimental pengaruh ventilasi *hybrid* pada dinamika asap kebakaran pada Stasiun Metro Bawah Tanah, rekomendasi yang diberikan adalah sebagai berikut:

- a. Mengurangi jumlah material mampu bakar dan memperbaiki ketinggian *ceiling* Zona *platform* dan *concourse* 4 – 5m.
- b. Diperlukan peninjauan kembali untuk mengukur perbandingan laju aliran massa asap yang keluar melalui ventilasi alami dan ventilasi mekanik sehingga akan mudah menentukan kondisi rasio S/H optimum untuk proses pelepasan.
- c. Diperlukan strategi lain yang 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.
- d. 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.
- e. Diperlukan analisis efektivitas penempatan desain ventilasi *hybrid* untuk mengoptimalkan laju pembuangan asap dan distribusi asap yang terjadi dalam zona kebakaran.
- f. Memperhatikan laju volumetrik kritis dan rasio S/H cerobong dalam mencegah efek *plug-holing*.

Daftar Pustaka

- Alpert, R.L. (1987) "Convective Heat Transfer in the Impingement Region of a Buoyant Plume", *Journal of Heat Transfer*. 109, 120–124.
- Apriano, T. (2012). *Perancangan Sistem Pendeteksi Asap Tipe Fotoelektrik Berbasis Micro Controller dan Aplikasinya Dalam Pengukuran Optical Density*. Skripsi Program Sarjana pada DTM FTUI Depok: tidak diterbitkan.
- Armono, H.D. *Teori Model Analisa dan Dimensi*, Johnny MT.S PS-FTK, 21-38.
- Axley, J.W. (2001). *Application of Natural Ventilation for U.S. Commercial Buildings Climate Suitability Design Strategies & Methods Modeling Studie*. National Institute of Standards and Technology
- Bao-ling, D.U. (2007) "Statistic Analysis of The Foreign Underground Fire Accidents Cases". *Fire Science and Technology*.
- Bowman, Mark. (2012). *Handouts of Air Change Rate*, [Online]. Tersedia : <http://web.fscj.edu/Mark.Bowman/handouts/Air%20Change%20Rates.pdf>, Florida State College, Jacksonville [17 Mei 2014]
- Cafaro, E. and Bertola, V. (2010) "Fires in Tunnels: Experiments and Modelling". *The Open Thermodynamics Journal*. 4, 156-166.
- Cheng, Huan and Yang, Xiaokuan, (2012) "Emergency Evacuation Capacity of Subway Stations", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 43, 339 – 348.
- Cheng, L.H., Cheng, T.H., and Liu, C.W. (2001) "Simulation of ventilation and fire in the underground facilities", *Fire Safety Journal*. 36, 597 – 617.
- Cooper, L.Y., (1982) "Heat Transfer from a Buoyant Plume to an Unconfined Ceiling", *Journal of Heat Transfer*. 104, (3), 446–451
- Direktorat Jenderal Cipta Karya. (2008). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No.26/PRT/M/2008 tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi Kebakaran Pada Bangunan Gedung dan Lingkungan*, Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum.
- Emmerich, S.J. (2005). *Simulated Performance of Natural and Hybrid Ventilation Systems in an Office Building, (final Report)*. National Institute of Standards and Technology.

- Emmerich, S.J. et al. (2003). *Impact of Natural Ventilation Strategies and Design Issues for California Applications, Including Input to ASHRAE Standard 62 and California Title 24*. National Institute of Standards and Technology.
- Fan, C.G. et al. (2013) “*Experimental study of air entrainment mode with natural ventilation using shafts in road tunnel fires*”. International Journal of Heat and Mass Transfer. 56, 750–757.
- Fridolf, Karl. (2010). *Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical Research*. Lund University. Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety.
- Gao, Ran et al. (2012) “*Fire-induced Smoke Control Via Hybrid Ventilation in A Huge Transit Terminal Subway Stadion*”, Energy and Buildings. 45, 280–289
- Gao-Shang, Yang, et al. (2006) “*Simulation of Smoke Flow and Longitudinal Ventilation in Tunnel Fire*”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 16, 741– 746.
- Ghojel, J.I., (1998) “*A New Approach to Modeling Heat Transfer in Compartment Fires*”, Fire Safety Journal. 31, 227—237.
- Gottuk, D.T. and White, D.A. (2002) *Liquid Fuel Fires*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Gwilliam, Ken. (2002). *Cities On The Move: A World Bank Urban Transport Strategy Review (Ch.8th)*. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development, the World Bank-Washington.
- Haack, R.A. (2001). *Designs Fire Scenario – Technical Report – Part 1*. Thematic Network Fire in Tunnel, 32.
- Hao-We, Yao et al, (2014) “*Measurement of the Smoke Layer Interface in Fires*”, Automation in Construction. 37, 223–227.
- Harold, E., Nelson, B. and Mowrer, F.W. (2002). *Emergency Movement*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Heiselberg, Per. (2006). *Design of Natural and Hybrid Ventilation*, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- Heskestad, Gunnar. (2002). *Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)

- ISO 5162-2. (2013). *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full--Part 2: Orifice plates* [Ed. I, 2003-03.01]. Switzerland : International Standard.
- Jicha, Miroslav and Charvat, Pavel. (2007). *Hybrid Ventilation* (written as part of the project BRITA in PuBs-Bringing retrofit innovation to application in public buildings, EU 6th Framework programme Eco-building). Czech Republic: Brno University of Technology
- Jin, Tadahisa, (2002). *Visibility and Human Behavior in Fire Smoke*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Jun-Bin, X.U. et al. (2013) "*The Study on Influence Factors of the Mechanical Smoke Evacuation System in Atrium Buildings*, Procedia Engineering, 52, 508-513
- Kang, Kai, and MacDonald, H.M. (2005) "*Modeling Smoke Visibility in CFD*", Fire Safety Science-Proceedings of The 8th International Symposium, International Association for Fire Safety Science (IAFSS), 1265-1276.
- Karlsson, Björn and Quintiere, J.G., (2000), *Enclosure Fire Dynamics*, Florida: CRC Press LLC, N.W. Corporate Blvd.
- Kevin, McGrattan et al. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide [M]*. NIST Special Publication 1019-5, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- Klote, J.H. (2012). *Handbook of Smoke Control Engineering*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Klote, J.H. and Milke, J.A. (2002). *Principles of Smoke Management*. Atlanta, GA: ASHRAE
- Kokkala, M. (1989). *Heat Transfer to and Ignition of Ceiling by an Impinging Diffusion Flame*, Research Report 586, Espoo: Fire Technology Laboratory, Technical Research Center of Finland.
- Kumm, Mia. (2010). *Carried Fire Load in Mass Transport Systems: A Study of Occurrence, Allocation, and Fire Behaviour of Bags and Luggage in Metro and Commuter Trains in Stockholm*. Studies in Sustainable Technology SiST 2010: 04. Stockholm: Mälardalen University.
- Lampholder Publications. (2014). *Train Accident, Subways, and Tunnels Archives 2011-2013*, International Prophecy Journal TM- Lampholder Publications 1985-2014.

