



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENELITIAN PENGARUH PEMBERIAN TEKANAN
(PRESURISASI) TERHADAP OPASITAS ASAP PADA RUANG
TANGGA KEBAKARAN DI GEDUNG BERTINGKAT TINGGI**

SKRIPSI

REFALDO FANTHER

0806454903

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENELITIAN PENGARUH PEMBERIAN TEKANAN
(PRESURISASI) TERHADAP OPASITAS ASAP PADA RUANG
TANGGA KEBAKARAN DI GEDUNG BERTINGKAT TINGGI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

REFALDO FANTHER

0806454903

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Refaldo Fanther

NPM : 0806454903

Tanda Tangan :



Tanggal : 9 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

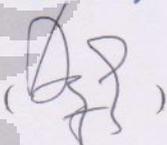
Nama : Refaldo Fanther
NPM : 0806454903
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi :

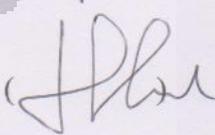
**Penelitian Pengaruh Pemberian Tekanan (Presurisasi) Terhadap Opasitas
Asap Pada Ruang Tangga Kebakaran Di Gedung Bertingkat Tinggi**

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc., Ph.D ()

Penguji : Dr. Agus Pamitran, ST., MEng. ()

Penguji : Dr. Ir. M. Idrus Alhamid ()

Penguji : Ir. Agung Subagio, Dipl. Ing. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan banyak berkah, kenikmatan hidup, dan selalu memberikan yang terbaik di setiap jalan yang saya tempuh. Shalawat serta salam saya curahkan kepada junjungan kita semua Baginda Nabi Besar Muhammad SAW beserta keluarganya, para sahabat, dan semua pengikut setianya hingga hari akhir tiba. Akhirnya dengan kerja keras dan penuh keyakinan, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul:

Penelitian Pengaruh Pemberian Tekanan (Presurisasi) Terhadap Opasitas Asap Pada Ruang Tangga Kebakaran Di Gedung Bertingkat Tinggi

Penulisan skripsi ini adalah salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis sepenuhnya menyadari bahwa dalam proses pengerjaan skripsi ini banyak menerima bantuan dari berbagai pihak, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, penulis sangat berterima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, H. Madadi, BA dan Hj. Maisah, yang selalu mendoakan anaknya untuk mendapatkan yang terbaik dan selalu yakin bahwa anaknya akan menjadi orang besar yang dapat mengubah dunia. Serta keluarga tercinta Mas Fren, Frans, dan Juan.
2. Pembimbing penulis, Prof. Ir. Yulianto S nugroho, M.Sc., Ph.D, yang masih menyempatkan waktunya untuk proses bimbingan dalam kesibukan semua agenda yang sangat padat. Terima kasih juga atas pelajaran hidup dengan pendekatan “fire” yang selalu diberikan dalam proses perkuliahan.
3. Para pengabdian yang luar biasa, pembawa pesan pengetahuan, sekaligus pencetak generasi perubahan, yaitu para dosen, guru besar, dan semua pendidik penulis dari kecil hingga sekarang.
4. ASHRAE Undergraduated Senior Project Grant Program 2012-2013 under the super vision Prof. Ir. Yulianto S nugroho, M.Sc., Ph.D, sehingga pengerjaan penelitian dapat terlaksana dengan baik.

5. Indah Gilang Pusparani, orang yang terkasih yang selalu setia memberikan dukungan dan semangat di setiap kesempatan.
6. Mas Syarif yang selalu sedia meminjamkan kunci lab Fire, serta seluruh karyawan dan staf DTM yang setia selalu untuk membantu mahasiswa Teknik Mesin.
7. Teman-teman penulis yang setia membantu M Agung Santoso yang selalu bersedia membantu penulis ketika ada kebuntuan dalam pengerjaan skripsi, Anindio Prabu yang dengan baik hati meminjamkan kamera selama masa penulis di lab, Tito Apriano yang sangat membantu dalam proses eksperimen uji sensor *beam*, serta kepada Ali Abdurrahman Sungkat beserta tim tugas merancang *fire safety* yang sangat membantu dalam pembuatan maket gedung bertingkat tinggi.
8. Kepada angkatan 2008 teknik mesin yang siap selalu untuk menjadi yang terbaik, serta kepada seluruh Keluarga Besar Universitas Indonesia yang selalu siap menjadi penerang bagi bangsa dan negara tercinta.

Penulis juga tidak lupa memohon maaf apabila terdapat kesalahan dan kekurangan dalam pengerjaan skripsi ini karena keterbatasan penulis sebagai manusia biasa. Maka dari itu, penulis sangat terbuka untuk menerima saran dan kritik yang membangun untuk hasil yang lebih baik di masa mendatang.

Semoga skripsi yang sudah penulis kerjakan dapat bermanfaat bagi peningkatan pengetahuan dan dapat menjadi referensi bagi banyak mahasiswa Teknik Mesin maupun masyarakat umum.

Depok, 9 Juli 2012



Refaldo Fanther

NPM: 0806 454 903

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

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

Nama : Refaldo Fanther
NPM : 0806454903
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Penelitian Pengaruh Pemberian Tekanan (Presurisasi) Terhadap Opasitas Asap Pada Ruang Tangga Kebakaran Di Gedung Bertingkat Tinggi

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 9 Juli 2012

Yang menyatakan



(Refaldo Fanther)

ABSTRAK

Nama : Refaldo Fanther
Program Studi : Teknik Mesin
Judul :

Penelitian Pengaruh Pemberian Tekanan (Presurisasi) Terhadap Opasitas Asap Pada Ruang Tangga Kebakaran di Gedung Bertingkat Tinggi

Penelitian tentang pengaruh pemberian tekanan (presurisasi) terhadap opasitas asap pada ruang tangga kebakaran di gedung bertingkat tinggi dilakukan pada suatu model gedung bertingkat dengan sistem presurisasi berukuran 70 cm x 65 cm x 200 cm menggunakan skala 1:20 dibandingkan dengan desain gedung bertingkat tinggi yang sebenarnya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh dari jumlah pintu terbuka di dalam ruang tangga bertekanan terhadap opasitas asap di gedung bertingkat tinggi. Penggunaan tekanan melalui pemberian suplai udara di dalam ruang tangga kebakaran adalah sebagai salah satu bentuk sistem pengendalian asap yang bertujuan untuk mencegah asap memasuki ruang tangga pada saat kebakaran. Penggunaan presurisasi pada ruang tangga juga disimulasikan dengan desain gedung yang sebenarnya, menggunakan *Fire Dynamic Simulator (FDS Ver. 5.0)*. Data yang diperoleh melalui eksperimen pada model akan dibandingkan dengan hasil analisis yang dilakukan pada simulasi. Hasil dari penelitian ini adalah sistem ruang tangga kebakaran terbukti menurunkan tingkat opasitas asap, sehingga dapat diaplikasikan untuk mencegah asap kebakaran pada gedung bertingkat tinggi.

Kata kunci: ruang tangga kebakaran, sistem presurisasi, sistem pengendalian asap, opasitas asap, gedung bertingkat tinggi

ABSTRACT

Name : Refaldo Fanther
Major : Mechanical Engineering
Title :

Effect of Pressurisation on Optical Density of Smoke into Stairwells at High Rise Building

Experimental work on the effect of pressurized system on *optical density* of smoke in a high rise building was studied using a model with the size 70 cm x 65 cm x 200 cm. This represents a scaling factor of 1:20 compared to the typical building size. This study aims to study the influence of the number of open doors in the pressurized stairwell to the optical density of smoke in the high-rise buildings. The pressurization through the provision of air supply in the stairwell is as one of smoke control systems that aim to prevent smoke from entering the stairwell during a fire. The effect of pressurization on the stairwell was also simulated with the actual building design, using the Fire Dynamic Simulator (FDS Ver. 5.0). The data obtained through experiments on the model were compared with the results of analyzes performed on the simulation. The result of this research is the pressurized stairwell system was proven to decrease optical density of smoke, therefore it can be applied to prevent smoke of fire in high rise building.

Key words: stairwell, pressurized systems, smoke control systems, *optical density*, high rise buildings

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Metodologi Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
2. DASAR TEORI.....	8
2.1 Dinamika Api Dalam Ruangan.....	8
2.2 Asap Hasil Pembakaran.....	10
2.2.1 Pergerakan Suatu Asap.....	11
2.2.2 Pengukuran Asap.....	15
2.3 Gedung Bertingkat Tinggi.....	17
2.4 Sistem Pengendalian Asap.....	18
2.4.1 Prinsip Pengendalian Asap	18
2.4.2 Zona Pengendalian Asap	20
2.5 Ruang Tangga Bertekanan.....	21
2.5.1 Sistem Injeksi dan Fan Pemasok Udara	21
2.5.2 Sistem Suplai Udara	23

2.5.3 Sistem <i>Exhaust</i>	25
2.5.4 Area Presurisasi	26
2.5.5 Latar Belakang Desain Sistem Presurisasi	28
2.6 Analisa Dimensional dan Keserupaan.....	29
2.7 Fire Dynamic Simulator	29
2.7.1 Data <i>Input</i> dan <i>Output</i> Simulasi FDS	30
2.7.2 <i>Hydrodynamic Model</i>	32
2.7.3 Pertumbuhan dan Penyebaran Api	32
2.7.4 Model Pembakaran	33
3. METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Tahap Simulasi	33
3.1.1 Domain	34
3.1.2 Geometri	34
3.2 Tahap Eksperimen	36
3.2.1 Perancangan Model Tangga Presurisasi Gedung Bertingkat ...	36
3.2.2 Teknis Eksperimen	40
4. HASIL DAN ANALISIS.....	42
4.1 Hasil dan Analisa Simulasi.....	42
4.1.1 Simulasi Ruang Tangga Tanpa Tekanan	42
4.1.2 Simulasi Ruang Tangga Dengan Tekanan.....	45
4.1.3 Pengaruh Ruang Tangga Tekanan	49
4.2 Hasil dan Analisa Eksperimen.....	51
4.2.1 Analisa Data Saat Kondisi Ruang Tangga Tanpa Tekanan.....	52
4.2.2 Pengambilan Data Saat Kondisi Ruang Tangga Bertekanan....	55
5. PENUTUP	60
5.1 Kesimpulan.....	60
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	64

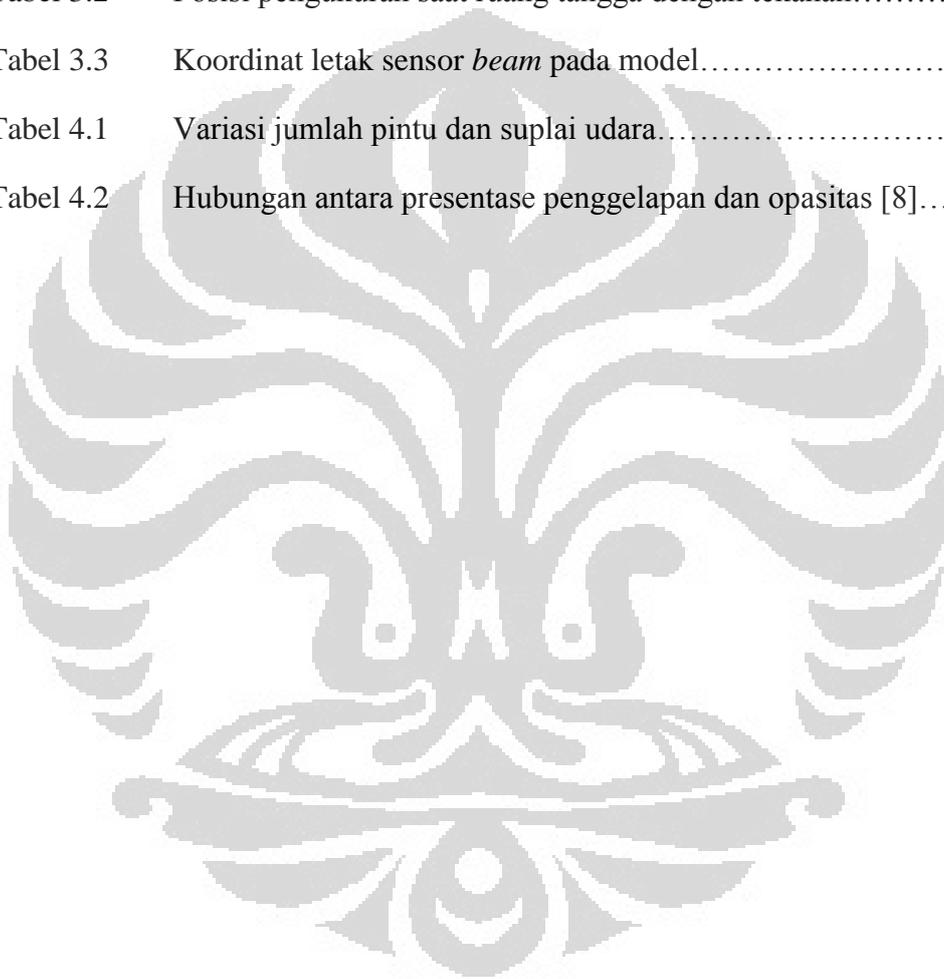
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Fase perkembangan api [6]	8
Gambar 2.2	Proses produksi dan pergerakan asap [8]	11
Gambar 2.3	<i>Buoyant plume with ceiling (a) pint source (b) realsource</i> [8]..	12
Gambar 2.4	<i>Piecewise linearly stratified and the integral model</i> [22].....	14
Gambar 2.5	<i>Beam of light</i> untuk mengukur <i>optical density</i> [8]	15
Gambar 2.6	Pencegahan asap melalui perbedaan tekanan [10]	18
Gambar 2.7	Udara kecepatan rendah gagal menghalau asap [10]	18
Gambar 2.8	Udara kecepatan tinggi berhasil menghalau asap [10]	19
Gambar 2.9	Presurisasi ruang tangga dengan fan propeler [3].....	22
Gambar 2.10	Presurisasi ruang tangga injeksi tunggal fan sentrifugal [3].....	22
Gambar 2.11	Presurisasi ruang tangga dengan sistem jamak [3].....	23
Gambar 2.12	Sistem <i>exhaust</i> melalui saluran vertikal [15].....	26
Gambar 2.13	Ruang tangga dengan lobi sederhana [15].....	27
Gambar 2.14	Ruang tangga dengan lobi <i>lift</i> [15]	27
Gambar 2.15	Ruang tangga dengan lobi <i>lift</i> dan koridor [15].....	27
Gambar 2.16	Cara kerja FDS dalam menampilkan permodelan [12].....	31
Gambar 3.1	<i>Lay out mesh</i> yang digunakan pada simulasi.....	34
Gambar 3.2	<i>Lay out</i> simulasi tanpa pengaktifan ruang tangga tekanan.....	35
Gambar 3.3	<i>Lay out</i> simulasi dengan pengaktifan ruang tangga tekanan....	35
Gambar 3.4	Desain Maket [17].....	36
Gambar 3.5	Akrilik Lembaran [18].....	37
Gambar 3.6	Ruang tangga dengan sistem presurisasi [17].....	38
Gambar 3.7	Fan sentrifugal dengan injeksi dari atap [17].....	39
Gambar 3.8	<i>Development of SmokeVenting by Stairwell and Passage Pressurization System for Demonstration Apparatu</i>	39

Gambar 3.9	Model gedung bertingkat tinggi.....	40
Gambar 3.10	Peletakan sensor <i>beam</i> 1, 2, dan 3.....	41
Gambar 4.1	Perbandingan waktu dengan <i>optical density</i> tanpa tekanan, pintu terbuka 1.....	43
Gambar 4.2	Perbandingan waktu dengan <i>optical density</i> tanpa tekanan, pintu terbuka 2.....	43
Gambar 4.3	Perbandingan waktu dengan <i>optical density</i> tanpa tekanan, pintu terbuka 3.....	44
Gambar 4.4	Perbandingan <i>optical density</i> ruang tangga pintu terbuka 1-3...	44
Gambar 4.5	Perbandingan waktu dengan <i>optical density</i> saat kapasitas udara 6.6 m ³ /s dan pintu terbuka 1.....	47
Gambar 4.6	Perbandingan waktu dengan <i>optical density</i> saat kapasitas udara 8.9 m ³ /s dan pintu terbuka 2.....	48
Gambar 4.7	Perbandingan waktu dengan <i>optical density</i> saat kapasitas udara 11.5 m ³ /s dan pintu terbuka 3.....	48
Gambar 4.8	Pengaruh ruang tangga tekanan, kapasitas 6.6 m ³ /s.....	50
Gambar 4.9	Pengaruh ruang tangga tekanan, kapasitas 8.9 m ³ /s.....	50
Gambar 4.10	Pengaruh ruang tangga tekanan, kapasitas 11.5 m ³ /s.....	51
Gambar 4.11	Hasil FDS pengaruh ruang tangga bertekanan.....	51
Gambar 4.12	Perubahan opasitas asap pada ruang tangga tanpa tekanan.....	52
Gambar 4.13	Data opasitas pada ruang tangga tanpa tekanan, HRR 3.4 kW..	54
Gambar 4.14	Perubahan opasitas asap pada ruang tangga dengan tekanan, HRR 3.4 kW.....	56
Gambar 4.15	Data opasitas pada ruang tangga tekanan, HRR 3.4 kW.....	57
Gambar 4.16	Perubahan opasitas asap pada ruang tangga dengan tekanan, HRR 6.8 kW.....	58
Gambar 4.17	Data opasitas pada ruang tangga tekanan, HRR 6.8 kW.....	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan variasi <i>codes of practice</i> beberapa negara [15].....	23
Tabel 2.2	Desain presurisasi berdasarkan tekanan [15]	27
Tabel 2.3	Tipe Kebocoran pada area pintu [15].....	28
Tabel 3.1	Posisi pengukuran saat ruang tangga tanpa tekanan.....	35
Tabel 3.2	Posisi pengukuran saat ruang tangga dengan tekanan.....	36
Tabel 3.3	Koordinat letak sensor <i>beam</i> pada model.....	41
Tabel 4.1	Variasi jumlah pintu dan suplai udara.....	53
Tabel 4.2	Hubungan antara presentase penggelapan dan opasitas [8].....	53



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Pengkodean pada FDS Fan 8.9 m ³ /s, 2 pintu terbuka.....	64
------------	---	----



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan dan kemajuan teknologi, peningkatan jumlah gedung bertingkat tinggi semakin meningkat dan meluas tidak hanya di negara-negara maju tetapi juga di negara berkembang seperti Indonesia. Pembangunan gedung bertingkat tinggi itu bukan hanya untuk memenuhi kebutuhan tempat tinggal saja, tetapi juga sebagai salah satu bentuk eksistensi kemajuan teknologi dan kedigdayaan suatu negara. Tidak heran jika akhirnya banyak negara berlomba-lomba membangun gedung bertingkat tinggi sebagai *icon* negara tersebut. Pembangunan gedung tinggi atau yang biasa disebut juga *high rised building* sudah sepatutnya mempertimbangkan berbagai aspek, salah satunya adalah teknologi keselamatan kebakaran.