- Lattimer, B.Y. (2002). *Heat Fluxes from Fires to Surfaces*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., Eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Li, Linjie et al. (2013) “*Research on the Phenomenon of Plug-holing under Mechanical Smoke Exhaust in Tunnel Fire*”, *Procedia Engineering*. 62, 1112–1120
- McGrattan, Kevin, et al. (2010) *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide–Vol.1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018 – 5. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- Milke, J.A, (2002), *Smoke Management in Covered Malls and Atria-Smoke Filling Period*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Milke, J.A. and Klote, J.H., (1998), *Smoke Management in Large Spaces in Buildings*, Melbourne, Australia : Building Control Commission of Victoria and The Broken Hill Proprietary Company Limited
- Morgan, H.P. and Gardiner, J.P. (1990). *Design Principles for Smoke Ventilation in Enclosed Shopping Centres, BR186*, Garston, U.K. : Building Research Establishment.
- Mulholland, G.W. (2002). *Smoke Production and Properties*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- National Fire Protection Association. (2000). *NFPA 130 : Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. Massachusetts, USA : NFPA-An International Codes and Standards Organization
- National Fire Protection Association. (2000). *NFPA 92B : Guide for smoke Management systems in Malls, Atria, and Large Areas*, Batterymarch Park, Quincy, MA : NFPA-An International Codes and Standards Organization
- National Fire Protection Association. (2009). *NFPA 101 : Life Safety Code*, Massachusetts, USA : NFPA-An International Codes and Standards Organization
- Pangarso dan Wijaya, T.A. (2012). *Penataan Ventilasi Alamiyah di Permukiman Padat Kampung Sayidan Yogyakarta*, Tesis Program Pascasarjana Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta : tidak diterbitkan.
- Peacock, R.D., Forney, G.P., and Reneke, P.A.. (2011) *Technical Reference Guide CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (V.6)*. 2011 Revision, NIST Special Publication 1026r1.

- Poh, Weng, (2011). *Tenability Criteria for Design of Smoke Hazard Management Systems*, Ecolibrum Forum.
- Proulx, Guylène. (2002). *Movement of People: The Evacuation Timing*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Quintiere J.G. (2002). *Compartment Fire Modeling*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Quintiere, J.G. (1989) “*Scaling Applications in Fire Research*”, Fire Safety Journal. 15, 23–29
- Quintiere, J.G. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena* (1st Edition) England : John Wiley & Sons Ltd.
- Quintiere, J.G. and McCaffrey, B.J., (1980). *The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure: Vol. I*, NBSIR 80-2054, Washington, D.C : National Bureau of Standards
- Quintiere, J.G. and Veloo, P.S. (2011) “*Convective Heat Transfer Coefficient in Compartment Fires*”, Sardinia, Italy.
- Rankin, McCormick and MacDonald, Hatch Mott. (2012). *Station Design Considerations, (Ch.6)*, Contract Y85-9 Yonge Subway Extension Conceptual Design Services, Toronto Transit Commission, Toronto : York Region Rapid Transit Corporation.
- Roh, J.S, et al. (2009) “*CFD Simulation and Assessment of Life Safety in A Subway Train Fire*”, Tunneling and Underground Space Technology. 24, 447 – 453.
- Santoso, M.A. (2012). *Pemodelan Dinamika Asap pada Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah*. Skripsi Program Sarjana DTM FTUI, Depok: tidak diterbitkan.
- Sungkar, A.A. (2013). *Studi Eksperimen Pengaruh Ventilasi Hybrid terhadap Dinamika Asap Kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah*. Skripsi Program Sarjana pada DTM FTUI Depok: tidak diterbitkan.
- Tao, Y.J. et al. (2011) “*Effect of the Open Ways of Screen Doors on Fire Smoke in a Subway Platform*”, Proceeding of The 5th Conference on Performance-Based Fire and Protection Engineering. Procedia Engineering. 11, 416 – 423.
- The Chartered Institution of Building Services Engineers. (2010). *Guide E: Fire Engineering*. London, UK: CIBSE

- The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. (2013). *Structures Design Manual for Highways and Railways [2013 Ed.]*, HongKong: Highways Department.
- Vauquelin, O. (2008) “*Experimental Simulations of Fire-Induced Smoke Control in Tunnels Using an Air-Helium Reduced Scale Model: Principle, Limitations, Results and Future*”, Tunneling and Underground Space Technology. 23, 171-178.
- Veldman, C.C., Kubota, T., and Zukoski, E.E., (1975). *An Experimental Investigation of The Heat Transfer from a Buoyant Gas Plume to Horizontal Ceiling, Part-1: Unobstructed Ceiling*, NBS-GCR-77-97, Washington, D.C. : National Bureau of Standards,
- Viot, J., Vauquelin, O., and Rhodes, N. (2001). *Characterisation of the plug-holing Phenomena for the Exhausting of a Low Density Gas Layer*”, Adelaide, Australia : 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University.
- Vuilleumier, F., Weatherill, A., and Crausaz, B., (2002). “*Safety Aspects of Railway and Road Tunnel: Example of The Lotschberg Railway Tunnel and Mont-Blanc Road Tunnel*”. Tunneling Underground Space Technology. 17, (2), 153–158.
- Vytenis, Babrauskas. (2002). *Heat Release Rates*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., Eds.)], Quincy, MA : National Fire Protection Association (NFPA)
- Walton, W.D. and Thomas, P.H. (2002). *Estimating Temperatures in Compartment Fires*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, [3rd Ed. (P.J. DiNenno et al., eds.)], Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA)
- Yan, Tong et al. (2009) “*Full-Scale Experimental Study on Smoke Flow in Natural Ventilation Road Tunnel Fires with Shafts*”. Tunnelling and Underground Space Technology. 24, 627–633.
- Yanfu, W., Juncheng, J., Dezhi Z. (2009) “*Full-scale Experiment Research and Theoretical Study for Fires in Tunnels with Roof Openings*”, Fire Safety Journal. 44, 339–348.
- Zhong, Maohua et al. (2008) “*Study of The Human Evacuation Simulation of Metro Fire Safety Analysis in China*”, Journal of Loss Prevention in The Process Industries. 21, 287–298.
- Zhong, W. et al. (2012) “*A Study of the Effect of Plug-Holing and Boundary Layer Separation on Natural Ventilation with Vertical Shaft in Urban Road Tunnel Fires*”, International Journal of Heat and Mass Transfer. 55, (21), 6032–6041

Zhong, W. et al. (2013) *“Influence of Longitudinal Wind on Natural Ventilation with Vertical Shaft in A Road Tunnel Fire, International Journal of Heat and Mass Transfer. 57, 671–678*

Lampiran

Lampiran I.

Nilai Laju Pergantian Udara (ACH) untuk Masing-Masing Jenis Bangunan [38]

Building / Room	Air Change Rates - ACR - (1/hr)	Building / Room	Air Change Rates - ACR - (1/hr)
All spaces in general	min 4	Court Houses	4 - 10
Attic spaces for cooling	12 - 15	Dental Centers	8 - 12
Auditoriums	8 - 15	Department Stores	6 - 10
Bakeries	20	Dining Halls	12 - 15
Banks	4 - 10	Dining rooms (restaurants)	12
Barber Shops	6 - 10	Dress Shops	6 - 10
Bars	20 - 30	Drug Shops	6 - 10
Beauty Shops	6 - 10	Engine rooms	4 - 6
Boiler rooms	15 - 20	Factory buildings, ordinary	2 - 4
Bowling Alleys	10 - 15	Factory buildings, fumes and moisture	10 - 15
Cafeterias	12 - 15	Fire Stations	4 - 10
Churches	8 - 15	Foundries	15 - 20
Club rooms	12	Galvanizing plants	20 - 30
Clubhouses	20 - 30	Garages repair	20 - 30
Cocktail Lounges	20 - 30	Garages storage	4 - 6
Computer Rooms	15 - 20	Homes, night cooling	10 - 18
Laundries	10 - 15	Jewelry shops	6 - 10
Libraries, public	4	Kitchens	15 - 60

Lunch Rooms	12 -15	Restaurants	8 - 12
Luncheonettes	12 -15	Retail	6 - 10
Nightclubs	20 - 30	School Classrooms	4 - 12
Malls	6 - 10	Shoe Shops	6 - 10
Medical Centers	8 - 12	Shopping Centers	6 - 10
Medical Clinics	8 - 12	Shops, machine	5
Medical Offices	8 - 12	Shops, paint	15 - 20
Mills, paper	15 - 20	Shops, woodworking	5
Mills, textile general buildings	4	Substation, electric	5 - 10
Mills, textile dye houses	15 - 20	Supermarkets	4 - 10
Municipal Buildings	4 - 10	Town Halls	4 - 10
Museums	12 -15	Taverns	20 - 30
Offices, public	3	Theaters	8 - 15
Offices, private	4	Turbine rooms, electric	5 - 10
Police Stations	4 - 10	Warehouses	2
Post Offices	4 - 10	Waiting rooms, public	4
Precision Manufacturing	10 - 50	Pump rooms	5

Lampiran II.

Bagian-bagian penting Stasiun Metro Bawah Tanah

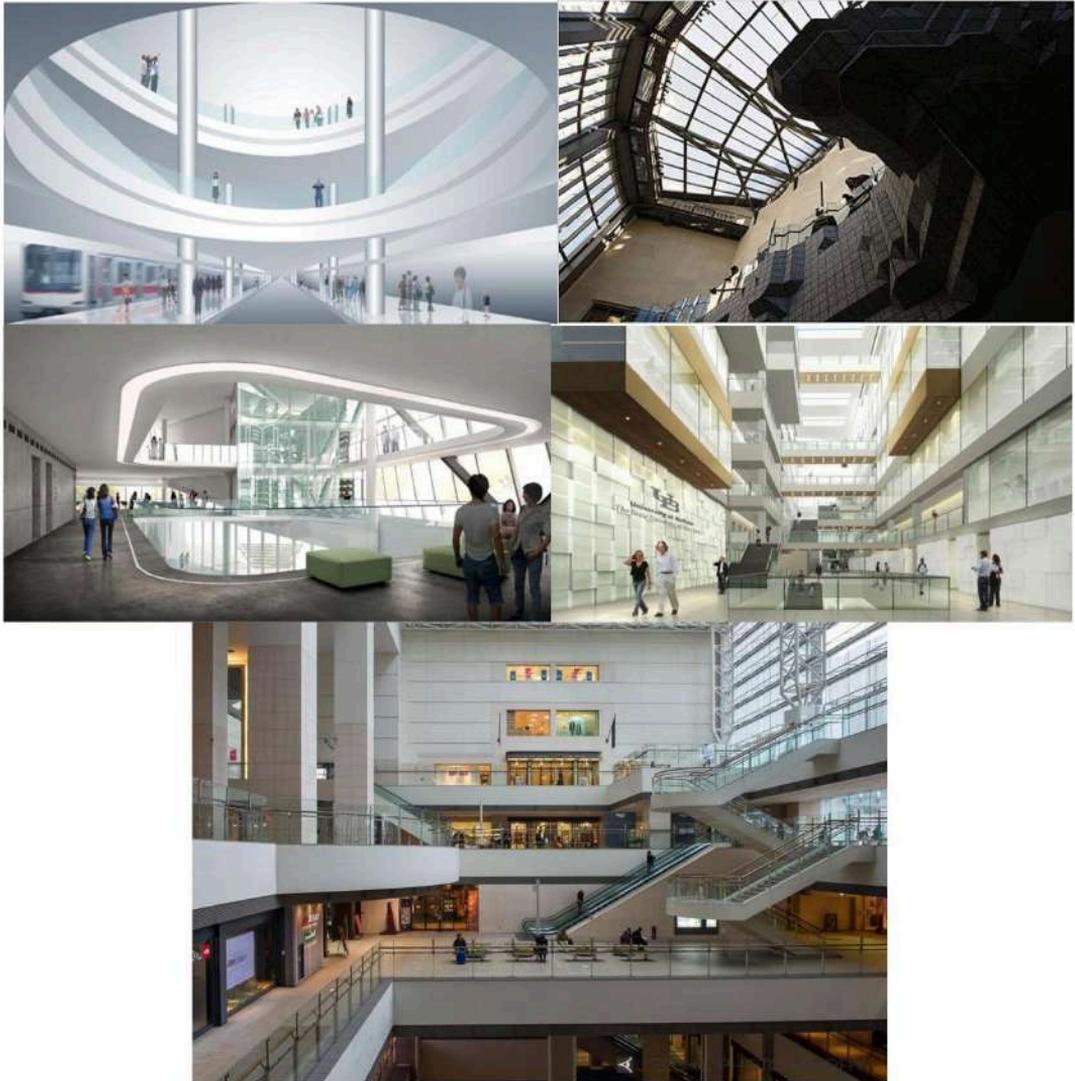
[dikutip dari berbagai sumber publikasi elektronik]



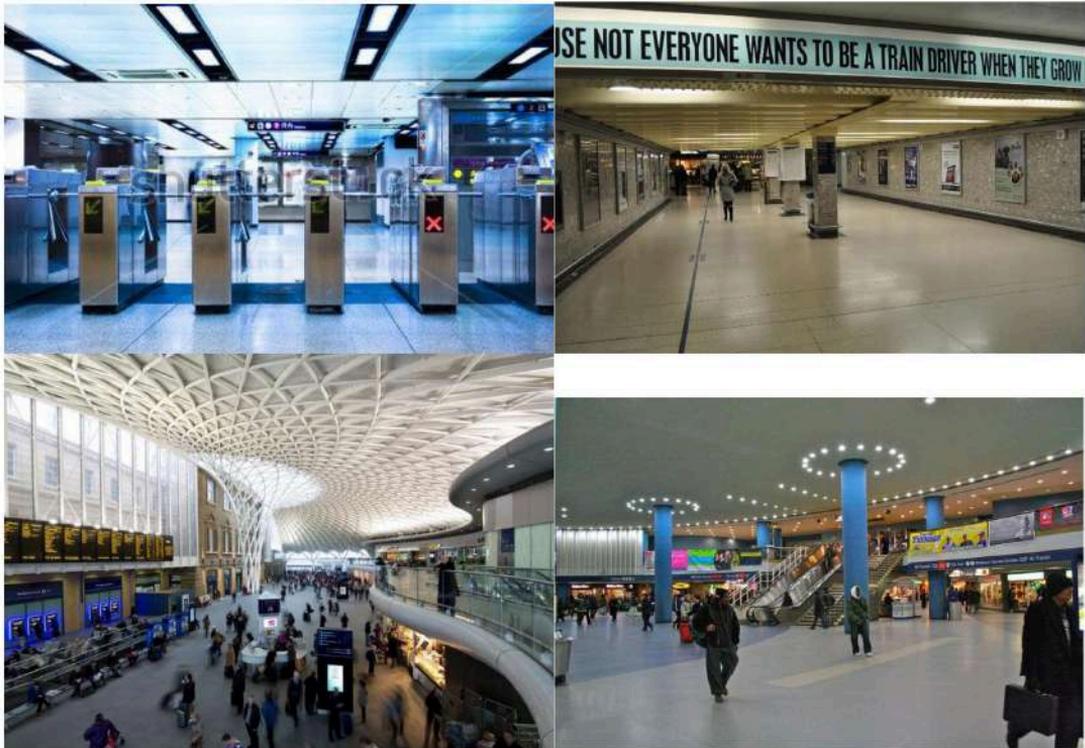
Gambar 1. Platform Screen Door (PSD) sebagai pintu pemisah dan pengaman antara kereta bawah tanah dengan platform stasiun



Gambar 2. Zona platform yang berada dibawah zona concourse sebagai tempat menuju kereta bawah tanah



Gambar 3. Atrium dan bukaan atrium dalam stasiun bawah tanah yang terhubung dengan semua lantai yang berfungsi sebagai pencahayaan alami, ventilasi alami, dan pembuangan asap.



Gambar 4. Zona *concourse* sebagai tempat multifungsi dan komersil untuk tempat pembelian tiket, wahana bermain, *food court*, aula, dan sebagainya.



Gambar 5. Interior kereta bawah tanah.