Bidang keselamatan kebakaran atau *fire safety* sangat penting untuk diterapkan. Kebakaran yang diakibatkan tidak adanya atau lemahnya penerapan *fire safety* memiliki dampak yang sangat besar, yaitu kerugian langsung mencapai 0,2 % dari produk domestik bruto (PDB) [1]. Namun, dampak yang paling besar adalah korban jiwa diakibatkan oleh asap yang merupakan penyebab kematian terbanyak saat terjadi kebakaran. Berdasarkan data statistic National Bureu of Standards USA (1983) bahwa 74 % penyebab utama kematian penghuni bangunan pada peristiwa kebakaran diakibatkan oleh asap, sedangkan akibat luka bakar sebesar 10%, tersengat panas tinggi sebesar 8% dan jatuh, serangan jantung dan lain-lain sebesar 8% [2].

Perencanaan dan manajemen keselamatan kebakaran menjadi hal utama untuk sebuah bangunan bertingkat karena bangunan jenis ini sangat rentan terhadap dinamika asap saat terjadinya kebakaran. Sebuah kebakaran akan memproduksi asap yang dapat menyebar keseluruhan bagian gedung dan berpotensi mengancam jiwa dan merusak harta benda. Maka, sebuah bangunan bertingkat tinggi harus memiliki dan memaksimalkan sistem pengendalian asap secara terencana. Sistem pengendalian asap yang bekerja efektif dapat membatasi

penyebaran asap, sehingga dapat mencegah asap menjalar ke berbagai ruangan di dalam gedung.

Lebih jauh, Sistem pengendalian asap pada gedung bertujuan untuk mengamankan penghuni di dalam gedung yang terbakar sehingga dapat dievakuasi ke *assembly point* melalui tangga darurat secara aman. Namun, aliran asap pada saat kebakaran cenderung bergerak menjalar menuju ruangan yang berada di sekitar tempat kebakaran melalui berbagai macam bukaan, seperti retakan konstruksi, tembusan pipa, *ducting*, dan pintu yang terbuka. Faktor penyebab asap menyebar ke daerah luar kompartemen adalah efek cerobong, efek temperatur kebakaran, kondisi cuaca terutama angin, dan sistem pengolahan udara mekanik [3].

Gedung bertingkat tinggi sudah sepatutnya memiliki tangga kebakaran dengan sistem presurisasi karena memiliki andil sangat penting untuk evakuasi pada saat terjadi kebakaran. Tangga kebakaran adalah tangga yang direncanakan khusus untuk penyelamatan bila terjadi kebakaran dan di setiap bangunan gedung di mana tinggi yang dihuni melebihi 24 m, setiap tangga kebakaran internal harus dipresurisasi sesuai persyaratan Departemen Pekerjaan Umum [4]. Secara prinsip tangga kebakaran dengan presurisasi adalah menciptakan perbedaan tekanan udara dari ruang tangga dengan ruangan lain yang ada di dalam gedung, metode ini dirancang agar pergerakan asap dapat dikendalikan. Dalam proses evakuasi pintu tangga kebakaran akan terbuka, maka harus tersedia pasokan udara dengan kecepatan yang cukup untuk mencegah asap memasuki ruang tangga.

Oleh karena itu, penelitian tentang pengaruh tekanan ruang tangga kebakaran terhadap opasitas asap di gedung bertingkat tinggi dilakukan agar dapat melihat Pengaruh ruang tangga dengan presurisasi terhadap jarak pandang pada saat terjadi kebakaran. Penelitian ini mengkombinasikan simulasi berbasis pada *Field Model* menggunakan *Fire Dynamic Simulator* (FDS. Ver. 5.0) [5] dan eksperimen dengan menggunakan *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus* yang dimiliki oleh Laboratorium *Fire Safety* Teknik Mesin Universitas Indonesia, yaitu model gedung bertingkat tinggi yang sudah disesuaikan uukurannya menggunakan *analysis dimensional*. Perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi

akan menghasilkan suatu tren grafik yang dapat menunjukkan pengaruh tekanan tangga kebakaran terhadap opasitas di gedung bertingkat tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini akan membahas pengaruh sistem tangga kebakaran dengan presurisasi terhadap pergerakan dan densitas asap pada sebuah gedung bertingkat tinggi yang sedang mengalami kebakaran di salah satu lantai. Penggunaan tekanan pada ruang tangga kebakaran ini dimaksudkan untuk mengendalikan pergerakan asap sehingga asap tidak dapat memasuki ruang tangga kebakaran. Perbandingan nilai *optical density* asap dan pergerakan di dalam gedung bertingkat tinggi akan dilihat berdasarkan kondisi dengan dan tanpa pemberian tekanan di ruang tangga kebakaran. Simulasi menggunakan *Fire Dynamic Simulator* (FDS. Ver. 5.0) akan dibandingkan menggunakan eksperimen menggunakan *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurization System for Demonstration Apparatus*. Validitas hasil simulasi akan dilakukan dengan membandingkan hasil yang di dapat dengan data hasil eksperimen. Perbandingan antara eksperimen dan simulasi akan menunjukkan pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran dan pengaruhnya terhadap pergerakan dan *optical density* asap di gedung bertingkat tinggi.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan, yaitu:

1. Mempelajari sistem kerja *pressurized stairwell system* pada gedung bertingkat tinggi.
2. Mengetahui besarnya *optical density* asap dan pergerakannya saat terjadi kebakaran di dalam sebuah gedung bertingkat tinggi.
3. Menganalisis pengaruh penggunaan tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap *optical density* asap pada saat terjadi persebaran asap di dalam ruangan gedung bertingkat tinggi.
4. Membandingkan data hasil eksperimen dan permodelan, sehingga dapat menunjukkan pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap opasitas asap dan pergerakannya pada gedung bertingkat tinggi.

5. Penelitian ini bertujuan menjadi awal untuk mengetahui lebih jauh penggunaan dan penerapan *pressurized stairwell system* pada gedung bertingkat tinggi sebagai sistem pengendalian asap yang menjadi salah satu cabang penelitian yang dilakukan di Laboratorium *Fire Safety* Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

1.4 Batasan Penelitian

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Melakukan suatu penelitian pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap pergerakan dan opasitas asap pada sebuah gedung bertingkat tinggi.
2. Bangunan bertingkat tinggi dalam simulasi maupun model eksperimen memiliki 10 lantai dengan ketinggian 40 m dan sumber api penghasil asap akan diletakkan pada lantai 3 untuk melihat pengaruh terhadap lantai yang berada di atas dan bawahnya.
3. Pengujian yang dilakukan pada eksperimen maupun simulasi terdiri dari tiga kali percobaan, yaitu perbandingan pengaruh tangga dengan dan tanpa penggunaan tekanan pada saat *heat release rate* pada lantai yang terbakar sama besar. Satu percobaan lainnya adalah penggunaan *heat release rate* dengan besaran dua kali lipat pada saat ruang tangga kebakaran menggunakan presurisasi.
4. Simulasi dengan komputasi menggunakan *Fire Dynamic Simulator Version* (FDS Ver. 5.0). Ukuran aktual yang digunakan terbagi menjadi dua bagian yang saling terhubung yaitu ruang huni dengan ukuran 13.0 m x 10.0 m x 40.0 m dan ruang tangga kebakaran beserta area dengan *smoke barrier* yang memiliki ukuran 7.0 m x 7.5 m x 40.0 m.
5. Model yang digunakan dalam eksperimen, *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus*, menggunakan skala 1:20 dengan ukuran gedung bertingkat tinggi aktual pada simulasi.

6. Dalam penelitian metode permodelan ini, bahan bakar yang digunakan merupakan material berjenis *cellulose* yaitu kertas dengan berat 1 gram dan 2 gram.
7. Pengukuran opasitas asap dilakukan dengan pemberian 3 *smoke detector* berupa laser *beam* yang diletakan di ketinggian dua meter pada *center* dari tiga area yaitu ruang huni, area dengan *smoke barrier*, dan ruang tangga bertekanan.
8. Penggunaan kapasitas udara pada simulasi sebesar $6.31 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan pada model eksperimen sebesar $0.29 \text{ m}^3/\text{s}$.
9. Buka an pintu yang dibuka pada ruang tangga kebakaran berjumlah maksimum dari yang diizinkan, yaitu sejumlah tiga buah yang berada pada lantai sumber nyala api pada lantai 3, lantai tanpa sumber api pada lantai 4, dan lantai dengan pintu *final exit* pada lantai 1.

1.5 Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metodologi sebagai berikut:

1. Melakukan studi literatur dengan mempelajari materi yang berkaitan dengan tema yang dibahas dalam skripsi ini. Materi pembelajaran berasal dari jurnal, buku, dan skripsi dengan tema yang terkait. Selain itu, literatur juga berasal dari standar-standar baik nasional maupun international yang terkait dengan sistem presurisasi pada ruang tangga kebakaran pada gedung bertingkat tinggi.
2. Melakukan pengujian atau pengambilan data sesuai dengan prosedur percobaan menggunakan *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus* yang memiliki perbandingan 1:20 dengan desain aktual. Sedangkan pengambilan data melalui simulasi dengan menggunakan *Fire Dynamic Simulator Version 5* dilakukan dengan kondisi desain ukuran aktual sebuah gedung bertingkat tinggi.

3. Melakukan pengolahan data dan penganalisisan grafik hasil pengolahan data baik hasil eksperimen maupun hasil simulasi. Analisis yang dilakukan mengacu kepada literature yang ada.
4. Hasil analisis grafik pengolahan data baik dari hasil eksperimen maupun hasil simulasi akan dibuat kesimpulan mengenai pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap pergerakan dan opasitas asap saat terjadi kebakaran pada gedung bertingkat tinggi.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling terkait. Adapun urutan dalam penulisan laporan ini terlihat pada uraian berikut ini:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Pokok bahasan, ruang lingkup, dan tujuan yang dilakukan penelitian ini dijelaskan secara garis besar melalui perumusan masalah, pembatasan masalah, dan tujuan penulisan. Sedangkan metodologi dan sistematika penulisan penelitian memberikan gambaran tentang proses yang terjadi dalam penelitian ini secara singkat.

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan landasan teori dalam penelitian. Dasar teori yang terdapat dalam penelitian ini terkait dengan kebakaran kompartemen, asap sebagai hasil pembakaran, fenomena kebakaran, sistem pengendalian asap pada bangunan bertingkat tinggi, gedung bertingkat tinggi, ruang tangga kebakaran dengan presurisasi, *Fire Dynamic Simulator Version 5*, analisis dimensional dan keserupaan. Dasar teori atau tinjauan pustaka ini diambil dari beberapa buku, jurnal, standar, dan beberapa situs internet.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dibahas mengenai tahap simulasi dan eksperimen. Tahap simulasi merupakan suatu tahapan mengenai domain, geometri, variasi skema simulasi dalam pengambilan data. Sedangkan tahap persiapan merupakan tahapan tentang persiapan instalasi peralatan pada model *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus*. Tahap eksperimen berisikan variasi data yang dilakukan dalam penelitian dan prosedur pengambilan data.

BAB 4 ANALISA DAN EVALUASI

Bab ini memuat data-data hasil pengujian yang diolah menjadi data berupa grafik hasil dari penelitian. Selanjutnya data ini akan dianalisis berdasarkan literatur yang ada. Analisis tersebut mengenai pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap penyebaran dan opasitas asap pada gedung bertingkat tinggi. Pengukuran opasitas berada pada 3 titik pada setiap bagian center pada bagian ruang huni, area dengan *smoke barrier*, dan ruang tangga kebakaran. Hasil yang diambil melalui simulasi FDS 5 akan dibandingkan dengan eksperimen dengan kondisi yang hampir sama dengan ukuran aktual.

BAB 5 PENUTUP

Pada bagian ini akan dilakukan pengambilan kesimpulan dari keseluruhan hasil analisa eksperimen dan simulasi. Kemudian, dilakukan pemberian saran untuk pengembangan penelitian lebih selanjutnya.

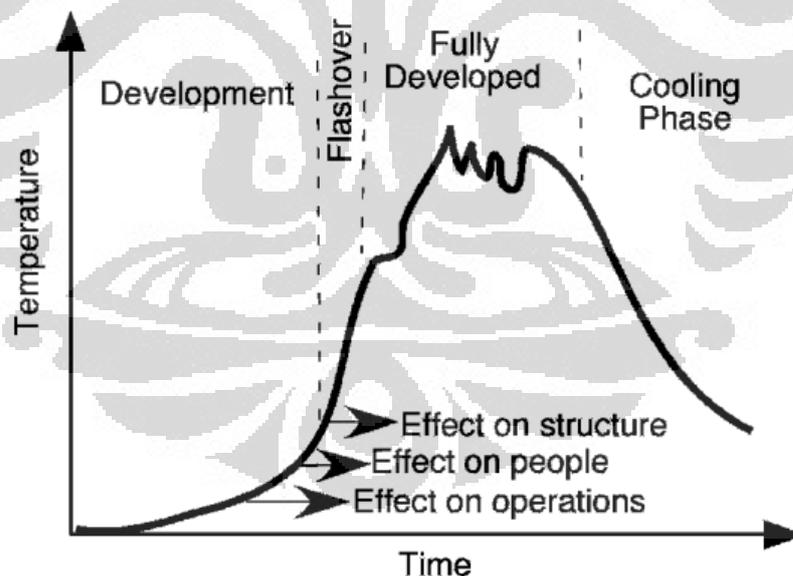
BAB 2

DASAR TEORI

Bagian ini akan menjelaskan mengenai teori dan konsep yang dipakai dalam penelitian ini. Penjelasan mengenai teori dan konsep ini bertujuan untuk memberikan kemudahan dalam memahami isi karya tulis dan maksud dari penelitian ini sehingga penelitian ini akan bermanfaat kedepannya bagi peneliti sesudahnya.

2.1 Dinamika Api Dalam Ruangan

Kebakaran ruangan atau kompartemen adalah peristiwa dimana terdapat nyala api yang terkurung di dalam sebuah ruangan. Faktor yang membatasi penyebaran dan pertumbuhan dalam ruangan adalah laju pembakaran dan durasi pembakaran. Kebakaran kompartemen dapat dibagi menjadi beberapa fase, yaitu *ignition*, *growth*, *flashover*, *fully developed fire*, dan *decay*.



Gambar 2.1. Fase perkembangan api [6]

Fase *ignition* adalah fase dimana api baru menyala dalam sebuah kebakaran. Setelah itu, jika tidak ada sebuah tindakan pemadaman terhadap api

baik akibat tindakan manusia ataupun dikarenakan pengaruh *properties* api, maka api akan berkembang lebih besar dan memasuki fase *growth*. Api adalah sebuah fungsi yang sangat dipengaruhi oleh ketersediaan bahan bakar. Api juga dapat digambarkan sebagai laju energi dari pembakaran produk bahan bakar. Oleh karena itu, jika ketersediaan bahan bakar dan udara yang cukup pada suatu ruangan, maka api dapat bertambah menjadi lebih besar yang berdampak kepada peningkatan temperatur ruangan.