Gambar 6. Sistem ventilasi mekanik sistem hisap transversal untuk pembuangan asap dan sistem pemipaan kebakaran untuk pemadaman di area bawah tanah.

Lampiran III.
Sertifikat Standar Kalibrasi Sensor Heat Flux Water Cooled

CERTIFICATE OF CALIBRATION

DATE 9/29/08
 CUSTOMER Univ. of Indonesia
INDONESIA

P.O. NO. YSN-29-07-2008
 CERTIFICATE NO. 15726-2
 MODEL NO. 64-10SB-20

SERIAL NO. 157262
 SENSOR TYPE Schmidt-Boelter
 ABSORPTANCE 0.94
 WINDOW None

REFERENCE STANDARD 89943
 CALIBRATED BY 13

FULL SCALE OUTPUT LEVEL:
9.00 mV at 100 kW/m²
 RESPONSIVITY:
0.0900 mV per (kW/m²), or
 the inverse: 11.11 kW/m² per mV

Water: 23.4 °C 12 mL/s

UNLESS NOTED, CALIBRATION CONDITIONS:
 Non-condensing Ambient Air at 23.43 °C
 Relative Humidity Less Than 70%
 Expanded uncertainty 33% of responsibility.
 Coverage factor K=2, ~95% confidence level.
 Test uncertainty ratio (TUR) is less than 4:1.

Calibration was performed in compliance with ISO/IEC 17025, ANSI/NCSL Z540-1 and MIL-STD-45662A to MEDTHERM PI-20 with traceability to the National Institute of Standards and Technology.

This certificate applies only to the item described above. It is not to be reproduced, except in its entirety, without written permission from MEDTHERM Corporation.

ATTEST: *[Signature]*
 QA Manager
MEDTHERM CORPORATION
 President

TRANSDUCER OUTPUT
millivolts

HEAT FLUX
kW/m²
 ABSORBED
 INCIDENT

PAGE 1 OF 1

POST OFFICE BOX 412 / HUNTSVILLE ALABAMA / TELEPHONE (256) 897-9999 / FAX (256) 897-9999

Lampiran IV.

Pengaturan Simulasi Kebakaran Stasiun Bawah Tanah Berbasis Ventilasi Mekanik

Pengaturan simulasi NIST FDS V.05 untuk simulasi kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah skala 1:25 zona *platform* dengan kondisi hanya ventilasi mekanik, HRR = 2.56kW, dengan $x/L = 0.65$ pada $S/H = 0.177$ dan kapasitas pembuangan asap $V = 0.0089\text{m}^3/\text{s}$, ACH = 10

```
Nonatria_reg.4_8MW_17.7_100.000MCH_500s_4s-on.fds
```

```
&HEAD CHID='Nonatria_reg_4_8MW_17_7_100_00', TITLE='5MW_180s_50000mch_3m-  
platform'/
```

```
&TIME T_END=480.00/
```

```
&DUMP RENDER_FILE='Nonatria_reg_4_8MW_17_7_100_00.ge1', DT_RESTART=100.00/
```

```
&MISC GROUND_LEVEL=1.41, TMPA=25.00, SURF_DEFAULT='STRUCTURE'/
```

```
&MESH ID='mesh1', IJK=140,52,44, XB=0.00,1.40,0.00,0.52,0.00,0.4400/
```

```
&MESH ID='mesh2', IJK=190,26,22, XB=1.40,5.20,0.00,0.52,0.00,0.4400/
```

```
&MESH ID='mesh4', IJK=190,52,44, XB=3.80,5.20,0.00,0.52,0.00,0.4400/
```

```
&REAC ID='Gasoline',
```

```
  C=8.00,
```

```
  H=19.00,
```

```
  O=0.00,
```

```
  N=0.00,
```

```
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004/
```

```
&MATL ID='CONCRETE',
```

```
  FYI='INCROPERA ET AL, FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER 6TH ED',
```

```
  SPECIFIC_HEAT=0.88,
```

```
  CONDUCTIVITY=1.40,
```

```
  DENSITY=2.3000000E003/
```

```
&MATL ID='GLASS_PYREX',
```

```
  FYI='INCROPERA ET AL, FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER 6TH ED',
```

```
  SPECIFIC_HEAT=0.84,
```

```
  CONDUCTIVITY=1.40,
```

```
  DENSITY=2.2250000E003/
```

```
&SURF ID='STRUCTURE',
```

```
  COLOR='GRAY',
```

```
  MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
```

```
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
```

```
  THICKNESS(1)=0.1000/
```

```
&SURF ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR',
```

```
  RGB=245,245,220,
```

```
  TRANSPARENCY=0.2902,
```

MATL_ID(1,1)='GLASS_PYREX',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.0100/
 &SURF ID='EXHAUST',
 COLOR='GREEN',
 VOLUME_FLUX=8.8900000E-003/
 &SURF ID='BURNER',
 COLOR='RED',
 HRRPUA=452.62,
 RAMP_Q='BURNER_RAMP_Q'/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=0.00, F=0.00/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=0.1000, F=1.00/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=240.00, F=1.00/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=241.00, F=0.00/
 &SURF ID='STRUCTURE02',
 COLOR='GRAY',
 MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.1000/
 &SURF ID='STRUCTURE0202',
 COLOR='GRAY',
 MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.1000/
 &SURF ID='STRUCTURE03',
 COLOR='GRAY',
 MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.1000/
 &SURF ID='STRUCTURE04',
 COLOR='GRAY',
 MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.1000/
 &SURF ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR02',
 RGB=245,245,220,
 TRANSPARENCY=0.2902,
 MATL_ID(1,1)='GLASS_PYREX',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.0100/
 &SURF ID='STRUCTURE05',
 COLOR='GRAY',
 MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.1000/
 &SURF ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR03',
 RGB=245,245,220,
 TRANSPARENCY=0.2902,

MATL_ID(1,1)='GLASS_PYREX',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.0100/

&OBST XB=0.00,1.40,0.00,0.52,0.00,4.0000000E-003, SURF_ID='STRUCTURE'/
PLATFORM_FLOOR
&OBST XB=0.00,1.40,0.00,4.0000000E-004,4.0000000E-003,0.1200, RGB=245,245,220,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/
SOUTH_PLATFORM_SCREEN_DOOR
&OBST XB=0.00,1.40,0.52,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/ NORTH_PLATFORM_SCREEN_DOOR
&OBST XB=0.00,4.0000000E-004,4.0000000E-004,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/ WEST_PLATFORM_WALL
&OBST XB=5.20,5.20,4.0000000E-004,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/ EAST_PLATFORM_WALL
&OBST XB=0.00,4.0000000E-003,0.00,0.52,0.1200,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_CONCRETE_PLATFORM_WALL
&OBST XB=4.0000000E-003,0.4000,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/
PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.4000,0.4400,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/
PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.4000,0.4400,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/
PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.4400,0.84,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.84,0.88,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.84,0.88,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.88,0.90,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.90,1.30,0.00,0.1600,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=1.30,1.40,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=1.40,1.80,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=1.80,1.84,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=1.80,1.84,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=1.84,2.00,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=2.00,2.40,0.00,0.1600,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=2.00,2.40,0.3600,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=2.40,2.80,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=2.80,2.84,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=2.80,2.84,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=2.84,3.24,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.24,3.28,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.24,3.28,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.28,3.68,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.68,3.72,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.68,3.72,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.72,3.80,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.80,3.90,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.90,4.30,0.00,0.1600,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING

&OBST XB=3.90,4.30,0.3600,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.30,4.32,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.32,4.36,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.32,4.36,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.36,4.76,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.76,4.80,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.76,4.80,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.80,5.20,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=1.40,5.20,0.00,4.0000000E-003,0.1240,0.2000, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ SOUTH_PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.90,0.90,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.00,2.00,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=3.90,3.90,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.3640,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.00,2.40,0.3600,0.3640,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=3.90,4.30,0.3600,0.3640,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=1.30,1.30,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.40,2.40,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=4.30,4.30,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=0.90,1.30,0.1560,0.1600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
SOUTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.00,2.40,0.1560,0.1600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
SOUTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=3.90,4.30,0.1560,0.1600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
SOUTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=5.20,5.20,0.00,0.52,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_CONCRETE_PLATFORM_WALL
&OBST XB=0.00,0.1000,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=0.1000,0.2500,0.00,0.1848,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=0.1000,0.2500,0.3352,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=0.2500,0.90,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=0.90,1.30,0.00,0.1600,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=1.30,1.40,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=1.40,2.00,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=2.00,2.40,0.00,0.1600,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR
&OBST XB=2.00,2.40,0.3600,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_FLOOR

&OBST XB=2.40,3.80,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=3.80,3.90,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=3.90,4.30,0.00,0.1600,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=3.90,4.30,0.3600,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=4.30,4.95,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=4.95,5.10,0.00,0.1848,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=4.95,5.10,0.3352,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=5.10,5.20,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_FLOOR*
&OBST XB=0.0960,0.1000,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=0.0960,0.2540,0.3352,0.3392,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=0.2500,0.2540,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=0.0960,0.2540,0.1808,0.1848,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=4.95,4.95,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=4.95,5.10,0.3352,0.3392,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=5.10,5.10,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=4.95,5.10,0.1808,0.1848,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=0.00,1.40,0.00,4.0000000E-003,0.2040,0.3240, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ *SOUTH_CONCOURSE_WALL*
&OBST XB=1.40,3.80,0.00,4.0000000E-003,0.2040,0.3240, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ *SOUTH_CONCOURSE_WALL*
&OBST XB=3.80,5.20,0.00,4.0000000E-003,0.2040,0.3240, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ *SOUTH_CONCOURSE_WALL*
&OBST XB=0.00,1.40,0.52,0.52,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_CONCOURSE_WALL
&OBST XB=1.40,3.80,0.52,0.52,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_CONCOURSE_WALL
&OBST XB=3.80,5.20,0.52,0.52,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_CONCOURSE_WALL
&OBST XB=0.00,0.1000,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.1000,0.2500,0.00,0.1848,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.1000,0.2500,0.3352,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.2500,0.4000,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.4000,0.4400,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.4000,0.4400,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING

&OBST XB=0.4400,0.84,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.84,0.88,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.84,0.88,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.88,1.40,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=1.40,3.80,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=1.40,3.80,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=1.40,1.80,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=1.84,2.68,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=2.72,3.12,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=3.16,3.56,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=3.60,3.80,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=3.80,4.32,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.32,4.36,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.32,4.36,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.36,4.76,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.76,4.80,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.76,4.80,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.80,4.95,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.95,5.10,0.00,0.1848,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.95,5.10,0.3352,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.10,5.20,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.00,5.70,0.00,4.0000000E-003,0.3280,0.4040, COLOR='INVISIBLE',
 SURF_ID='STRUCTURE'/ SOUTH_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.00,1.40,0.52,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 NORTH_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.00,1.40,0.00,0.52,0.4040,0.4180, SURF_ID='STRUCTURE'/ STATION_CEILING
 &OBST XB=0.00,4.0000000E-003,4.0000000E-003,0.52,0.3280,0.4040,
 SURF_ID='STRUCTURE'/ WEST_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.20,5.20,4.0000000E-003,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 EAST_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.90,0.90,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=1.30,1.30,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall

&OBST XB=0.90,1.30,0.1596,0.1600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.3604,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=2.00,2.00,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=2.40,2.40,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=2.00,2.40,0.1596,0.1600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=2.00,2.40,0.3600,0.3604,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=3.90,3.90,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=4.30,4.30,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=3.90,4.30,0.1596,0.1600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=3.90,4.30,0.3600,0.3604,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=1.40,3.80,0.00,0.52,0.4040,0.4180, SURF_ID='STRUCTURE02'/ STATION_CEILING-2
 &OBST XB=3.80,5.20,0.00,0.52,0.4040,0.4180, SURF_ID='STRUCTURE0202'/
 STATION_CEILING-3
 &OBST XB=1.40,5.20,0.00,0.52,0.00,4.0000000E-003, SURF_ID='STRUCTURE03'/
 PLATFORM_FLOOR-2
 &OBST XB=1.40,4.70,0.52,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE04'/
 NORTH_CONCOURSE_CEILING-2
 &OBST XB=1.40,5.20,0.00,4.0000000E-004,4.0000000E-003,0.1200, RGB=245,245,220,
 TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR02'/
 SOUTH_PLATFORM_SCREEN_DOOR-2
 &OBST XB=4.0000000E-003,1.40,0.00,4.0000000E-003,0.1240,0.2000, RGB=128,128,128,
 TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE05'/ SOUTH_PLATFORM_CEILING-2
 &OBST XB=1.40,5.20,0.52,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
 SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR03'/ NORTH_PLATFORM_SCREEN_DOOR-2

 &VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.00,0.00,0.00,0.52,0.00,0.4400, TMP_EXTERIOR=30.00/ Vent
 Min X for mesh1
 &VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.20,5.20,0.00,0.52,0.00,0.4400, TMP_EXTERIOR=30.00/ Vent
 Max X for mesh4
 &VENT SURF_ID='EXHAUST', XB=0.1000,0.2500,0.1848,0.3352,0.4040,0.4040,
 DEVC_ID='TIMER'/ WEST_VENT
 &VENT SURF_ID='EXHAUST', XB=4.95,5.10,0.1848,0.3352,0.4040,0.4040, DEVC_ID='TIMER'/
 EAST_VENT
 &VENT SURF_ID='BURNER', XB=3.11,3.20,0.2161,0.3039,4.0000000E-003,4.0000000E-003/
 FIRE_SOURCE_8MW_GASOLINE_S=0.089m

 &SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='soot', PBY=0.2600/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=0.2600/
 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=0.2600/
 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBY=0.2600/

&TAIL /

Lampiran V.

Pengaturan Simulasi Kebakaran Stasiun Bawah Tanah berbasis Ventilasi Alami

Pengaturan simulasi NIST FDS V.05 untuk simulasi kebakaran Stasiun Metro Bawah Tanah skala 1:25 zona *platform* dengan kondisi hanya ventilasi alami, HRR = 2.56kW, dengan $x/L = 0.65$ pada $S/H = 0.177$ dan kapasitas pembuangan asap $Q = 0.0089\text{m}^3/\text{s}$, ACH = 10

Atria_reg.4_8MW_17.7_100.000MCH_500s_4s-on.fds

```
&HEAD CHID='Atria_reg_4_8MW_17_7_100_000MC', TITLE='5MW_180s_50000mch_3m-  
platform' /
```

```
&TIME T_END=480.00 /
```

```
&DUMP RENDER_FILE='Atria_reg_4_8MW_17_7_100_000MC.ge1', DT_RESTART=100.00 /
```

```
&MISC GROUND_LEVEL=1.41, TMPA=25.00, SURF_DEFAULT='STRUCTURE' /
```

```
&MESH ID='mesh1', IJK=140,52,44, XB=0.00,1.40,0.00,0.52,0.00,0.4400 /
```

```
&MESH ID='mesh3', IJK=50,52,154, XB=1.40,1.90,0.00,0.52,0.00,1.54 /
```

```
&MESH ID='mesh2', IJK=190,26,22, XB=1.90,5.70,0.00,0.52,0.00,0.4400 /
```

```
&MESH ID='mesh4', IJK=190,52,44, XB=3.80,5.70,0.00,0.52,0.00,0.4400 /
```

```
&REAC ID='Gasoline',
```

```
  C=8.00,
```

```
  H=19.00,
```

```
  O=0.00,
```

```
  N=0.00,
```

```
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004 /
```

```
&MATL ID='CONCRETE',
```

```
  FYI='INCROPERA ET AL, FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER 6TH ED',
```

```
  SPECIFIC_HEAT=0.88,
```

```
  CONDUCTIVITY=1.40,
```

```
  DENSITY=2.3000000E003 /
```

```
&MATL ID='GLASS_PYREX',
```

```
  FYI='INCROPERA ET AL, FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER 6TH ED',
```

```
  SPECIFIC_HEAT=0.84,
```

```
  CONDUCTIVITY=1.40,
```

```
  DENSITY=2.2250000E003 /
```

```
&SURF ID='STRUCTURE',
```

```
  COLOR='GRAY',
```

```
  MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
```

```
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
```

```
  THICKNESS(1)=0.1000 /
```

```
&SURF ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR',
```

```
  RGB=245,245,220,
```