Fase selanjutnya adalah fase *flashover* yang merupakan sebuah fase transisi dari fase *growth* sampai dengan fase *fully developed*. Pada fase *flashover* ini terjadi perubahan suhu atau temperatur secara signifikan seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Fase *flashover* mempunyai beberapa mekanisme yang dapat dijelaskan sebagai berikut [6]:

1. *Remote Ignition*, yaitu penyalan api secara tiba-tiba oleh *autoignition* atau *piloted ignition* yang merupakan hasil dari panas. Kriteria *heat release* secara umum pada *flashover* tipe ini berada pada 20 kW/m^2 . Suhu yang terukur pada mekanisme ini adalah berkisar pada $500^\circ - 600^\circ \text{C}$.
2. *Rapid Flame Spread*, yaitu pelebaran lidah api secara cepat. Mekanisme ini dapat terjadi karena pengaruh dari terbakarnya suatu material. Mekanisme ini memiliki perbedaan karena ditimbulkan oleh bercampurnya uap bahan bakar dan udara yang terbakar secara bersamaan. Proses terjadinya berlangsung cepat dalam waktu yang singkat. Sehingga, mekanisme *flashover* tipe ini memiliki kecepatan *rapid flame spread* yang berkisar pada 1 m/s .
3. *Burning Instability*, yaitu ketika sebuah letupan api secara tiba-tiba terjadi, bahkan tanpa menyebar jauh dari sumber pembakaran. Dalam mekanisme ini terjadi *thermal feed back*, yaitu proses perpindahan panas antara objek yang terbakar dan ruangan yang dipanaskan. Sehingga, terjadi peningkatan suhu ruangan secara cepat dan pembakaran pada suatu bahan bakar pada titik *equilibrium*.
4. *Oxygen supply*, yaitu penambahan oksigen secara tiba-tiba dari luar ruangan yang terjadi karena terdapat kerusakan pada pintu atau jendela. Proses ini terjadi secara tiba-tiba sehingga terjadi peningkatan pembakaran secara

mendadak. Peningkatan tekanan secara signifikan dapat mengakibatkan kerusakan pada dinding, pintu, atau jendela lain yang berada di sekitar ruangan tersebut.

5. *Boilover*. Fenomena ini terjadi karena air disemprotkan suatu ruangan dengan bahan bakar yang sedang terbakar yang memiliki titik didih lebih tinggi dari pada air. Butiran-butiran air yang ada pada bahan bakar cair permukaan bahan bakar menguap bersama uap bahan bakar sehingga terjadi peningkatan jumlah masa yang terbakar yang dapat menimbulkan peledakan.

Fase selanjutnya adalah *fully developed fire*, yaitu terjadi pelepasan api yang paling besar diantara fasa yang lain dalam sebuah ruangan. Dalam fase ini banyak tersedia bahan bakar yang sudah tersedia di dalam ruangan tersebut. Jika terdapat cukup ventilasi pada ruangan tersebut maka bahan bakar yang belum terbakar akan keluar bersama gas hasil pembakaran yang dapat menghasilkan nyala api, sehingga bagian luar ruangan tersebut dapat ikut terbakar. Saat fase ini berlangsung, lingkungan di dalam ruangan sangat mempengaruhi laju pirolisis material yang ada di dalam ruangan.

Setelah fase *fully developed* terjadi, maka bahan bakar yang ada semakin berkurang. Kemudian, fase *decay* terjadi dimana akan terjadi penurunan laju pelepasan panas. Dalam kondisi ini, nyala api akan berganti dari *ventilation controlled* menjadi *fuel controlled* yang kemudian api akan mati apabila bahan bakar yang ada telah habis terbakar.

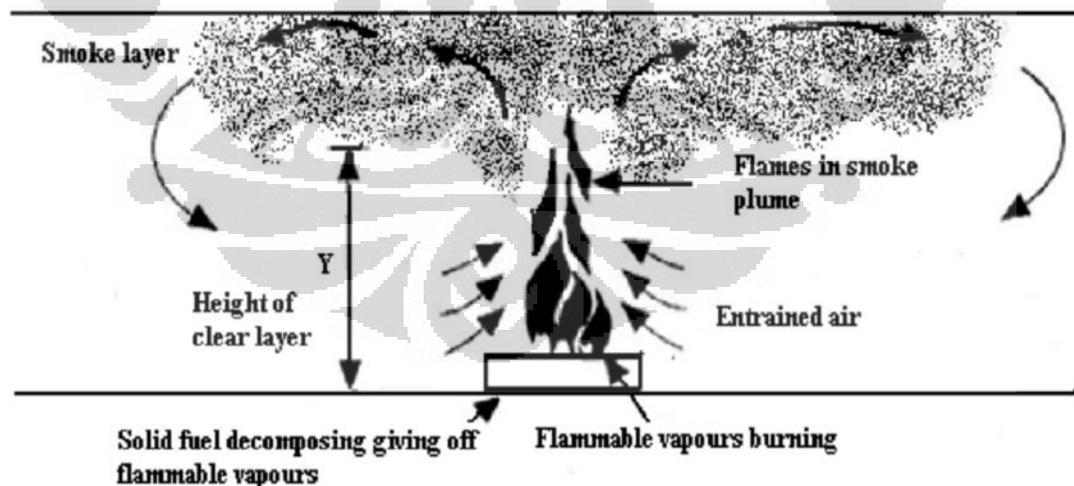
2.2 Asap Hasil Pembakaran

Asap adalah produk hasil pembakaran dari suatu material yang berbahaya bagi manusia karena asap memiliki kandungan partikel-partikel uap, gas, dan unsur-unsur terurai yang dilepaskan oleh suatu pembakaran material. Ada beberapa aspek yang dapat menentukan banyaknya suatu asap ataupun karakter asap, yaitu sebuah kondisi pembakaran dimana asap diproduksi dengan cara *flaming*, *pyrolisi*, dan *smoldering*. Kondisi *flaming combustion* adalah dimana saat produksi asap memiliki kecenderungan mengandung sejumlah besar elemen

karbon. Berbeda dengan *pyrolysis*, yaitu terjadi pada permukaan bahan bakar yang diakibatkan oleh peningkatan temperatur material akibat dari pemanasan secara *heat flux*. Saat uap mengembang dari permukaan bahan bakar yang didalamnya terdapat *fuel monomer*, rantai *polymer*, dan produk oksidasi. Kemudian, tekanan uap rendah menyebabkan unsure-unsur pokok tersebut dapat terkondensasi, sehingga terbentuk *droplet* asap yang muncul seperti sinar yang diwarnai asap. Sedangkan, *smoldering combustion* adalah pembentukan *droplet* asap di mana proses *pyrolysis* membutuhkan suatu sumber panas dari luar. Hanya ada beberapa material yang memiliki karakteristik sebagai penghasil *smoldering combustion*, yaitu *cellulosic material* (*wood, paper, cardboard, etc*) dan *flexible polyurethane foam* [7].

2.2.1 Pergerakan Suatu Asap

Saat terdapat nyala api di dalam sebuah ruangan akan dihasilkan kolom gas asap panas yang berada di atas api tersebut yang memiliki densitas lebih rendah dibandingkan dengan lingkungan sekitarnya. Hal tersebut menyebabkan asap bergerak ke atas, kemudian membentuk cendawan sampai ke bagian atas dilanjutkan dengan penyebaran secara horizontal ke berbagai arah.

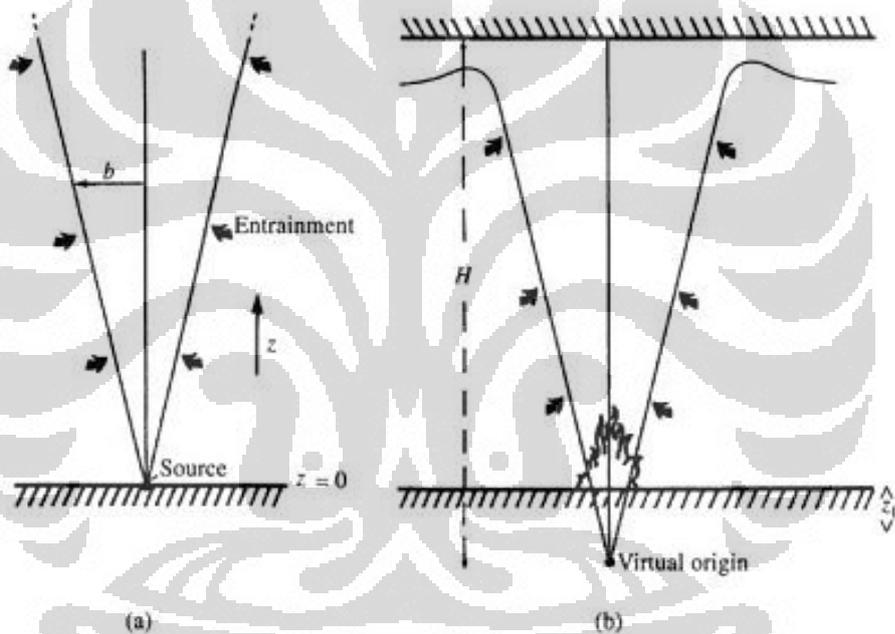


Gambar 2.2 Proses produksi dan pergerakan asap [8]

Pada suatu ruangan yang terdapat nyala api di dalamnya mendapatkan suplai oksigen dari udara yang berada di sekitar ruangan tersebut yang digunakan untuk proses pembakaran selanjutnya. Apabila sumber oksigen yang terdapat di udara

semakin menipis, maka produksi asap akan semakin banyak. Seperti halnya panas, asap pun dapat menyebar ke lingkungan sekitarnya. Karena penyebaran asap tersebut, proses evakuasi saat terjadi kebakaran menjadi sulit dan terhambat karena jarak pandang menjadi berkurang.

Asap merupakan suatu gas panas mengapung yang sudah terkontaminasi karena berasal dari produk pembakaran material. Pada dasarnya asap mengikuti hukum mekanika fluida. Produksi asap dikarenakan sumber api berbeda dalam setiap satuan waktu. Produksi asap ini sangat dipengaruhi oleh ukuran dan panas nyala api yang dihasilkan oleh sebuah reaksi pembakaran.



Gambar 2.3 Buoyant plume with ceiling (a) point source (b) real source [8]

Gaya *buoyancy* adalah gaya apung yang dapat mempengaruhi penyebaran asap dalam sebuah ruangan. Gaya ini terjadi pada asap karena terkait langsung terhadap konveksi alamiah. Pada suatu sistem, jika terdapat dua buah fluida yang memiliki massa jenis yang berbeda satu sama lain akan dipengaruhi oleh gaya apung, dimana fluida yang memiliki massa jenis lebih kecil akan mengapung di lingkungan sekitar yang memiliki massa jenis yang lebih besar. Buoyancy yang berasal dari nyala api di mana temperature dari *plume* atau bulu api yang berinteraksi dengan lingkungannya bergantung kepada besarnya laju pelepasan

panas yang terjadi pada sumber api. Pada Gambar 2.3 (b) terlihat bahwa *buoyant plume* yang berasal dari suatu sumber api berinteraksi dengan *ceiling* atau langit-langit suatu ruangan. Struktur dari *buoyancy plume* sangat dipengaruhi oleh gaya *drag*, terutama viskositas yang diakibatkan oleh interaksi *plume* terhadap fluida dari lingkungan sekitar *plume*. Besaran relatif antara dua gaya yang merupakan rasio gaya *buoyancy* dengan *drag* viskositas dinyatakan dalam bilangan Grashof [8], yaitu:

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_0 - \rho)}{\rho v^2} = \frac{gl^3\beta\Delta T}{v^2} \quad (2.1)$$

di mana Gr merupakan bilangan Grashof dan $g(\rho_0 - \rho)$ merupakan gaya apung per satuan volume.

Pemodelan matematika dari suatu *buoyant plume* sederhana dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3 (a) di mana bentuk dari *buoyant plume* adalah pada kondisi ideal. Keadaan ini disebabkan oleh atmosfer tak hingga, sehingga terjadi pelemahan gaya apung akibat dari *drag* viskositas mengembang dan berbentuk simetris. Bentuk dari *plume* dapat diturunkan secara teoritis dengan menggunakan persamaan konservasi energi, massa, dan momentum yang memiliki korelasi terhadap fungsional antara temperatur dan kecepatan aliran asap ke atas serta besarnya sumber panas dan ketinggian *ceiling*. Konservasi momentum pada saat kondisi *buoyant plume* ideal dan atmosfer tak hingga pada radius b dengan ketinggian z dari sumber api pada temperatur lingkungan rendah serta gaya viskositas diabaikan, maka dapat dibuat persamaan berikut [8]:

$$\frac{d}{dz}(\rho_o u_o^2 b^2) \approx g(\rho_o - \rho_\infty) b^2 \quad (2.2)$$

Dimana ρ_o merupakan masa jenis kepulan asap (kg/m^3) dengan u_o adalah kecepatan aliran kepulan asap (m/s) dan b adalah diameter asap (m). Sedangkan untuk persamaan konservasi masa dapat ditulis dengan persamaan:

$$\frac{d}{dz}(\rho_o u_o b^2) \approx \rho_\infty v b \approx \rho_\infty u_o b \quad (2.3)$$

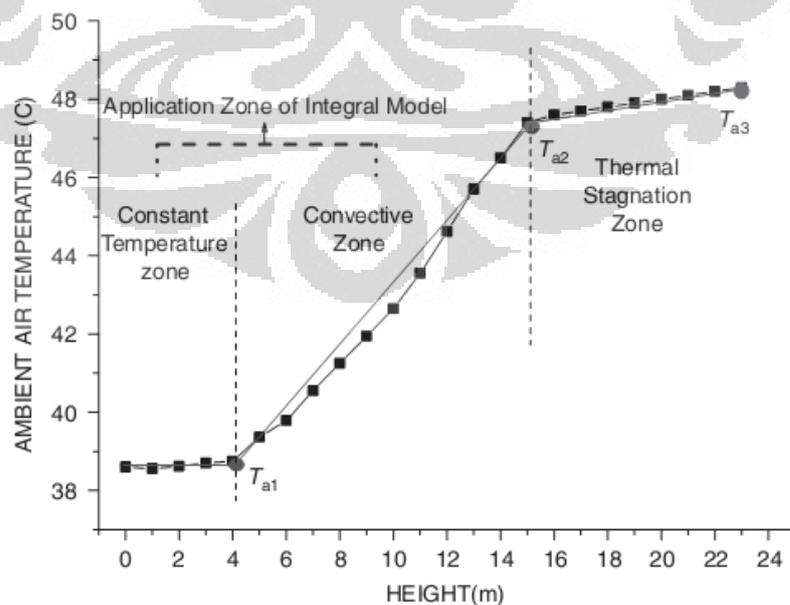
Sedangkan v dalam persamaan 2.3 adalah kecepatan angin yang masuk ke dalam kepulan asap (m) diakibatkan oleh aliran masa pada ketinggian z . Untuk konservasi energi dilakukan pendekatan menggunakan persamaan:

$$c_p \rho_o u_o b^2 \Delta T \approx \dot{Q}_{conv} \quad (2.4)$$

Dimana c_p adalah koefisien panas spesifik asap (kJ/kg.°K). dan \dot{Q}_{conv} adalah panas yang dihasilkan secara konveksi (kJ).

Asap adalah fluida yang bergerak dan dapat berubah bentuk ketika diberikan tegangan geser. Tegangan geser atau gaya yang berpengaruh terhadap pergerakan asap merupakan gaya yang dihasilkan oleh *gradient* tekanan di sekitar asap. Perbedaan temperatur antara asap dan lingkungannya merupakan penyebab adanya *gradient* tekanan tersebut. Pergerakan asap pada suatu ruangan dipengaruhi oleh beberapa hal, sebagai berikut [8]:

1. Gaya apung atau *buoyancy* yang dihasilkan oleh api.
2. Banyaknya ventilasi pada ruangan sehingga berpengaruh pada volume udara yang dapat bergerak masuk dan keluar ruangan.
3. Gaya apung atau *buoyancy* yang diakibatkan oleh perbedaan temperatur *ambient* internal ruangan dengan eksternal ruangan.
4. Sistem tata udara dalam ruangan tersebut.



Gambar 2.4 Piecewise linearly stratified and the integral model [22]

Pada Gambar 2.4 di atas dapat dipahami bahwa jika gumpalan asap berhenti di area *convective zone* akibat dari *buoyant flux* dari area ini, maka dapat dianggap sebagai zona konstan. Ketinggian maksimum dapat diraih dengan menggunakan model integral yang diawali dengan *buoyant flux* dari zona temperatur konstan dan *convective zone* bertingkat. Jika gumpalan asap terus naik hingga mencapai di zona *thermal stagnation*, *buoyant flux* dari zona ini tidak dapat dengan mudah didapat dan akhirnya tidak mampu untuk mencapai ketinggian maksimum.

2.2.2 Pengukuran Asap

Dalam pengukuran partikulat asap dari suatu material terbakar dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu sebagai berikut [8]:

1. Menyaring asap dan menentukan berat dari material, metode ini hanya cocok untuk pengujian skala kecil.
2. Mengumpulkan asap pada volume yang sudah diketahui dan menentukan *optical density* dari asap tersebut, metode ini dapat dilakukan untuk skala kecil hingga menengah.
3. Mengalirkan asap pada sebuah pipa, kemudian dilakukan pengukuran *optical density* dimana penyumbatan aliran sudah ditetapkan dan menyatu dalam satu perangkat tersebut untuk mengukur total partikulat asap.