TRANSPARENCY=0.2902,
 MATL_ID(1,1)='GLASS_PYREX',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
 THICKNESS(1)=0.0100/
 &SURF ID='EXHAUST',
 COLOR='GREEN',
 VOLUME_FLUX=0.00/
 &SURF ID='BURNER',
 COLOR='RED',
 HRRPUA=452.62,
 RAMP_Q='BURNER_RAMP_Q'/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=0.00, F=0.00/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=0.1000, F=1.00/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=240.00, F=1.00/
 &RAMP ID='BURNER_RAMP_Q', T=241.00, F=0.00/

 &OBST XB=0.00,5.70,0.00,0.52,0.00,4.0000000E-003, SURF_ID='STRUCTURE'/
 PLATFORM_FLOOR
 &OBST XB=0.00,5.70,0.00,4.0000000E-004,4.0000000E-003,0.1200, RGB=245,245,220,
 TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/
 SOUTH_PLATFORM_SCREEN_DOOR
 &OBST XB=0.00,5.70,0.52,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
 SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/ NORTH_PLATFORM_SCREEN_DOOR
 &OBST XB=0.00,4.0000000E-004,4.0000000E-004,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
 SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/ WEST_PLATFORM_WALL
 &OBST XB=5.70,5.70,4.0000000E-004,0.52,4.0000000E-003,0.1200,
 SURF_ID='PLATFORM_SCREEN_DOOR'/ EAST_PLATFORM_WALL
 &OBST XB=0.00,4.0000000E-003,0.00,0.52,0.1200,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
 WEST_CONCRETE_PLATFORM_WALL
 &OBST XB=4.0000000E-003,0.4000,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.4000,0.4400,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.4000,0.4400,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.4400,0.84,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.84,0.88,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.84,0.88,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.88,0.90,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.90,1.30,0.00,0.1600,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=1.30,1.40,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=1.90,2.30,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=2.30,2.34,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=2.30,2.34,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=2.34,2.50,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=2.50,2.90,0.00,0.1600,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
 &OBST XB=2.50,2.90,0.3600,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING

&OBST XB=2.90,3.30,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.30,3.34,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.30,3.34,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.34,3.74,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.74,3.78,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.74,3.78,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=3.78,4.18,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.18,4.22,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.18,4.22,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.22,4.30,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.30,4.40,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.40,4.80,0.00,0.1600,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.40,4.80,0.3600,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.80,4.82,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.82,4.86,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.82,4.86,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.86,5.26,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=5.26,5.30,0.00,0.2400,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=5.26,5.30,0.2800,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=5.30,5.70,0.00,0.52,0.1200,0.1240, SURF_ID='STRUCTURE'/ PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.0000000E-003,5.70,0.00,4.0000000E-003,0.1240,0.2000, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ SOUTH_PLATFORM_CEILING
&OBST XB=4.0000000E-003,5.70,0.52,0.52,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_PLATFORM_CEILING
&OBST XB=0.90,0.90,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.50,2.50,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=4.40,4.40,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
WEST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.3640,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.50,2.90,0.3600,0.3640,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=4.40,4.80,0.3600,0.3640,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=1.30,1.30,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.90,2.90,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=4.80,4.80,0.1600,0.3600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
EAST_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=0.90,1.30,0.1560,0.1600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
SOUTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=2.50,2.90,0.1560,0.1600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
SOUTH_STAIR_COLOUMN
&OBST XB=4.40,4.80,0.1560,0.1600,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
SOUTH_STAIR_COLOUMN

&OBST XB=5.70,5.70,0.00,0.52,0.1240,0.2000, SURF_ID='STRUCTURE'/
 EAST_CONCRETE_PLATFORM_WALL
 &OBST XB=0.00,0.1000,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=0.1000,0.2500,0.00,0.1848,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=0.1000,0.2500,0.3352,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=0.2500,0.90,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=0.90,1.30,0.00,0.1600,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=1.30,1.40,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=1.90,2.50,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=2.50,2.90,0.00,0.1600,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=2.50,2.90,0.3600,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=2.90,4.30,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=4.30,4.40,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=4.40,4.80,0.00,0.1600,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=4.40,4.80,0.3600,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=4.80,5.45,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=5.45,5.60,0.00,0.1848,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=5.45,5.60,0.3352,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=5.60,5.70,0.00,0.52,0.2000,0.2040, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONOURSE_FLOOR
 &OBST XB=1.40,1.40,4.0000000E-003,0.52,0.1240,0.3248, SURF_ID='STRUCTURE'/
 Obstruction
 &OBST XB=1.90,1.90,4.0000000E-003,0.52,0.1240,0.3248, SURF_ID='STRUCTURE'/
 Obstruction
 &OBST XB=1.40,1.40,4.0000000E-003,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 Obstruction
 &OBST XB=1.90,1.90,4.0000000E-003,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 Obstruction
 &OBST XB=1.40,1.90,0.00,4.0000000E-003,0.2000,0.3280, RGB=240,240,240,
 TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ Obstruction
 &OBST XB=1.40,1.90,0.52,0.52,0.2000,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ Obstruction
 &OBST XB=0.0960,0.1000,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT
 &OBST XB=0.0960,0.2540,0.3352,0.3392,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT
 &OBST XB=0.2500,0.2540,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT
 &OBST XB=0.0960,0.2540,0.1808,0.1848,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT
 &OBST XB=5.45,5.45,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT
 &OBST XB=5.45,5.60,0.3352,0.3392,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT
 &OBST XB=5.60,5.60,0.1848,0.3352,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONOURSE_DUCT

&OBST XB=5.45,5.60,0.1808,0.1848,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_DUCT
&OBST XB=0.00,1.40,0.00,4.0000000E-003,0.2040,0.3240, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ *SOUTH_CONCOURSE_WALL*
&OBST XB=1.90,4.30,0.00,4.0000000E-003,0.2040,0.3240, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ *SOUTH_CONCOURSE_WALL*
&OBST XB=4.30,5.70,0.00,4.0000000E-003,0.2040,0.3240, RGB=128,128,128,
TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ *SOUTH_CONCOURSE_WALL*
&OBST XB=0.00,1.40,0.52,0.52,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_CONCOURSE_WALL
&OBST XB=1.90,4.30,0.52,0.52,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_CONCOURSE_WALL
&OBST XB=4.30,5.70,0.52,0.52,0.2040,0.3240, SURF_ID='STRUCTURE'/
NORTH_CONCOURSE_WALL
&OBST XB=0.00,0.1000,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.1000,0.2500,0.00,0.1848,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.1000,0.2500,0.3352,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.2500,0.4000,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.4000,0.4400,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.4000,0.4400,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.4400,0.84,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.84,0.88,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.84,0.88,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=0.88,1.40,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_CEILING*
&OBST XB=1.90,4.30,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=1.90,4.30,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=1.90,2.30,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=2.34,3.18,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=3.22,3.62,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=3.66,4.06,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=4.10,4.30,0.2400,0.2800,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
CONCOURSE_CEILING
&OBST XB=4.30,4.82,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ *CONCOURSE_CEILING*

&OBST XB=4.82,4.86,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.82,4.86,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=4.86,5.26,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.26,5.30,0.00,0.2400,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.26,5.30,0.2800,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.30,5.45,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.45,5.60,0.00,0.1848,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.45,5.60,0.3352,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/
 CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.60,5.70,0.00,0.52,0.3240,0.3280, SURF_ID='STRUCTURE'/ CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.00,5.70,0.00,4.0000000E-003,0.3280,0.4040, RGB=128,128,128,
 TRANSPARENCY=0.00, SURF_ID='STRUCTURE'/ SOUTH_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.00,5.70,0.52,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 NORTH_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=0.00,5.70,0.00,0.52,0.4040,0.4180, SURF_ID='STRUCTURE'/ STATION_CEILING
 &OBST XB=0.00,4.0000000E-003,4.0000000E-003,0.52,0.3280,0.4040,
 SURF_ID='STRUCTURE'/ WEST_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=5.70,5.70,4.0000000E-003,0.52,0.3280,0.4040, SURF_ID='STRUCTURE'/
 EAST_CONCOURSE_CEILING
 &OBST XB=1.74,1.74,0.1715,0.3485,0.4080,1.41, SURF_ID='STRUCTURE'/ Obstruction
 &OBST XB=1.56,1.56,0.1715,0.3485,0.4080,1.41, SURF_ID='STRUCTURE'/ Obstruction
 &OBST XB=1.56,1.74,0.1715,0.1715,0.4080,1.41, SURF_ID='STRUCTURE'/ Obstruction
 &OBST XB=1.56,1.74,0.3485,0.3485,0.4080,1.41, SURF_ID='STRUCTURE'/ Obstruction
 &OBST XB=0.90,0.90,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=1.30,1.30,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=0.90,1.30,0.1596,0.1600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=0.90,1.30,0.3600,0.3604,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall
 &OBST XB=2.50,2.50,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=2.90,2.90,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=2.50,2.90,0.1596,0.1600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=2.50,2.90,0.3600,0.3604,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1]
 &OBST XB=4.40,4.40,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=4.80,4.80,0.1600,0.3600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=4.40,4.80,0.1596,0.1600,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]
 &OBST XB=4.40,4.80,0.3600,0.3604,0.0800,0.1200, SURF_ID='STRUCTURE'/ Drop Wall[1][1]

&HOLE XB=1.5615000E000,1.7385000E000,1.7150000E-001,3.4850000E-001,4.0400000E-
 001,4.1800000E-001/ Hole

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.00,0.00,0.00,0.52,0.00,0.4400, TMP_EXTERIOR=30.00/ Vent
 Min X for mesh1
 &VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.40,1.90,0.00,0.52,1.54,1.54, TMP_EXTERIOR=30.00/ Vent Max Z
 for mesh3

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.70,5.70,0.00,0.52,0.00,0.4400, TMP_EXTERIOR=30.00/ Vent
Max X for mesh4

&VENT SURF_ID='EXHAUST', XB=0.1000,0.2500,0.1848,0.3352,0.4040,0.4040,
DEVC_ID='TIMER'/ WEST_VENT

&VENT SURF_ID='EXHAUST', XB=5.45,5.60,0.1848,0.3352,0.4040,0.4040, DEVC_ID='TIMER'/
EAST_VENT

&VENT SURF_ID='BURNER', XB=3.61,3.70,0.2161,0.3039,4.0000000E-003,4.0000000E-003/
FIRE_SOURCE_8MW_GASOLINE_S=0.089m

&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='soot', PBX=0.2600/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.2600/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.2600/

&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=0.2600/

&TAIL /

Biografi Penulis

**Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc.,
Ph.D**

Yulianto Sulisty Nugroho, adalah sosok dosen Teknik Mesin yang selalu tampil ceria dan tersenyum. Mungkin hal ini diperlukan untuk mengimbangi kompleksitas mata kuliah Fire Safety Engineering yang diampunya. Yulianto atau Toto untuk sebutan kecilnya adalah generasi pertama yang mengenyam pendidikan Sarjana Teknik Mesin secara penuh di kampus UI Depok. Tugas akhirnya di bawah bimbingan Bpk Wahyu Nirbito berhasil menjadi salah satu wakil Universitas Indonesia dalam ajang Pameran Ristek tingkat nasional.

Yulianto lahir dari keluarga yang memiliki tradisi pendidikan yang kuat, dengan Ibunda (Almh) berprofesi sebagai guru dan Ayah seorang Akuntan yang juga aktif memberikan kuliah. Perhatiannya yang kuat terhadap aspek energi (*energy*) dan keselamatan (*safety*) mendorong minatnya untuk mendalami bidang *Combustion* dan *Fire Safety* di Leeds University, United Kingdom. Tugas belajar tingkat doktoral berhasil diselesaikannya pada tahun 2000 dengan PhD Thesis berjudul *Self-Ignition of Indonesia Coal* dengan supervisors Prof. AC McIntosh dan Prof. BM Gibbs. Menurutnya, masa belajar yang paling berkesan adalah pada saat menjalani program PhD. Selama tiga tahun program, Yulianto menempuh tiga fase kehidupan, sebagai bujangan di tahun pertama, suami di tahun kedua, dan ayah pada saat menyelesaikan studi.

Karirnya sebagai asisten dosen di Jurusan Teknik Mesin kala itu, berawal pada tahun 1993, dengan menjadi Asisten Dosen untuk mata kuliah Mekanika Teknik dengan dosen Bpk. Suwito (Alm). Sekembalinya dari studi doktoral (PhD) di tahun 2000, Yulianto mengembangkan mata kuliah Safety Health and Environmental Protection (SHE) dan Fire Safety Engineering di Departemen Teknik Mesin FTUI.

Berbagai penugasan di bidang manajemen akademik yang telah ditekuninya umumnya berkaitan dengan bidang pendidikan dan riset, termasuk akreditasi, scheme program hibah kompetisi untuk pengembangan program studi/departemen dan pengembangan program magister dalam bidang Teknik Keselamatan Kebakaran.

Untuk mendukung kegiatan riset, berbagai hibah riset tingkat UI, tingkat Nasional dan Internasional telah dapat diraihnya selama medio 2001 hingga saat ini. Beberapa milestones penting bidang riset dan pengembangan a.l.: Yulianto telah berhasil mengembangkan teknik pengkajian resiko pembakaran spontan batubara berbasis kondisi adiabatik, yang telah dimanfaatkan oleh berbagai perusahaan batubara. Tim Peneliti dibawah koordinasinya telah berhasil mengembangkan *fire calorimeter* yang berguna untuk mengukur berbagai parameter thermal material mampu bakar secara simultan. Yulianto dan tim telah pula mampu mengembangkan sistem proteksi kebakaran berbasis kabut air (*water-mist*) untuk memadamkan api jenis *pool fire*. Melalui kolaborasi multidisiplin dengan rekan peneliti berlatar belakang teknik, psikologi, kesehatan masyarakat dan ekonomi, telah dilakukan pengembangan model kebakaran antar bangunan sebagai salah satu instrumen bagi penyusunan kebijakan penataan wilayah dan mitigasi bencana.

Saat ini Yulianto dan Tim tengah mengembangkan *intelligent systems* yang mengintegrasikan antara sistem deteksi api/asap berbasis citra visual dengan sistem proteksi aktif. Dasar pertimbangannya adalah bahwa upaya konservasi energi (*energy conservation*) tetap perlu diperhatikan walaupun untuk upaya pemadaman api sekalipun.