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* dapat ditunjukkan melalui Gambar 2.4 di bawah ini:



Gambar 2.5 *Beam of light* untuk mengukur *optical density* [8]

Sensor *beam of light* mulai bekerja dengan menembakan intensitas cahaya melalui *light source* kemudian diterima oleh *receiver (photo cell)* yang terbaca sebagai I_o . 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_o dan I_x ini dapat dijelaskan melalui Bouger's Law, sebagai berikut ini [7]:

$$I_x = I_o \exp(-KL) \quad (2.5)$$

Di mana K adalah nilai koefisien absorpsi dengan satuan m^{-1} dan L adalah jarak sumber cahaya dan *photo cell*. Untuk nilai *optical density* memiliki satuan (1/m) yang dapat menggunakan persamaan [7]:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{I_o}{I_x} \right) = KL \quad (2.6)$$

Besarnya nilai transmisi cahaya yang diperoleh dari perbandingan intensitas asap yang terukur dan intensitas awal dapat menggunakan persamaan:

$$T = \frac{I_x}{I_o} = 1 - \frac{N}{100} \quad (2.7)$$

Di mana T adalah besar nilai transmisi cahaya yang diterima oleh *photo cell* dalam satuan persentase (%) dan N adalah persentase opasitas yang terukur pada *photo cell* (%). Sehingga, dari hubungan persamaan (2.6) dan (2.7) didapatkan persamaan baru, yaitu:

$$T = \exp(-OD) \quad (2.8)$$

Dengan demikian, nilai *optical density* berhubungan secara linier dengan nilai transmisi melalui persamaan:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.9)$$

Dengan mendapatkan nilai koefisien absorpsi dari persamaan (2.6) dan (2.7), konsentrasi masa asap terukur dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan [7]:

$$m = \frac{K}{K_m} \quad (2.10)$$

Di mana K_m merupakan *specific extinction coefecient* dengan satuan m^2g^{-1} . Dengan demikian, masa asap dalam satuan gram dapat ditentukan melalui hubungan konsentrasi masa asap melalui persamaan:

$$M_s = V_r \times m \quad (2.11)$$

V_r adalah volume ruangan di mana asap ditampung pada suatu ruang dengan satuan m^3 . Dengan mendapatkan nilai masa asap, maka dapat ditentukan nilai *soot yield* (g/g) dengan persamaan [7]:

$$Y_s = M_s / M_b \quad (2.12)$$

Dimana M_b adalah masa bahan bakar yang terbakar dengan satuan gram.

2.3 Gedung Bertingkat Tinggi

Pada penggolongan gedung bertingkat tinggi tidak ada data yang universal yang memastikan seberapa tinggi sebuah gedung. Hal tersebut tergantung dari data atau standar yang digunakan sebagai referensi untuk menentukan gedung bertingkat masuk ke dalam golongan *low*, *middle*, atau *high rise building*.

Menurut pasal 5 ayat 7 Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 36 tahun 2005, penetapan klasifikasi ketinggian didasarkan pada jumlah lantai pada suatu gedung, yaitu ditetapkan oleh pemerintah daerah kabupaten/ kota. Penetapan ketinggian bangunan dibedakan dalam tingkatan ketinggian, yaitu [19]:

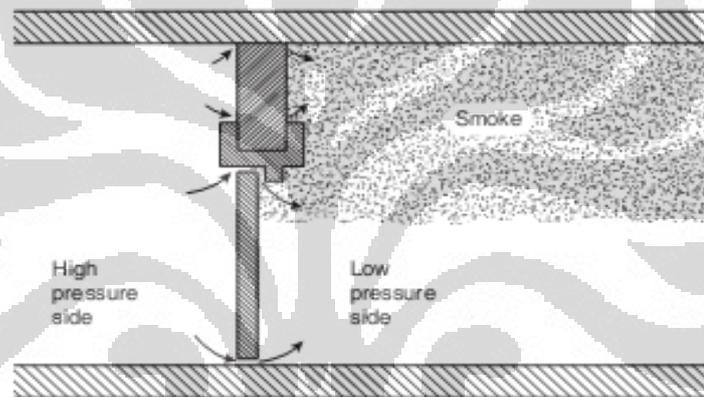
1. Bangunan Rendah (jumlah lantai bangunan gedung sampai dengan 4 lantai)
2. Bangunan Sedang (jumlah lantai bangunan gedung 5 lantai sampai dengan 8 lantai)
3. Bangunan Tinggi (jumlah lantai bangunan lebih dari 8 lantai)

Sedangkan menurut NFPA 101 *Life Safety Code*, dinyatakan bahwa gedung bertingkat tinggi atau *high-rise building* adalah sebuah gedung yang memiliki ketinggian lebih dari 23 m [20]. Berbeda lagi berdasarkan standar di negara-negara lain salah satunya adalah Jepang. Menurut standar Jepang, bangunan tinggi memiliki ketinggian lebih dari 31 m masuk ke dalam kategori bangunan tingi atau *high rise bulding*, sedangkan bangunan yang sudah melebihi 60 m dimasukkan ke dalam golongan *super high rise building* [21].

2.4 Sistem Pengendalian Asap

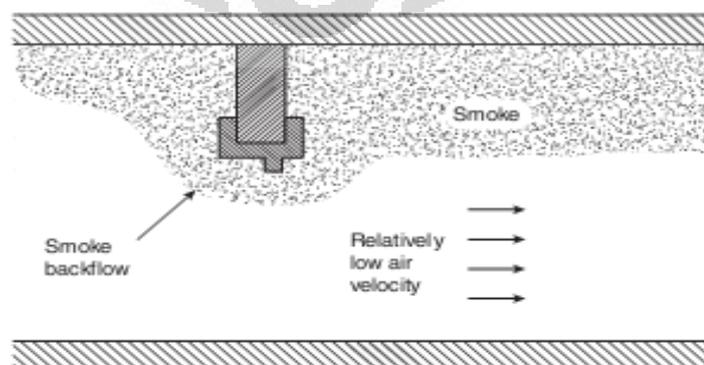
2.4.1 Prinsip Pengendalian Asap

Pengontrol asap memanfaatkan penghalang seperti tembok, lantai, pintu, dan lain sebagainya yang digunakan dalam manajemen asap tradisional bersama dengan penggunaan aliran udara dan perbedaan tekanan yang dihasilkan oleh kipas mekanis. Batang dari rintangan adalah pintu dan ruang yang bertekanan tinggi dapat dijadikan sebagai tempat berlindung atau jalur untuk menyelamatkan diri, sedangkan bagian yang bertekanan rendah menjauhkan asap dari kebakaran. Aliran udara melalui celah disekitar pintu dan melewati retakan yang ada pada konstruksi lain untuk mencegah asap masuk ke dalam ruang yang bertekanan tinggi.



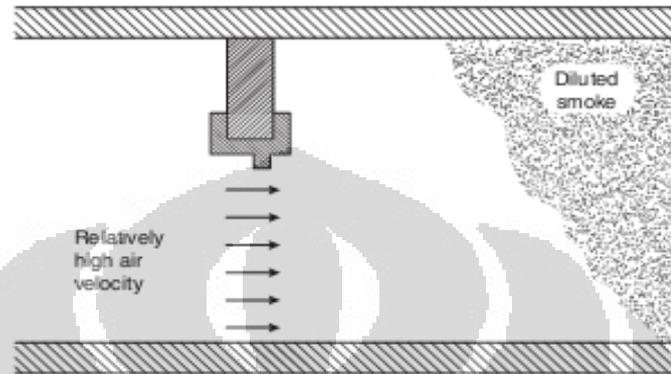
Gambar 2.6 Pencegahan asap melalui perbedaan tekanan [10]

Ketika pintu penghalan terbuka, maka aliran udara akan melewati pintu yang terbuka. Selanjutnya ketika aliran udara tersebut rendah, maka asap dapat bergerak melawan aliran udara ke dalam tempat berlindung atau rute untuk melarikan diri.



Gambar 2.7 Udara kecepatan rendah gagal menghalau asap[10]

Aliran balik asap pada saat pintu terbuka dapat dicegah dengan cara memberikan udara dengan kecepatan yang cukup tinggi. Besarnya kecepatan yang dibutuhkan untuk mencegah aliran balik asap tergantung pada energi *heat release rate* dari kebakaran.



Gambar 2.8 Udara kecepatan tinggi berhasil menghalau asap [10]

Dua prinsip dasar dari pengontrolan asap dinyatakan sebagai berikut:

1. Aliran udara itu sendiri dapat mengontrol pergerakan asap jika rata-rata kecepatan udara cukup besarnya.
2. Perbedaan tekanan udara yang melewati penghalang dapat mengontrol pergerakan asap.

Penggunaan perbedaan tekanan udara melewati penghalang untuk mengontrol pergerakan asap sering disebut juga sebagai presurisasi. Hasil dari presurisasi pada aliran udara yang melewati celah kecil pada pintu dan retakan pada bangunan dapat mencegah aliran balik dari asap. Sehingga, prinsip dasar kedua merupakan kasus khusus untuk prinsip dasar yang pertama. Bagaimanapun, pertimbangan dari dua prinsip tersebut dipisah oleh keunggulan untuk desain pengontrol asap.

Pengontrolan asap mengandalkan kecepatan udara dan perbedaan tekanan yang dihasilkan oleh kipas, ini memberikan tiga manfaat dalam perbandingan dengan metode tradisional dari manajemen asap, sebagai berikut:

1. *Smoke control* atau pengontrol asap lebih sedikit bergantung pada penghalang yang kuat. Kelonggaran dapat dibuat melalui desain sebagai alasan kebocoran pada penghalang.

2. *Stack effect, buoyancy*, dan angin lebih rendah untuk mengatasi pengontrol asap dibandingkan manajemen asap pasif. Saat tidak adanya pengontrol asap, maka tenaga penggerak atau *driving forces* mengakibatkan pergerakan asap meluas ke jalur dengan kebocoran yang ada. Bagaimanapun, pengontrol asap ini bekerja melawan tenaga penggerak ini.
3. Pengontrol asap dapat di desain untuk mencegah aliran asap melalui pintu terbuka melalui penggunaan aliran udara. Pada saat evakuasi ataupun terjadi kebakaran biasanya pintu penghalang ini tidak sengaja terbuka atau terbuka karena api, maka aliran asap akan dapat memasuki ruang tangga jika tidak ada pengontrol asap.

2.4.2 Zona Pengendali Asap

Konsep zona pengontrol asap dimaksudkan untuk membatasi pergerakan asap tersebut. Metode kontrol asap adalah dengan membagi bangunan menjadi beberapa zona pengendalian asap, dimana zona tersebut dipisahkan oleh partisi, lantai, dan pintu yang dapat ditutup untuk menghambat gerakan asap. Pada saat kebakaran terjadi, perbedaan tekanan dan aliran udara yang dihasilkan oleh kipas mekanis digunakan untuk membatasi penyebaran asap dari zona dimana kebakaran tersebut di mulai. Konsentrasi asap di dalam zona api dikendalikan dan diarahkan agar penghuni bangunan dapat menyelamatkan diri sesaat api terdeteksi. Seringkali, setiap lantai bangunan dipilih menjadi pemisah asap zona control. Namun, zona pengontrol asap dapat terdiri lebih dari satu lantai atau lantai dapat dibagi menjadi lebih dari satu zona pengendalian asap.

Tujuan zona control asap adalah membatasi pergerakan asap ke zona asap dengan menggunakan dua prinsip kontrol asap. Perbedaan tekanan diinginkan untuk melewati rintangan dari sebuah zona asap dapat dicapai dengan mengalirkan udara dari luar menuju zona tanpa asap melalui ventilasi zona asap. Ventilasi asap dari sebuah zona asap penting karena dapat mencegah tekanan yang berlebihan secara signifikan yang disebabkan oleh ekspansi panas gas sebagai akibat dari api. Bagaimanapun, ventilasi hanya sedikit mengurangi konsentrasi di zona asap. Ventilasi di zona ini dapat diakomodasi oleh ventilasi tembok bagian luar, *smoke shaft*, dan ventilasi mekanis.

2.5 Ruang Tangga Bertekanan

Tangga bertekanan dirancang dan dibangun bertujuan untuk menyediakan sebuah jalan keluar yang bebas asap pada saat sebuah gedung mengalami kebakaran. Selain itu, tangga bertekanan juga memberikan akses untuk para pemadam kebakaran dalam menjalankan tugasnya. Di sebuah lantai yang terjadi kebakaran, tangga bertekanan harus mampu mempertahankan perbedaan tekanan positif pada pintu tangga tertutup untuk mencegah asap memasuki ruang tangga. Selama kebakaran pada bangunan terjadi, beberapa pintu tangga dibuka selebar-lebarnya selama evakuasi dan pemadaman kebakaran, bahkan beberapa pintu diblok agar tetap terbuka. Idealnya harus ada aliran udara yang cukup untuk mencegah asap memasuki ruang tangga. Oleh karena itu, perlu dibuat sistem tangga bertekanan yang cocok untuk mengatasi hal tersebut.

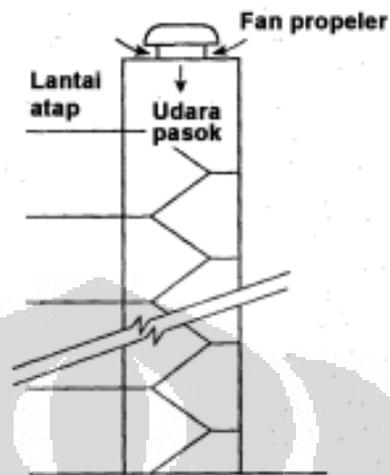
2.5.1 Sistem Injeksi dan Fan Pemasok Udara

Sistem ruang tangga dengan presurisasi mengatur suplai udara dengan mempertimbangkan pintu yang terbuka pada saat terjadi kebakaran, dimana perbedaan tekanan dijaga tetap positif di kedua sisi bukaan. Sistem tangga bertekanan dibagi menjadi dua kategori, yaitu sistem tunggal dan sistem injeksi jamak.

Pemilihan jenis injeksi ini dipengaruhi oleh pemilihan fan pemasok udara pada ruang tangga kebakaran, berikut adalah jenis fan beserta sistem kerja injeksinya [3]:

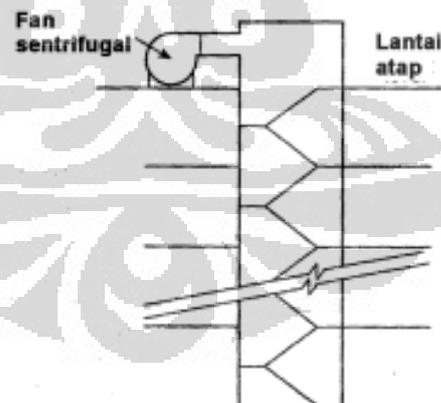
1. Fan propeler, sistem yang digunakan dalam fan jenis ini adalah sistem injeksi tunggal. Pemasangan fan dilakukan di bagian atap atau dinding luar untuk memasok udara ke ruang tangga kebakaran. Salah satu keuntungan besar menggunakan fan propeler untuk presurisasi pada ruang tangga adalah kurva respon tekanan relative datar terhadap beragam aliran. Maka, ketika pintu dibuka dan ditutup, fan propeller cepat merespon perubahan aliran dalam ruang tangga tanpa fluktuasi besarnya tekanan. Keuntungan kedua adalah biaya instalasi fan propeller ini cukup rendah. Namun, fan propeller

juga mempunyai kerugian yaitu kinerja fan dapat terpengaruh oleh tekanan angin karena tidak memiliki pelindung dari angin di luar ruangan.



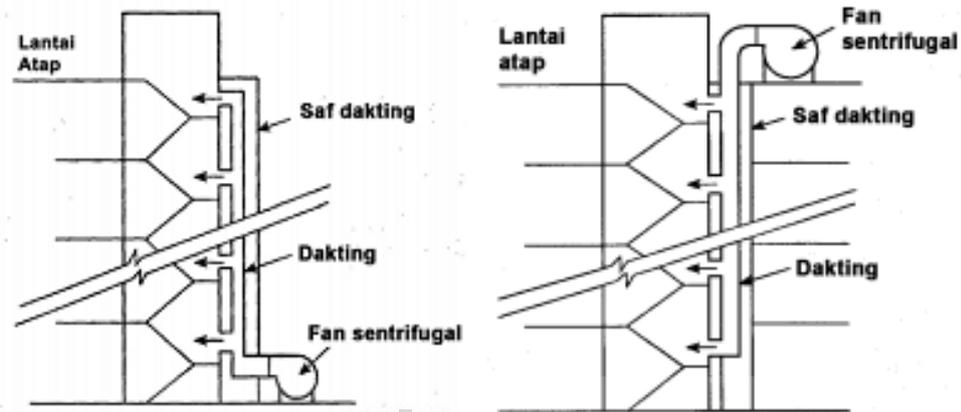
Gambar 2.9 Presurisasi ruang tangga dengan fan propeller [3]

2. Fan sentrifugal, jenis fan ini dapat digunakan dalam dua jenis injeksi tunggal maupun jamak. Pada injeksi tunggal dengan fan ini dapat menyebabkan presurisasi dikarenakan adanya pintu yang terbuka di dekat injeksi pasokan udara.