Salah satu hobinya yang paling mengasyikkan adalah travelling. Kegemarannya ini telah membawanya pergi ke sekitar 15 negara di dunia. Diskusinya dengan tokoh-tokoh besar di bidang Coal Science di Shanxi China (1999), Edinburgh, Scotland (2004) dan di bidang Fire Safety Engineering dalam Annual Fire Conference 2007 di Maryland USA, dan the 9th International Symposium on Fire Safety Science di Karlsruhe, Germany 2008, membuka kesempatan baginya menjadi International Reviewer Seminar dan Jurnal Internasional *Energy and Fuel* - Elsevier. Yulianto

menjadi active member dari IAFSS dan the Combustion Institute. Hingga saat ini Yulianto adalah satu-satunya wakil dari Indonesia dalam forum International Association on Fire Safety Science (IAFSS).

Yulianto juga aktif menjadi peneliti dan narasumber untuk pemanfaatan batubara dan menjadi Co-host/narasumber untuk acara Sahabat Hemat yang ditayangkan melalui saluran televisi nasional. Melalui acara ini diharapkan muncul *attitude* untuk melakukan penghematan energi di kalangan masyarakat luas.

Sebagai Professor in *Fire Safety Engineering* (sejak 1 Juni 2009), Dr. Yulianto berupaya menggelorakan kesadaran masyarakat akan pentingnya aspek *Safety Health and Environment* dalam aktivitas keseharian, dan meningkatkan peran Universitas Indonesia di tingkat nasional dan internasional melalui kegiatan riset terintegrasi dengan *research objectives*.

To ensure the development of innovative fire safety technologies enabling the implementation of next generation performance-based standards in a cost-effective manner.

Pernikahannya dengan Dyah Ikawati telah dikaruniai oleh seorang putri dan dua orang putra, yaitu Sarah Fatimah Nugroho, Reza Adyanto Nugroho, dan Ihsan Andyto Nugroho.

Ali Abdurrahman Sungkar

Email : ali.sungkar@alumni.ui.ac.id

Twitter : @AliAliSungkar

Ali Abdurrahman Sungkar lahir di Jakarta pada tanggal 14 Mei 1991, Penulis telah menyelesaikan Program Sarjana dalam bidang Teknik Mesin di Departemen Teknik Mesin tahun 2013 dan program pascasarjana program magister di Departemen Teknik Mesin FTUI tahun 2012 atas beasiswa unggulan program Fast Track BKPLN Dikti. Penulis fokus dalam bidang keselamatan kebakaran yang ditekuni selama dua tahun terakhir, khususnya penelitian *metro tunnel/stasiun* bawah tanah bersama pembimbing Prof. Yulianto S. Nugroho, Ph.D dan saudara M. Agung Santoso, M.T. Penulis pernah aktif berorganisasi pada lembaga kemahasiswaan di tingkat departemen (Ikatan Mahasiswa Mesin) dan fakultas (BEM) di FTUI. Saat ini, aktif dalam memberikan pelatihan untuk program kreativitas mahasiswa, penulisan karya ilmiah, dan persiapan kontingen lomba keilmiah di tingkat fakultas dan PIMNAS.

Akibat ketertarikan dengan dunia teknik dan riset, penulis bersama rekan-rekan *Greeneration Universitas Indonesia* telah berhasil membuat beberapa rekayasa produk ramah lingkungan, diantaranya Kinetic Handphone Recharger dengan memanfaatkan sepeda kampus (2010), *Warm-Cool Box Portable* berbasis Termoelektrik (2011), Refrijerator berbasis Termoelektrik dan Pipa Kalor (2012). Prestasi yang dimiliki penulis, diantaranya dalam ajang Olimpiade Ilmiah Mahasiswa Universitas Indonesia tahun 2011 dan 2012 cabang *journal competition* (medali emas) and *research project* (medali perak), Medali perunggu dalam cabang lomba PKM-KC pada Pekan Ilmiah Mahasiswa (PIMNAS) 26, Mataram tahun 2012, Mahasiswa berprestasi utama kategori riset tahun 2013, dan salah satu penerima FTUI Award untuk publikasi jurnal internasional kategori mahasiswa program Pascasarjana di awal tahun 2014.

Publikasi penulis selama menempuh studi di FTUI diantaranya yaitu:

Sungkar, A.A. et al. (2013) “*Performance of Thermoelectric and Heat Pipes Refrigerator*”, *Journal of Applied Mechanics and Materials- Advances in Thermofluids*. 388, 52-57, sebagai peneliti utama

Santoso, M.A., Sungkar, A.A., Nugroho, Y.S., (2014) “Numerical and Experimental Studies of Forced and Hybrid Ventilation on Smoke Obscuration in a Subway Station’s Fire”, *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Elsevier (dalam proses penerbitan), sebagai peneliti II

Mahasiswa Program Pascasarjana DTM-FTUI 2012. (2012), *Perpindahan Kalor Pendidihan dan Aliran Dua Fase* (Ed. Raldi A. Koestoer). Depok: tidak diterbitkan. sebagai tim penyusun dan telah didistribusikan ke 22 perguruan tinggi di Indonesia

Nugroho, Y.S. et al. (2013) “Development of Smoke Management Demonstration Apparatus”, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XII.*, sebagai peneliti III

serta beberapa artikel ilmiah dalam program kreativitas mahasiswa (PKM AI) baik di tingkat fakultas, universitas, maupun nasional.



Ingin Menerbitkan Buku?

Punya naskah? Ingin naskahnya segera diterbitkan?

Sahabat bisa memilih beberapa paket penerbitan berikut ini:

Hanya dengan Rp. 350.000 Impian Sahabat Memiliki Buku Karya Sendiri Akan Terwujud

Fasilitas :

- Layanan edit aksara dan penyempurnaan EyD
- Pembuatan cover buku disesuaikan dengan permintaan (1x revisi)
 - Pembuatan Layout isi bergambar
 - Pengurusan ISBN
- Mendapat 1 buku terbit, gratis ongkir seluruh Indonesia.
- Promo buku via online (blog, facebook, twitter, dan website-website yang bekerjasama dengan kami serta lomba-lomba menulis yang kami selenggarakan)
 - Royalti 10% dari buku yang terjual melalui PenA Indis
- Potongan harga 20% sebagai pengganti royalti jika buku terjual melalui penulis
 - Terbit dalam waktu 30-45 hari kerja, terhitung sejak awal kesepakatan.
 - **Penulis minimal memesan cetak buku 5 eksemplar**

Pengiriman naskah terbit Maksimal jumlah 75 halaman A4 margin 3333, font 12 pt, spasi 1,5.
Kelebihan halaman, perlembarnya dikenakan biaya Rp.1000

SEGERA hubungi ke No. Hp. 082113883062 atau
email ke www.pena_indhis@yahoo.co.id untuk info lebih lanjut.

Mau Jadi Agen?

Bagi Anda yang berminat menjadi agen atau ingin menjual buku-buku terbitan Pena Indis,

**kami beri diskon khusus 25%
untuk pembelian netto
di atas 500.000 rupiah.**

**Dan diskon 30%
untuk pembelian netto
di atas 1 juta rupiah**



Info Katalog Buku Pena Indis:
Silakan Kunjungi www.indhisbook.com
atau hubungi: 082113883062 (Sdr. Fandy)



Penulis Kreatif, Menulis Untuk Dakwah

Pena Indis
Penerbit Buku Dakwah Indonesia

P e n e r b i t
PENA INDIS

Jalan Borong Raya - Kompleks Bitoa Lama No.78 Kelurahan Antang,
Kecamatan Manggala, Makassar
Sulawesi Selatan, 90234



No Hp/WhatsApp: 082113883062



Toko Online: www.indhisbook.com



Email: pena_indhis@yahoo.co.id



Facebook: www.facebook.com/pena.indhis



Blog : www.penaindhis.com



Twitter: www.twitter.com/Penalndhis

Menerbitkan Buku Bersama Kami