Gambar 2.10 Presurisasi ruang tangga injeksi tunggal fan sentrifugal [3]

Sistem injeksi jamak berbedanya dengan sistem injeksi tunggal, dimana udara dipasok ke dalam ruang tangga kebakaran pada banyak titik. Fan presurisasi dapat ditempatkan pada lantai bawah, lantai atap, atau pada setiap lokasi di setiap lantai ruang tangga kebakaran.



Gambar 2.11 Presurisasi ruang tangga dengan sistem jamak [3]

2.5.2 Sistem Suplai Udara

Terdapat dua buah parameter yang dapat mempunyai efek yang besar terhadap ukuran pasokan udara melalui *fan*, yaitu:

1. Kecepatan udara yang melalui pintu.
2. Jumlah efektif dari bukaan pintu yang diperkirakan.

Thomas [14] memperkirakan bahwa sebuah api dengan HRR sebesar 2.4 MW akan menyebabkan asap mengalir dengan kecepatan 3-4 m/s melalui sebuah pintu terbuka dengan lebar sebesar 0.9 m . Ukuran kecepatan sebesar ini hampir tidak mungkin mencapai semua area gedung sebagai presurisasi untuk mengontrol asap, maka harus dilakukan pertimbangan tertentu. Pintu dipertimbangkan dalam kondisi terbuka yang dapat mengurangi kecepatan tersebut dan variasi jumlah bukaan pintu sebagai parameter juga dalam menentukan ukuran suplai udara dari *fan*. Berikut dapat dilihat penggunaan perkiraan kecepatan yang melalui pintu yang terbuka pada ruang tangga kebakaran pada beberapa negara, seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan variasi *codes of practice* beberapa negara [15]

Country	Code	Pressure (Pa)		Door Velocity	No. Of Effective Open Doors
		Min.	Max.		
U.K.	BS5588 Part 4:1978	50	60	0.75 m/sec	ONE (2 Doors on Fire Floor)
	BS5588 Part 5:1991	Not Relevant		2.00 m/sec	THREE (2 Doors on Fire Floor) (Exit and Lift Door)
Australia	AS1668 P.1	50	110	1.00 m/sec	THREE (2 Doors on 2 Floors) (Exit Door)
Singapore	CP13	50	110	1.00 m/sec	THREE (2 Doors on 2 Floors) (Exit Door)
Canada	N.B.C.C. 1990	No Mention		4.72 m ³ /sec + 0.094 m ³ /sec For every door	FOUR (2 Doors on 3 Floors) (Exit Door)
U.S.A.	U.B.C. 1988	37		No Mention	No Mention
	N.F.P.A. (92A) 1988	up to 45	133	No Mention	No Mention
U.K.	BS5588 Part 4: 1998	50	60	ESCAPE STAIRS 0.75m/sec	ONE (Class A & C System) TWO (Class D System) THREE (Class E system)
				Fire Fighting 2.00m/sec	THREE (Class B System)

Sebuah sistem presurisasi memiliki tiga mode operasi, yaitu sebagai berikut:

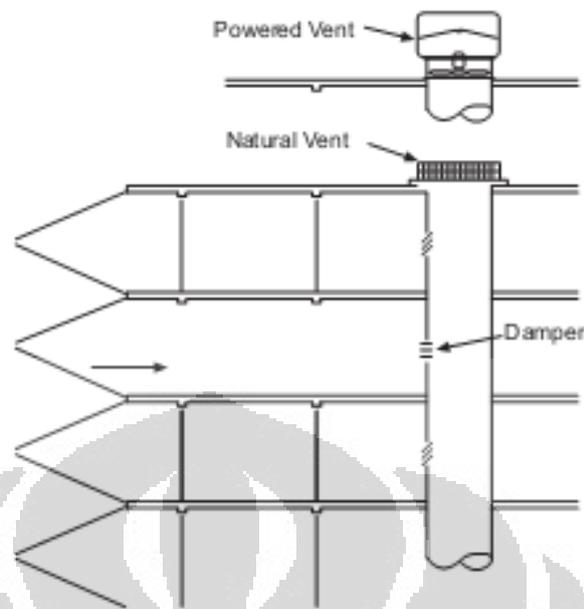
1. Fase deteksi, yaitu meningkatkan perbedaan tekanan untuk sistem proteksi pada ruang tangga kebakaran sesuai kebutuhan yang diperkirakan sebesar 50 Pa dalam kondisi semua pintu tertutup.
2. Fase evakuasi, yaitu menjaga kecepatan udara secara spesifik yang melalui pintu yang terbuka sebesar 0.75 m/s dengan variasi yang sudah ditentukan atau dengan memberikan perbedaan tekanan 10 Pa dengan variasi pintu tertutup dan terbuka yang sudah disesuaikan.
3. Fase pemadaman api, yaitu memberikan aliran udara dengan kecepatan spesifik sebesar 2 m/s yang melalui pintu terbuka dengan variasi maksimum.

Berdasarkan SNI 03-1746-2000 [22] Sistem presurisasi ruang tertutup bekerja setelah adanya pengaktifan dari sistem detektor asap dengan peletakan 3 m dari pintu masuk ke ruang tangga kebakaran. Selain itu pengaktifan tekanan pada ruang tangga juga dapat dilakukan dengan cara kontrol manual yang mudah dicapai oleh dinas pemadam kebakaran. Sedangkan, daya listrik cadangan untuk peralatan presurisasi harus disediakan oleh generator set yang disetujui untuk bekerja jika aliran listrik normal terputus. Generator ditempatkan pada ruangan yang pemisahannya mempunyai minimum ketahanan api selama 1 jam dari sisa bangunan. Generator harus mempunyai pasokan bahan bakar minimum yang cukup untuk mengoperasikan peralatan selama dua jam.

2.5.3 Sistem *Exhaust*

Sistem *exhaust* harus didesain untuk menyediakan sebuah keluaran sebagai rute suplai udara untuk meninggalkan gedung di area lantai api berada. *Exhaust* dapat dilakukan melalui empat metode, yaitu:

1. Melalui kebocoran yang ada pada retakan di jendela sampai keluar gedung. Dalam kenyataannya hal ini tidak realistis karena area retakan tidak akan mencukupi sebagai *exhaust*.
2. Melalui jendela atau *vent* otomatis yang menempel pada salah satu sisi gedung. Metode ini memungkinkan untuk dilakukannya dengan syarat adanya ruang yang cukup untuk mengakomodasi tempat *vent* berada. Penggunaan metode kedua membutuhkan hampir 0.5 m untuk area *vent* pada setiap lantai pada ruang tangga presurisasi.
3. Menyediakan saluran vertikal yang melalui keseluruhan tinggi gedung dengan sebuah *damper* yang dirangkai untuk membuka secara otomatis pada lantai api.



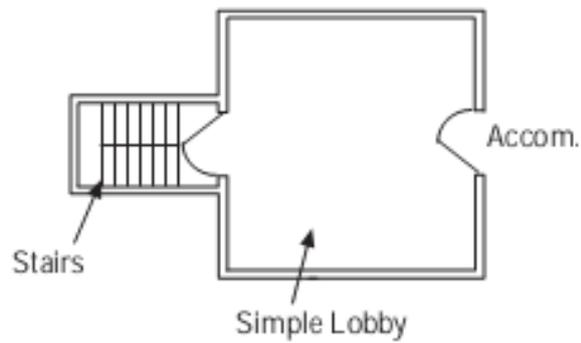
Gambar 2.12 Sistem *exhaust* melalui saluran *vertical* [15]

4. Dengan sistem mekanikal, yaitu melakukan ekstraksi area yang tidak terkena presurisasi. *Exhaust fan* akan dipilih untuk mengurangi asap yang dihasilkan pada lantai api. Pada saat pintu ruang tangga kebakaran terbuka dan presurisasi aktif maka akan ada aliran asap mengarah keluar ruang tangga dan *exhaust fan* ini bekerja untuk membuang asap keluar dari gedung.

2.5.4 Area Presurisasi

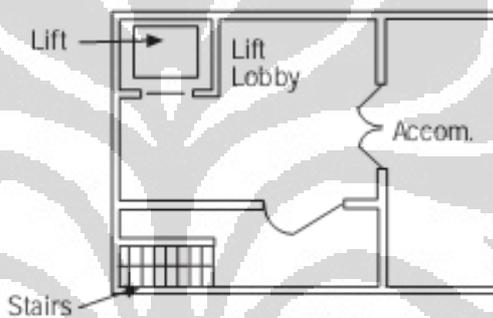
Sistem ruang tangga kebakaran bertekanan dapat didisain untuk mengakomodir area yang ingin diberikan presurisasi. Dalam hal ini dapat diklasifikasikan menjadi empat area, yaitu [15]:

1. Ruang tangga, yaitu sistem pengontrol asap ini disediakan untuk memberikan akses untuk evakuasi pada ruang tangga kebakaran yang bebas dari asap. Sistem ini dibuat desan asumsi desain gedung yang sederhana yaitu ruang tangga kebakaran berada langsung terhubung dengan lobi.



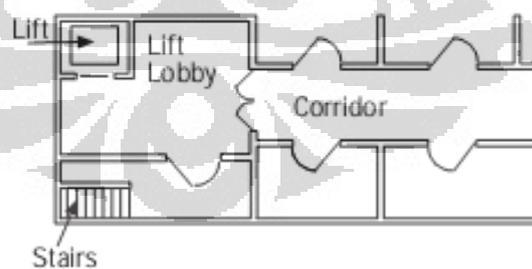
Gambar 2.13 Ruang tangga dengan lobi sederhana [15]

2. Ruang tangga dan lobi, yaitu adanya pelebaran jangkauan presurisasi dari ruang tangga hingga lobi *lift* dalam satu area.



Gambar 2.14 Ruang tangga dengan *lift* lobi [15]

3. Ruang tangga, lobi, dan koridor, yaitu perluasan jangkauan presurisasi ruang tangga hingga melewati lobi dan koridor.



Gambar 2.15 Ruang tangga dengan *lift* lobi [15]

4. *Lift Shaft*, secara umum digunakan untuk pemadaman kebakaran oleh pemadam kebakaran. Selama presurisasi ruang tangga berjalan dengan baik *lift lobby* berfungsi sebagai lobi yang sederhana. Kemudian dengan adanya *lift shaft* yang dipresurisasi, tidak ada jalur masuk untuk udara melalui *lift shaft*.

2.5.5 Latar Belakang Desain Sistem Presurisasi

Dalam membuat desain ruang tangga dengan sistem presurisasi harus diperhatikan tingkat atau level tekanan gedung berdasarkan ketinggiannya.

Tabel 2.2 Desain presurisasi berdasarkan tekanan [15]

Building Height (m)	Fire Pressure (Pa)	Wind/Stack Effect (Pa)	Design Pressure (Pa)
5	8.5	8.0	25
25	8.5	10.5	25
50	8.5	13.0	50
100	8.5	19.5	50
150	8.5	29.5	50

Untuk menahan asap hasil kebakaran memasuki ruang tangga kebakaran pada tingkat tekanan yang disesuaikan, perlu diberikan kapasitas udara yang cukup agar dapat menahan asap saat pintu terbuka dalam situasi evakuasi. Perhitungan kapasitas udara ini didapatkan dari persamaan yang dibuat oleh Hobson dan Stewart [16]:

$$Q = 0.83 A_E P^{\frac{1}{n}}$$

Dimana Q merupakan kapasitas udara yang diperlukan (m^3/s), sedangkan A_E adalah kebocoran pada ruangan dalam (m^2), n adalah faktor kebocoran (2 untuk kebocoran besar seperti pintu dan 1.6 untuk kebocoran yang lebih kecil seperti jendela), dan P adalah perbedaan tekanan (Pa)

Tabel 2.3 Tipe Kebocoran pada area pintu [15]

Type of Door	Size	Crack Length (m)	Leakage Area (m^2)
Single Leaf in Frame Opening into Pressurised Space	2 m x 800 mm	5.6	0.01
Single Leaf in Frame Opening Outwards	2 m x 800 mm	5.6	0.02
Double Leaf with or without Central Rebate	2 m x 1.6 m	9.2	0.03
Lift Door	2 m High x 2 m Wide	8.0	0.06

2.6 Analisis Dimensional dan Keserupaan

Untuk sebuah perbandingan antara hasil data yang diperoleh dari model dan eksperimen, maka perlu terlebih dahulu dilakukan analisis dimensional agar perbandingan yang dilakukan menghasilkan perbandingan data yang cukup ideal. Analisis dimensional yang diperhitungkan pada penelitian ini adalah HRR dan waktu, sebagai berikut [13]:

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_M \left(\frac{L_F}{L_M} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (2.13)$$

Dimana L adalah panjang skala dan indeks M merujuk kepada model skala, sedangkan F adalah skala aktual. Selanjutnya adalah analisis dimensional untuk waktu yang akan digunakan pada eksperimen dan simulasi, yaitu sebagai berikut:

$$t_F = t_M \left(\frac{L_F}{L_M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Dimana t menunjukkan waktu pengambilan data yang dilakukan baik pada eksperimen maupun pada simulasi.

2.7 Fire Dynamic Simulator

Fire dynamic simulator (FDS) adalah *Computational Fluid Dynamic (CFD)*, sebuah software yang dikembangkan oleh *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. NIST adalah sebuah organisasi pengembang penelitian dalam ranah *fire safety* di bawah pengawasan *U.S Departemen of Commerce*. *Smokeview* adalah hasil komputasi dari FDS yang menghasilkan gambar dan animasi. FDS melakukan pendekatan simulasi secara numerik dalam bentuk persamaan Navier – Stokes yang diperuntukkan untuk *low speed* dan *termally-driven flow* pada pergerakan asap dan perpindahan panas dari api [12].

Untuk menggambaran partikel bergerak seperti asap dan butiran air secara umum menggunakan pendekatan Lagrangian. Selain itu di dalam FDS dapat dilakukan pembuatan *slices – 2D contours* yang dapat digunakan sebagai visualisasi berbagai macam informasi fase gas seperti suhu, densitas, *heat release rate per unit area*, dan *radiative flux*. FDS dapat digunakan untuk pemodelan fenomena berikut [12]:

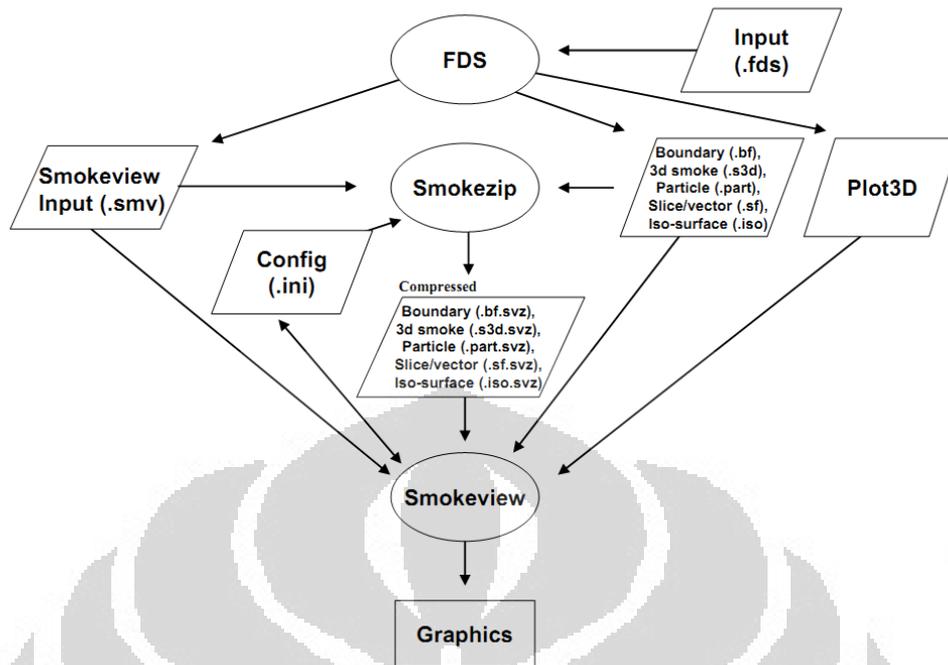
1. Perpindahan panas kecepatan rendah dan produk pembakaran dari suatu kebakaran.
2. Radiasi dan perpindahan panas secara konveksi antara permukaan gas dan padat.
3. *Pyrolysis*.
4. Penyebaran lidah api dan pertumbuhan suatu kebakaran.
5. Aktivasi dari *sprinkler*, *heat detector*, dan *smoke detector*.
6. Semprotan dan tekanan *sprinkler* oleh air.

2.7.1 Data *Input* dan *Output* Simulasi FDS

FDS membaca parameter *input* dari *text file*, menghitung solusi numerik dengan persamaan atur, dan membuat *output file* sebagai hasil dari *input file*. Berikut ini adalah beberapa *input* dengan menggunakan simulasi FDS [12]:

1. Menentukan batas area dan waktu simulasi
2. Model bangunan
3. Nyala api terkait dengan *properties* material dan kondisi *thermal boundary*.
4. Ventilasi
5. *Device* dan *control logic*
6. Partikel dan *droplet*
7. Pembakaran dan radiasi

FDS melakukan pendekatan geometri, yaitu melalui suatu persamaan dari satu atau lebih *rectangular grid*. Hasil komputasi simulasi FDS terdiri atas suhu, densitas, tekanan, kecepatan, dan komposisi kimia dari setiap *grid cell* setiap satuan waktu komputasi. Pada Gambar 2.15, dijelaskan cara kerja FDS dalam membuat sebuah pemodelan.



Gambar 2.16 Cara kerja FDS dalam menampilkan sebuah pemodelan [12]

Komputasi FDS terdiri dari dua *output*, yaitu permukaan padat dan fase gas. Pada permukaan padat, FDS dapat menghasilkan suatu hubungan kesetimbangan energi antara fase solid dan gas, beberapa *output* dari permukaan padat terdiri atas [12]:

1. Temperatur permukaan solid
2. *Heat flux*, radiasi ataupun konveksi
3. *Burning rate*
4. *Mass lose rate*

Sedangkan komputasi pada fase gas terdiri atas [12]:

1. Temperatur gas
2. Kecepatan
3. Tekanan
4. HRR per unit area
5. Massa jenis gas
6. Masa *droplet* air dalam satuan volume
7. Rasio perbandingan antara udara dan bahan bakar

2.7.2 Hydrodynamic Model

FDS melakukan komputasi simulasi dengan pendekatan secara numerik dari persamaan Navier – Stokes secara tepat pada kondisi *low speed*, yaitu suatu aliran termal dengan penekatan terhadap penyebaran api dan perpindahan panas dari nyala api. Inti algoritma pada FDS digunakan untuk memprediksi dan mengoreksi skema dalam tatanan ruang dan waktu. Turbulensi pada FDS diperlakukan sebagai bentuk *Smargorinsky* dari *Large Eddy Simulation* (LES). Komputasi FDS dapat juga menggunakan *Direct Numerical Simulation* (DNS), yaitu bentuk komputasi pelepasan *grid* secara langsung dan LES. *Grid* pada model *Large scale eddies* dikomputasikan secara langsung, tetapi pada bentuk *sub grid scale* pelepasan *grid* dilakukan secara berangsur-angsur. Pemilihan penggunaan LES ataupun DNS didasari pada perhitungan dan pemakaian *grid* pada suatu simulasi. Pada simulasi pada skala besar, misalnya pada simulasi pergerakan asap pada gedung besar yang memiliki banyak tidak dimungkinkan menggunakan bentuk DNS pada proses pembakaran dan pergerakan produk hasil dari pembakaran. Namun, bentuk DNS dapat digunakan untuk melakukan eksperimen dalam skala kecil [12].

2.7.3 Pertumbuhan dan Penyebaran Api

Simulasi pada FDS dapat digunakan untuk membuat suatu analisa terhadap laju pelepasan panas pada suatu kebakaran. Besarnya *Heat Release Rate* (HRR) pada suatu kebakaran dipengaruhi oleh laju perpindahan panas dan juga luas permukaan dari produk yang terbakar. Suatu model pada FDS dapat memprediksi kecepatan aliran dan temperatur dengan nilai akurasi sebesar 5% hingga 20 % tergantung pada *grid* yang digunakan [12]. Skenario pada model kebakaran hanya dapat memprediksi besarnya HRR karena tidak dapat ditentukan seberapa besar HRR pada suatu kebakaran akibat dari ketidakpastian yang cukup besar dari suatu model dalam menggambarkan suatu keadaan. Ada beberapa faktor yang dapat menyebabkan hal tersebut, diantaranya adalah [12]:

1. Sulitnya mengetahui *properties* dari suatu material dan bahan bakar pada kondisi aktual.

2. Proses fisik pembakaran, yaitu perpindahan panas baik secara radiasi, konveksi, dan konduksi lebih rumit merepresentasikan model matematik yang terdapat dalam FDS yang sensitif terhadap parameter dalam bentuk fisik dan numerik.

2.7.4 Model Pembakaran

Sebagian besar aplikasi model FDS menggunakan model pembakaran berdasarkan pada konsep *mixture fraction* sehingga di dalam pendekatannya FDS tidak dapat membedakan pembakaran dari jenis *flaming* dan *smoldering*. *Mixture fraction* merupakan sebuah konservasi kuantitas skalar yang didefinisikan sebagai fraksi gas pada titik yang diberikan pada wilayah aliran yang diasumsikan sebagai bahan bakar. Model ini diasumsikan sebagai pembakaran suatu campuran yang terkontrol, di mana reaksi bahan bakar dan oksigen berlangsung secara cepat. Fraksi massa reaktan dan produk diperoleh dari *Mixture Fraction* dengan menggunakan prinsip *state relations* yang merupakan kombinasi penyederhanaan analisa dan pengukuran [12].

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk menjadi sebuah referensi atau acuan dalam penggunaan tangga kebakaran bertekanan. Untuk mendapatkan hasil penelitian yang akurat dan sesuai standar maka dipersiapkan beberapa langkah dan menerapkan prosedur yang baik agar mendapatkan hasil yang baik dan dapat dipertanggungjawabkan. Tahapan pada penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu tahap persiapan

3.1 Tahap Simulasi

Pada simulasi penelitian ini, permodelan dilakukan dengan menggunakan FDS 5 untuk mensimulasikan suatu gedung bertingkat tinggi dengan menggunakan tangga kebakaran dengan sistem tekanan, dimana terjadi sebuah kebakaran di lantai tertentu. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ruang tangga tekanan terhadap jarak pandang dan opasitas, simulasi akan dilakukan sebagai berikut:

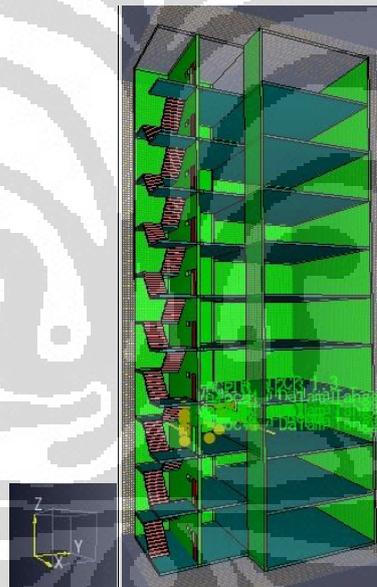
1. Simulasi pergerakan asap kebakaran dan pengaruhnya terhadap opasitas dalam gedung bertingkat tinggi tanpa sistem ruang tangga tekanan.
2. Simulasi pergerakan asap kebakaran dan pengaruhnya terhadap opasitas dalam gedung bertingkat tinggi dengan sistem ruang tangga tekanan.

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi dengan menggunakan *software* FDS 5. Dalam simulasi ini, digunakan sistem *pressurized stairwell* yang berfungsi untuk menahan penyebaran asap di dalam ruang tangga kebakaran yang sekaligus berfungsi sebagai sistem proteksi evakuasi dalam kebakaran. Dalam skenario 1 di dalam gedung bertingkat tinggi akan diberikan sebuah sumber api di lantai 3 untuk melihat pergerakan asap dan pengaruhnya terhadap opasitas di dalam ruang tangga kebakaran. Sedangkan, skenario 2 akan dilakukan simulasi dengan sumber api yang sama yaitu di lantai 3 dengan mengaktifkan sistem ruang tangga tekanan, sehingga akan terlihat perbedaan dampak yang terjadi jika sebuah gedung bertingkat tinggi didisain dengan atau tanpa tangga bertekanan. Kemudian, untuk

skenario kedua ini akan dilakukan beberapa kali simulasi dengan meningkatkan besaran sumber api dengan sistem kelipatan. Sehingga, selain dapat melihat perbedaan dampak penggunaan sistem tangga tekanan, akan terlihat juga seberapa besar kemampuan sebuah tangga tekanan untuk mengatasi penyebaran asap pada kondisi besaran api yang berbeda juga.

3.1.1 Domain

Dalam simulasi dengan menggunakan FDS 5, besar kaitannya antara besarnya domain dan ukuran grid yang digunakan dalam simulasi. Besarnya grid tersebut berpengaruh terhadap akurasi dari hasil sebuah simulasi. Disamping itu besarnya grid ini berpengaruh juga terhadap *computing time* suatu simulasi. Dalam penelitian ini dipergunakan *grid* dengan ukuran 0.23 x 0.23 x 0.21 m.

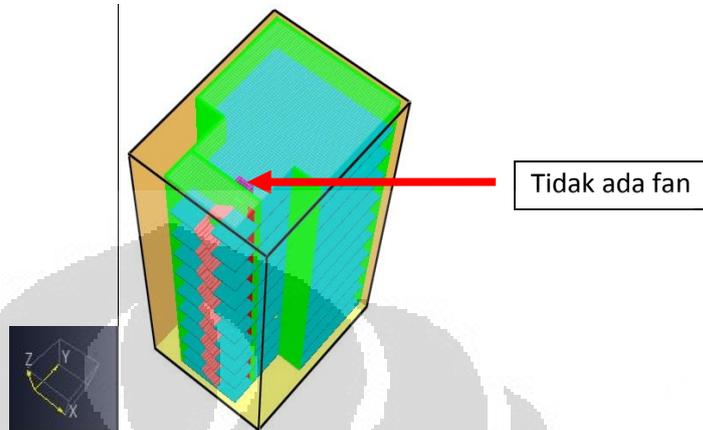


Gambar 3.1 Lay out mesh yang digunakan pada simulasi

3.1.2 Geometri

Geometri yang digunakan dalam simulasi ini merujuk pada ukuran gedung bertingkat tinggi yang sesungguhnya dimana skala perbandingan ukuran gedung dengan simulasi adalah sebesar 1:1. Sedangkan, perbandingan simulasi dengan eksperimen adalah 1:20. Simulasi ini terdiri dari dua skenario yaitu gedung bertingkat tinggi tanpa penggunaan sistem tangga tekanan dan gedung bertingkat

tinggi dengan penggunaan sistem tangga tekanan secara aktif. Gedung bertingkat tinggi dalam simulasi memiliki dimensi dengan jangkauan volume sebesar 13.0 m x 17.5 m x 40.0 m (x,y,z).

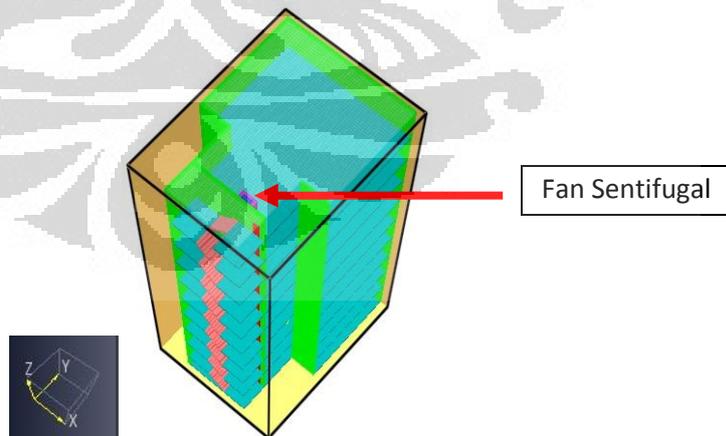


Gambar 3.2 Lay out simulasi tanpa pengaktifan ruang tangga tekanan

Adapun posisi peralatan pengukuran yang digunakan dalam simulasi tanpa pengaktifan ruang tangga tekanan yaitu:

Tabel 3.1 Posisi pengukuran saat kondisi ruang tangga tanpa tekanan

<i>Device</i>	Sumbu-x	Sumbu-y	Sumbu-z
<i>Beam 1</i>	6.25-18.75 m	29-29 m	11.2-11.2 m
<i>Beam 2</i>	9.00-16.00 m	22-22 m	11.2-11.2 m
<i>Beam 3</i>	9.00-16.00 m	19-19 m	10.7-10.7 m



Gambar 3.3 Lay out simulasi dengan pengaktifan ruang tangga tekanan

Adapun posisi peralatan pengukuran yang digunakan dalam simulasi tanpa pengaktifan ruang tangga tekanan yaitu:

Tabel 3.2 Posisi pengukuran saat kondisi ruang tangga dengan tekanan

<i>Device</i>	Sumbu-x	Sumbu-y	Sumbu-z
<i>Beam 1</i>	6.25-18.75 m	29-29 m	11.2-11.2 m
<i>Beam 2</i>	9.00-16.00 m	22-22 m	11.2-11.2 m
<i>Beam 3</i>	9.00-16.00 m	19-19 m	10.7-10.7 m

3.2 Tahap Eksperimen

3.2.1 Perancangan Model Tangga Presurisasi Gedung Bertingkat

Pada ini akan dijelaskan berbagai macam pertimbangan dalam pembuatan desain model tangga kebakaran presurisasi pada gedung bertingkat tinggi. Model perancangan ini merujuk pada model yang telah dirancang oleh kelompok tugas merancang Universitas Indonesia, yaitu *Development of Smoke Venting by Stailwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus* [17]. Model dibuat dengan skala 1: 20 diperoleh bahwa spesifikasi ukuran maket kerja dengan panjang 65cm, lebar 86 cm, dan tinggi 200cm.

**Gambar 3.4** Desain maket [17]

Spesifikasi desain untuk pembuatan maket adalah sebagai berikut:

1. Desain maket dengan ukuran 70 cm x 65 cm x 200 cm atau menggunakan skala 1:20 dibandingkan desain sebenarnya (desain simulasi).
2. Tangga bentuk v dibuat miring dengan menggunakan anak 10 anak tangga setiap tahapan.
3. Bagian dalam model menggunakan akrilik transparan 3 mm, sedangkan rangka luar dan bagian penutup menggunakan akrilik transparan 5 mm.
4. Dirangkai di atas meja dorong agar *portable*
5. Lubang jendela pada ruangan menggunakan engsel agar bisa dibuka atau ditutup sesuai kebutuhan.
6. Pintu tambahan dibuat di dalam ruangan dengan engsel
7. Cerobong ditambahkan ditembok perbatasan ruangan dan tangga menggunakan bentuk kotak.

Pembuatan rangka sebagian besar menggunakan akrilik sebagai pilihan utama. Walaupun tergolong mahal, tapi keunggulannya adalah lebih aman dan lebih ringan daripada kaca dan memiliki tingkat kejernihan pandangan hampir serupa dengan kaca.



Gambar 3.5 Akrilik Lembaran [18]

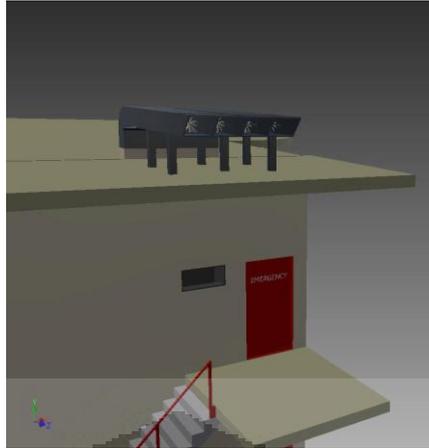
Warna akrilik yang digunakan adalah *clear* atau bening, hal tersebut bertujuan untuk memudahkan proses pemangamatan saat melakukan simulasi pergerakan pada model gedung bertingkat tinggi.

Dalam pembuatan model ini turut dipertimbangkan berbagai macam standard baik SNI maupun standar International, untuk mendapatkan hasil desain yang efektif. Model desain ruang tangga bertekanan yang dibuat merujuk pada jenis desain ruang tangga kebakaran seperti pada Gambar 2.12, yaitu model presurisasi tangga kebakaran yang mencakup presurisasi pada ruang tangga dan lobi sederhana. Desain tersebut dipilih untuk mempermudah proses pembuatan model dalam skala maket dan mempermudah analisa pergerakan asap karena tidak terlalu banyak kompartemen.



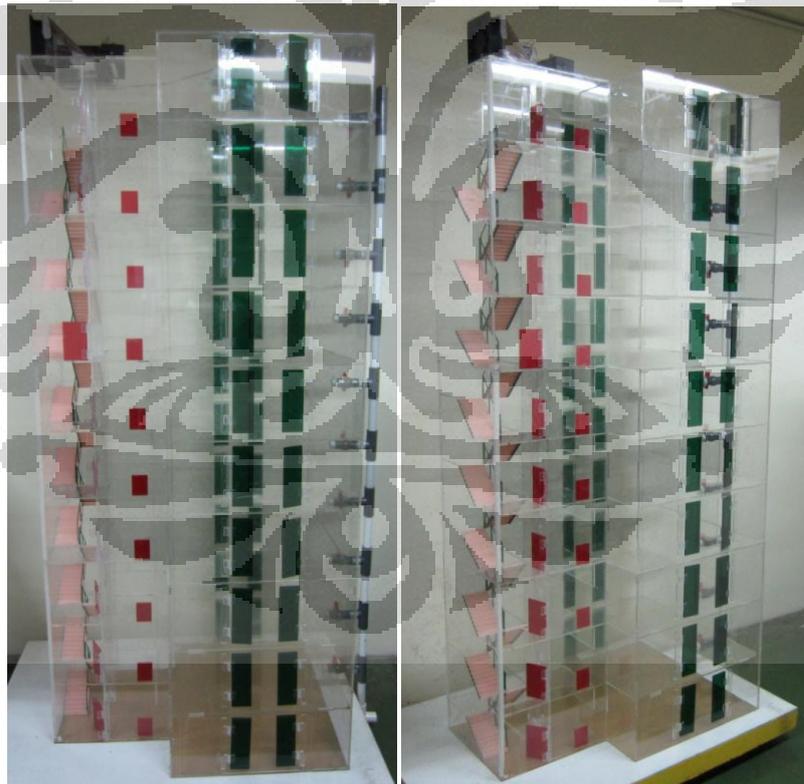
Gambar 3.6 Ruang tangga dengan sistem presurisasi [17]

Pemilihan jenis injeksi untuk desain model adalah sistem injeksi jamak, yaitu dengan menyediakan sebuah *vertical shaft* untuk suplai udara dari fan yang diinjeksikan ke dalam setiap lantai ruang tangga kebakaran, seperti teori yang ada pada bagian 2.4.1. Kemudian, untuk mendukung sistem injeksi jamak ini maka dipilih fan yang sesuai, yaitu jenis fan sentrifugal. Pemilihan fan sentrifugal didasari karena dianggap lebih ideal untuk diterapkan pada pemberian presurisasi terhadap ruang tangga kebakaran. Sistem injeksi jamak dipilih karena lebih efektif untuk tangga kebakaran presurisasi terlebih saat banyak jumlah pintu yang terbuka.



Gambar 3.7 Fan sentrifugal sistem dengan injeksi dari atap [17]

Pemotongan dan perangkaian model tersebut diserahkan kepada perusahaan laser *cutting* untuk mendapatkan hasil yang sesuai dan presisi sesuai dari desain yang telah dibuat.



Gambar 3.8 *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus*

3.2.2 Teknis Eksperimen

Tahap eksperimen merupakan tahap awal dalam penelitian ini yang bertujuan untuk melihat pengaruh tekanan ruangan tangga kebakaran terhadap opasitas pada saat terjadi sebuah kebakaran di gedung bertingkat tinggi dalam skala modeling. Model yang digunakan untuk eksperimen adalah *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus* yang dimiliki oleh Laboratorium *Fire Safety* Teknik Mesin Universitas Indonesia. Model ini memiliki ketinggian 2 m atau setara dengan skala 1:20 dibandingkan dengan ukuran aktual desain gedung yang sudah dibuat, yaitu 4 m. Sebelum dilakukan pengambilan data, maka perlu dilakukan proses persiapan *set-up* peralatan pada model. Persiapan ini berupa pemasangan peralatan sensor *beam* pada model gedung yang akan dilihat perubahan opasitasnya.



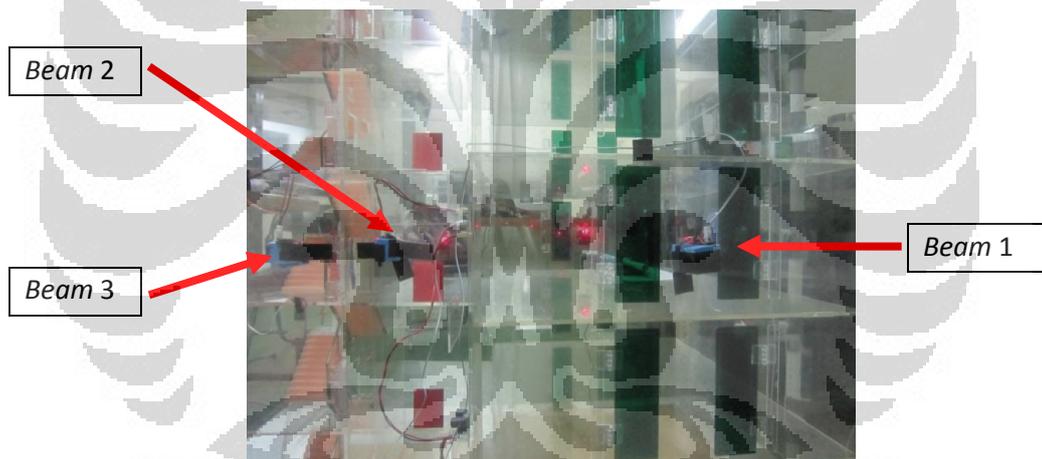
Gambar 3.9 Model gedung bertingkat tinggi

Pemasangan sensor *beam* dilakukan pada 3 bagian gedung untuk melihat perubahan opasitas dari posisi berdekatan dengan titik nyala api. Berikut ini adalah titik-titik peletakan sensor *beam*:

Tabel 3.4 Koordinat Letak sensor *beam* pada model

<i>Device</i>	Sumbu-x	Sumbu-y	Sumbu-z
<i>Beam 1</i>	0.00-13.00 m	0.63-0.63 m	0.5-0.5 m
<i>Beam 2</i>	0.15-10.00 m	0.28-0.28 m	0.5-0.5 m
<i>Beam 3</i>	0.15-10.00 m	0.09-0.09 m	0.5-0.5 m

Posisi sensor *beam* diletakkan pada posisi *center* dari masing-masing area yaitu area huni, area dimana *smoke barrier* berada, dan area ruang tangga bertekanan. Peletakan 3 sensor *beam* ini dilakukan untuk melihat perubahan opasitas per satuan waktu. Diharapkan dari pemasangan ketiga sensor tersebut, kita dapat melihat perubahan opasitas asap yang dihasilkan sumber titik api, sehingga kita dapat menganalisis pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap opasitas asap. Pemasangan 3 buah tersebut digambarkan oleh Gambar 3.2, sebagai berikut:

Gambar 3.10 Peletakan sensor *beam* 1, 2, dan 3

BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

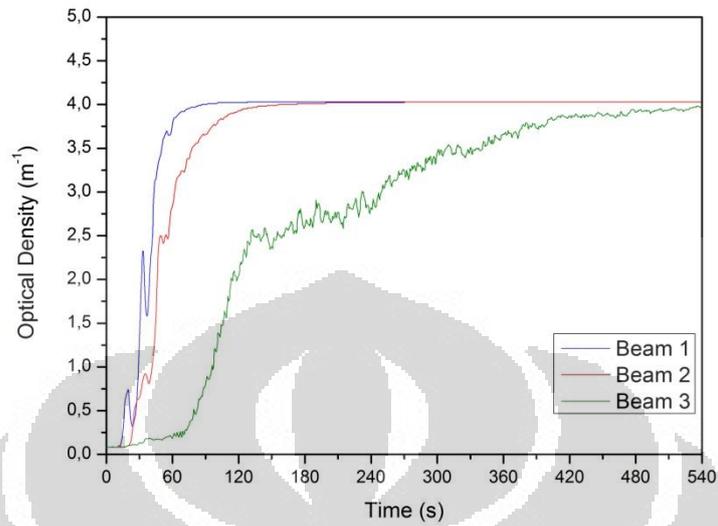
Dalam penelitian ini, analisis data akan dilakukan menggunakan perbandingan data grafik yang diperoleh dari hasil eksperimen dan simulasi yang dilakukan di FDS 5. Dalam pengambilan data berikut ini tidak dilakukan sama persis karena keterbatasan yang dimiliki oleh computing system FDS maupun model gedung bertingkat tinggi, maka akan dilakukan beberapa penyesuaian kondisi dalam pengambilan data. Dalam hal ini yang ditekankan adalah perbandingan tren dari hasil eksperimen dan data hasil simulasi.

4.1 Hasil dan Analisa Simulasi

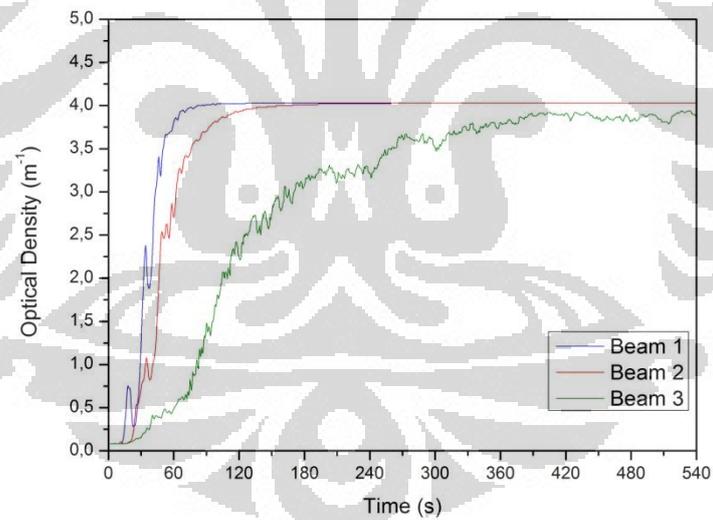
4.1.1 Simulasi Ruang Tangga Tanpa Tekanan

Pada simulasi model dengan menggunakan FDS 5 akan menggunakan ukuran aktual dari gedung bertingkat tinggi yang sudah dirancang. Bangunan ini terdiri dari 10 lantai dengan ketinggian total 42 meter. Dari ketentuan tinggi gedung 10 lantai, maka jumlah pintu maksimum yang diizinkan terbuka adalah $(10\% \text{ jumlah lantai} + 1)$ atau sejumlah 2 lantai. Pada HRR yang sama, yaitu konstan 2 MW akan dilihat pengaruh HRR tersebut terhadap nilai opasitas asap di dalam gedung bertingkat tinggi tanpa aktif tekanan pada ruang tangga kebakaran. Kondisi yang divariasikan adalah jumlah pintu yang terbuka, yaitu:

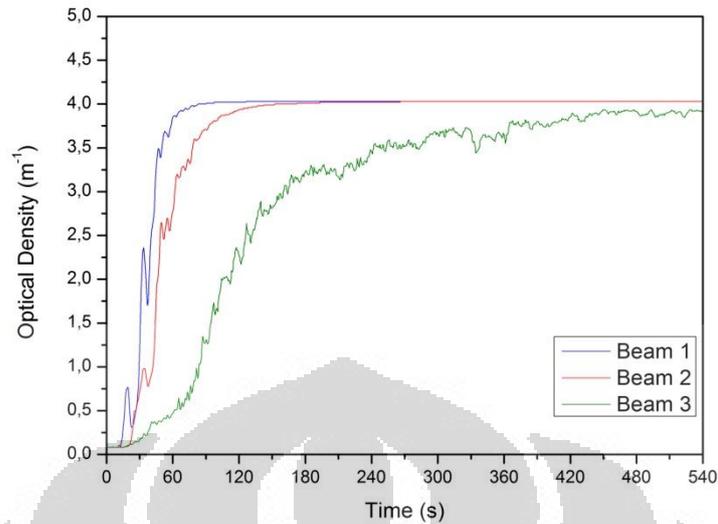
1. Satu pintu terbuka di lantai sumber api.
2. Dua pintu terbuka di lantai sumber api dan pintu *exit*.
3. Tiga pintu terbuka di lantai sumber api, 1 pintu di salah satu lantai lain, dan 1 pintu *exit*.



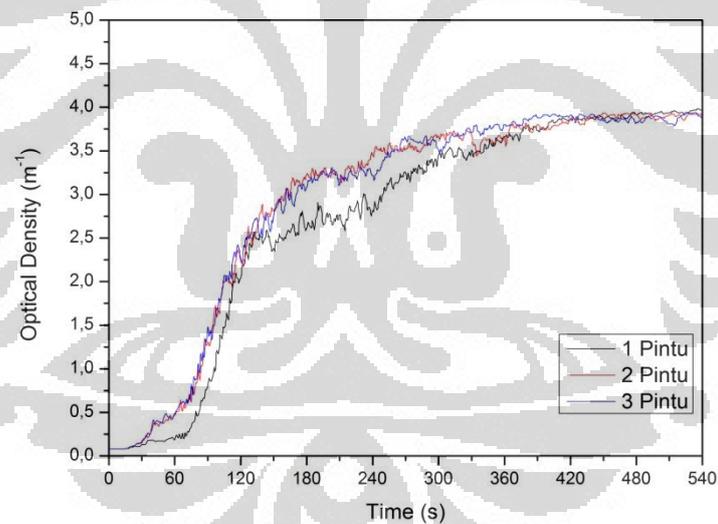
Gambar 4.1 Perbandingan waktu dengan *optical density* tanpa tekanan pintu terbuka 1



Gambar 4.2 Perbandingan waktu dengan *optical density* tanpa tekanan pintu terbuka 2



Gambar 4.3 Perbandingan waktu dengan *optical density* tanpa tekanan pintu terbuka 3



Gambar 4.4 Perbandingan *optical density* ruang tangga pintu terbuka 1-3

Hasil simulasi ruang tangga tanpa tekanan pada gedung bertingkat tinggi dapat terlihat jelas dari grafik di atas. *Optical density* yang terdeteksi pada ruang 1 dan 2 identik atau hampir sama pada tiga kondisi tersebut. Hal itu disebabkan karena dua sensor *beam* tersebut berada di dekat sumber api di lantai yang sama, sehingga tanpa adanya pengaruh dari tekanan pada tangga maka hasil deteksi yang didapat hampir sama. Sedangkan pada Gambar 4.10 terlihat bahwa terdapat

perbedaan opasitas asap yang terdeteksi oleh sensor *beam*. Hal itu terjadi karena pengaruh pintu yang terbuka, dengan adanya pintu *exit* yang terbuka pada kondisi kedua dan ketiga maka mempengaruhi asap untuk bergerak lebih cepat memasuki ruang tangga kebakaran sehingga pada dua kondisi tersebut perubahan opasitas asap terjadi secara cepat.

4.1.2 Simulasi Ruang Tangga dengan Tekanan

Ketentuan yang akan digunakan dalam perencanaan simulasi ruang tangga kebakaran bertekanan adalah:

1. Perbedaan tekanan udara di dalam dan di luar ruang tangga adalah 25 Pa hingga tekanan maksimal yaitu 50 Pa.
2. Aliran kecepatan udara yang melewati pintu terbuka pada ruang tangga kebakaran minimal 1.33 m/s
3. Perencanaan udara luar tangga 32⁰ C, sedangkan udara di dalam ruang tangga adalah 26⁰ C.
4. Ketinggian lantai terbagi menjadi dua, yaitu 4 meter pada lantai satu dan 3.8 meter untuk lantai 2 hingga lantai 10.
5. Luas dinding bangunan yang berhubungan dengan udara luar 1640 m² dan luas dinding antara ruang tangga dan bangunan adalah 75 m²

Setelah kita menentukan ketentuan yang ada dalam simulasi FDS, maka harus dilakukan perhitungan terhadap perbedaan tekanan untuk masing-masing kondisi, yaitu berdasarkan banyaknya bukaan pintu ruang tangga kebakaran. Perbedaan tekanan ruang tangga dan bagian ruangan dapat dihitung dengan persamaan berikut [10]:

$$\Delta P_{SB} = \Delta P_{SBb} + \frac{by}{1 + \left(\frac{A_{SB}}{A_{BO}}\right)^2}$$

Dimana ΔP_{SBb} adalah perbedaan tekanan pada bagian dasar antara ruang tangga dan gedung. A_{SB} adalah luas kebocoran antara ruang tangga dan gedung, sedangkan A_{BO} adalah kebocoran antara gedung dan luar gedung pada setiap

lantainya. Setelah dapat ditentukan perbedaan tekanan pada gedung maka dapat ditentukan juga nilai dari kapasitas udara yang dibutuhkan agar ruang tangga bertekanan dapat bekerja dengan baik [10]:

$$Q = \frac{2}{3} N C A_{SB} \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(\frac{\Delta P_{SBt}^{\frac{3}{2}} - \Delta P_{SBb}^{\frac{3}{2}}}{\Delta P_{SBt} - \Delta P_{SBb}} \right)}$$

Dimana N adalah jumlah lantai dan C adalah koefisien aliran. ΔP_{SBt} adalah perbedaan tekanan pada bagian atas antara ruang tangga dan gedung.

Maka didapatkan nilai-nilai dari kapasitas pasokan udara pada kondisi bukaan pintu yang berbeda seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4.1 Variasi Jumlah Pintu dan Suplai Udara

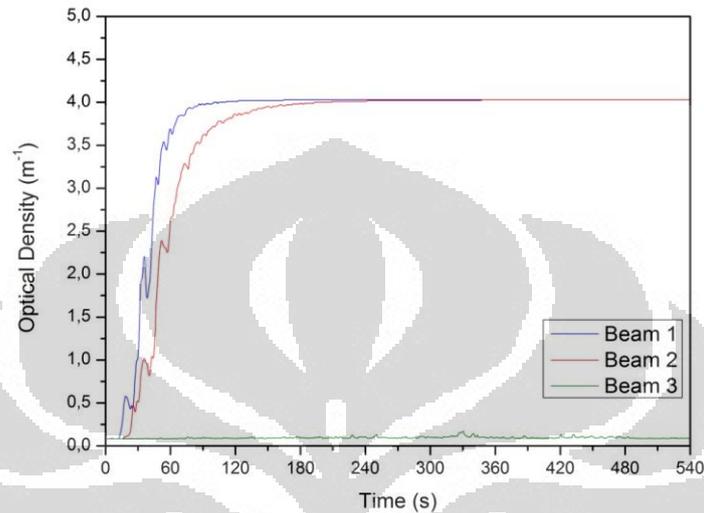
Kondisi Pintu	Kapasitas Suplai Udara (m³/s)
Tertutup	2.8
Terbuka 1	6.6
Terbuka 2	8.9
Terbuka 3	11.5

Pada simulasi menggunakan FDS 5 diberikan sensor *beam* dengan peletakan sesuai pada Tabel 3.2. Data yang terbaca oleh *device beam* pada FDS adalah dalam bentuk %, maka perlu dilakukan konversi ke dalam bentuk m⁻¹. Konversi dilakukan dengan merujuk pada Tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4.2 Hubungan antara presentase penggelapan dan opasitas [8]

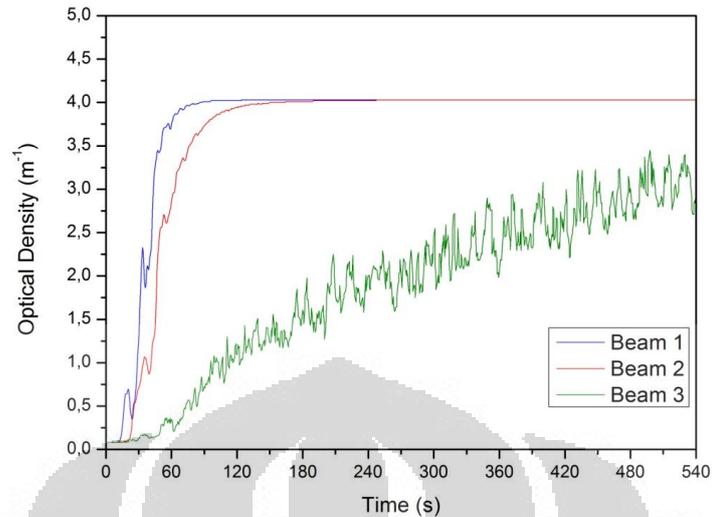
Percentage Obscuration	Optical density (Equation (11.2))	Optical density (db) (Equation (11.3))
10	0.11	0.46
50	0.69	3.01
90	2.30	10.00
95	3.00	13.01
99	4.61	20.00

Dengan data yang diperoleh dari tabel maka didapatkan persamaan eksponensial, yaitu $OD = 0.0807 e^{0.0391PO}$. Maka dengan persamaan tersebut kita dapat mengubah hasil dari *percentage obscuration* menjadi *optical density*. Pada simulasi ini akan menggunakan HRR konstan yang sama, yaitu sebesar 2 MW.



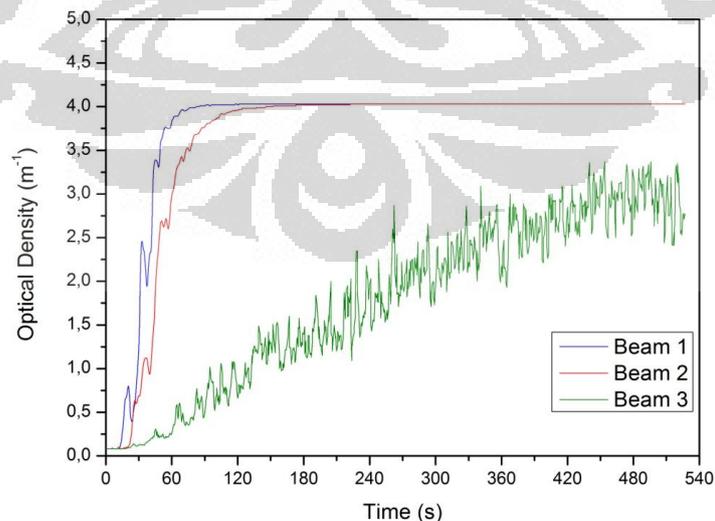
Gambar 4.5 Perbandingan waktu dengan *optical density* saat kapasitas udara 6.6 m³/s dan pintu terbuka 1

Grafik di atas adalah hasil simulasi ruang tangga bertekanan dengan kondisi kapasitas udara 6.6 m³/s saat pintu ruang tangga terbuka 1. Dari hasil grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan kapasitas 6.6 m³/s cukup untuk menghalau asap masuk ke dalam ruang tangga. Sensor *beam 3* menunjukkan bahwa ada sedikit asap yang masuk ke dalam ruang tangga, tetapi hanya berpengaruh sangat sedikit terhadap *optical density* yaitu sekitar 0.1 m⁻¹.



Gambar 4.6 Perbandingan waktu dengan *optical density* saat kapasitas udara $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$ dan pintu terbuka 2

Pada kondisi kedua yaitu dengan kapasitas $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$ dan jumlah pintu yang terbuka adalah 2 terlihat pada grafik di atas. Dalam kondisi ini, banyak aliran udara yang langsung terbang keluar gedung melalui pintu kedua yaitu pintu exit. Sehingga, terjadi ketidakefektifan fungsi ruang tangga bertekanan yang mengakibatkan terjadi perubahan *optical density* yang cukup signifikan pada ruang tangga seperti yang terlihat pada *beam 3*.



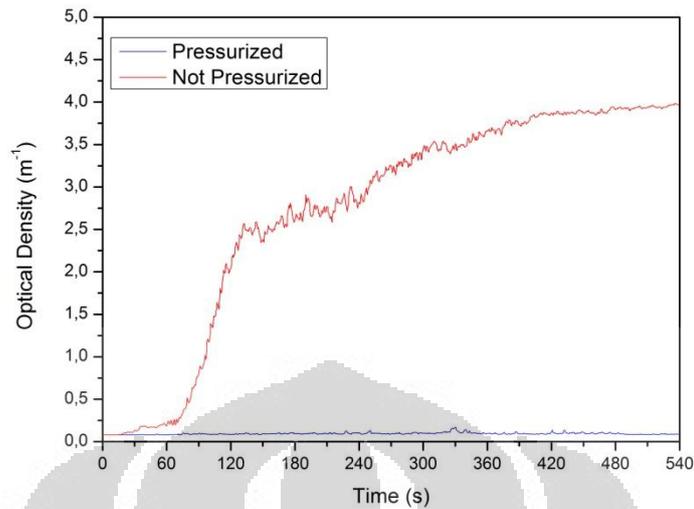
Gambar 4.7 Perbandingan waktu dengan *optical density* saat kapasitas udara $11.5 \text{ m}^3/\text{s}$ dan pintu terbuka 3

Pada kondisi yang terakhir, yaitu pada penggunaan kapasitas udara 11.5 m³/s dengan kondisi jumlah pintu yang terbuka adalah 3. Pada kondisi ini terlihat perubahan yang cepat dan signifikan terhadap ruang tangga bertekanan seperti yang terlihat pada sensor *beam 3*.

Ketiga grafik pada simulasi menggunakan FDS memiliki tren yang sama pada perubahan *optical density* pada ruang pertama dan kedua yaitu terlihat pada sensor *beam 1* dan *beam 2*. Hal tersebut terjadi karena letak sumber nyala api yang menghasilkan asap berada di lantai yang sama dimana *beam 1* dan *beam 2* berada. Sedangkan pada deteksi asap ketiga yaitu pada *beam 3*, dapat terlihat pengaruh jumlah bukaan pintu terhadap tingkat *optical density* asap pada ruang tangga kebakaran. Pada kondisi pintu terbuka 1, kapasitas udara sebesar 6.6 m³/s hampir sepenuhnya berhasil menghalangi asap masuk, hanya sedikit saja asap yang bisa masuk sehingga perubahan *optical density* di dalam ruang tangga hanya sebesar 0,1 m⁻¹. Sedangkan pada kondisi pintu terbuka 2 dan 3 dengan kapasitas sebesar 6.6 m³/s dan 11.5 m³/s asap dapat masuk ke dalam ruang tangga dengan cukup bebas. Keduanya hampir sama, yaitu *optical density* terus berubah secara cepat hingga lebih dari 3 m⁻¹.

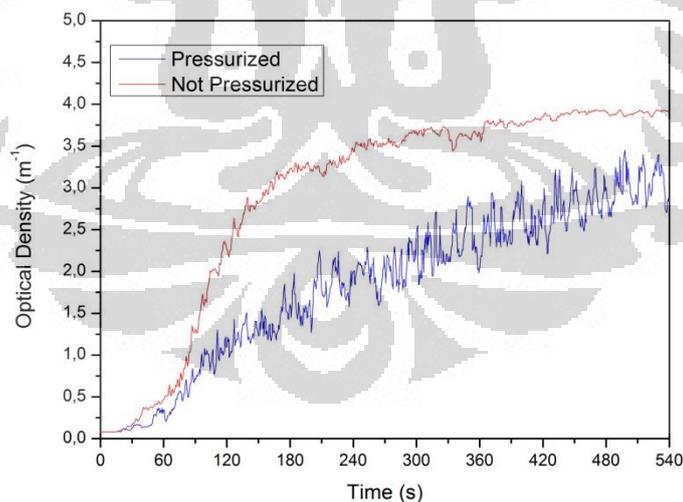
4.1.3 Tingkat Pengaruh Ruang Tangga Tekanan

Pada bagian ini akan dibahas mengenai pengaruh ruang tangga bertekanan terhadap penurunan opasitas asap di dalam ruang tangga kebakaran. Perbandingan yang akan dilakukan adalah perbandingan kondisi saat ruang tangga tidak menggunakan tekanan dan saat menggunakan tekanan.



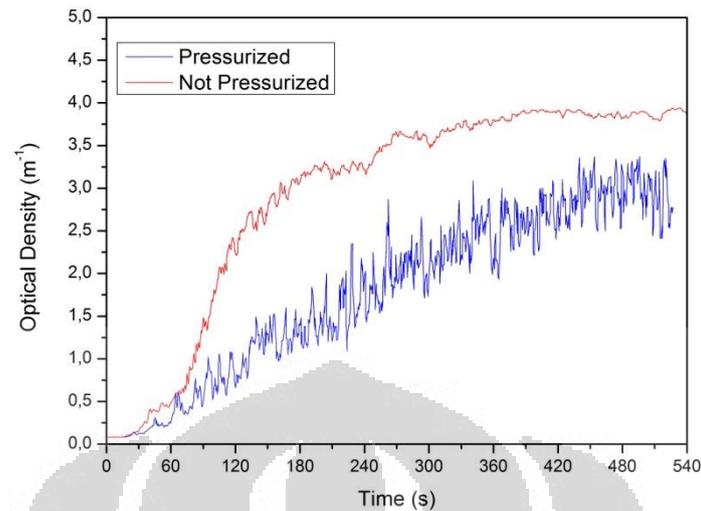
Gambar 4.8 Pengaruh ruang tangga tekanan, kapasitas udara 6.6 m³/s

Pengaruh ruang tangga tekanan pada kondisi pintu terbuka 1 dengan kapasitas udara sebesar 6.6 m³/s sangat terlihat jelas pada Gambar 4.14. Nilai maksimum opasitas asap pada menit ke-4 saat keadaan bertekanan adalah sebesar 0.106, sedangkan pada saat tanpa tekanan sebesar 2.82.



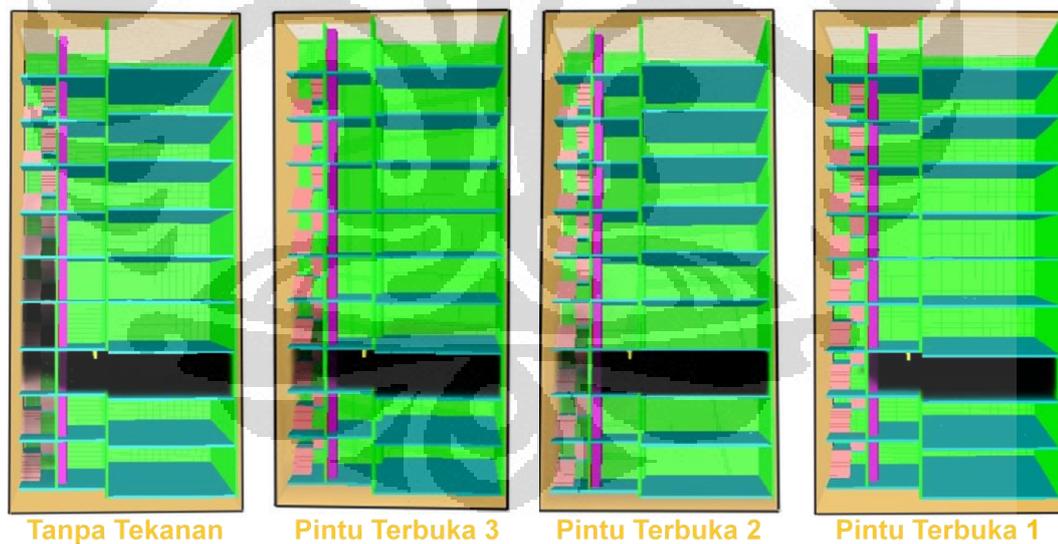
Gambar 4.9 Pengaruh ruang tangga tekanan, kapasitas udara 8.9 m³/s

Pada ruang tangga dengan kapasitas udara sebesar 8.9 m³/s, nilai maksimum opasitas asap pada menit ke-4 saat keadaan bertekanan adalah sebesar 2, sedangkan pada saat tanpa tekanan sebesar 3.45.



Gambar 4.10 Pengaruh ruang tangga tekanan, kapasitas udara 11.5 m³/s

Pada ruang tangga dengan kapasitas udara sebesar 11.5 m³/s, nilai maksimum opasitas asap pada menit ke-4 saat keadaan bertekanan adalah sebesar 1.97, sedangkan pada saat tanpa tekanan sebesar 3.22.



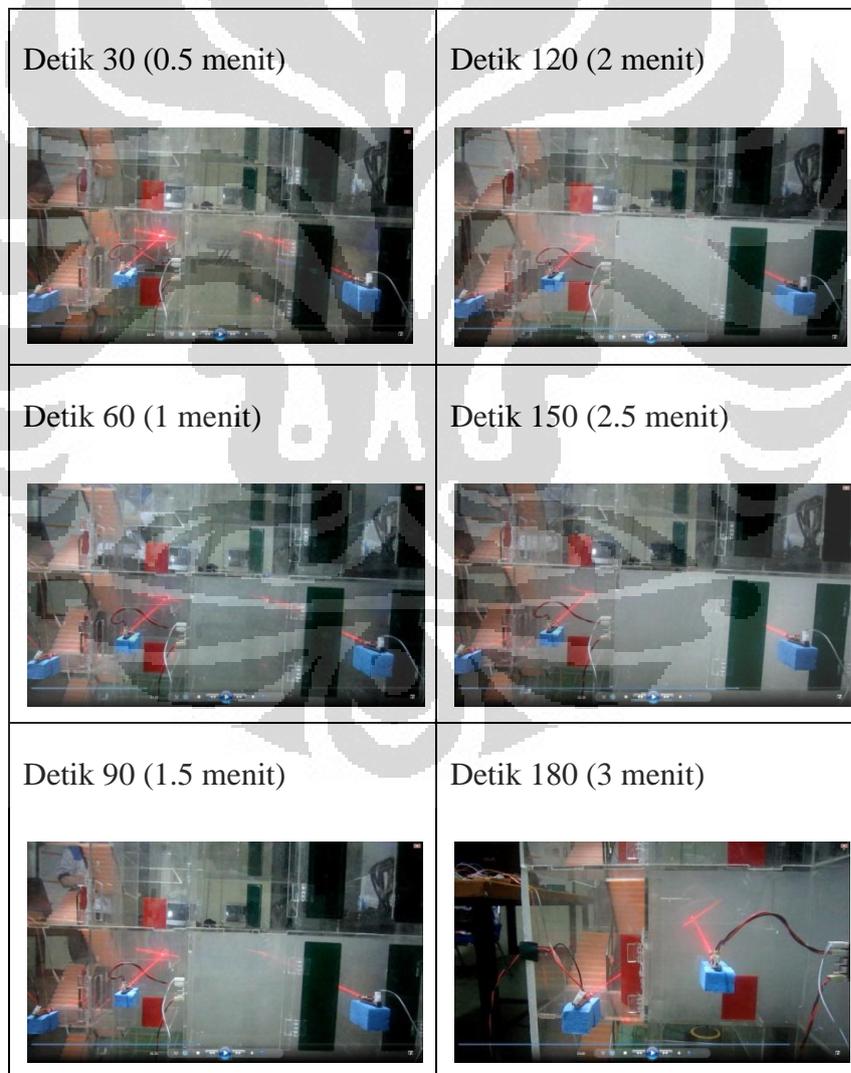
Gambar 4.11 Hasil FDS pengaruh ruang tangga bertekanan

4.2 Hasil dan Analisa Eksperimen

Berikut adalah data-data dan analisa pengaruh tekanan ruang tangga kebakaran terhadap opasitas asap. Penyajian data yang diperoleh akan digambarkan dalam bentuk grafik.

4.2.1 Analisa Data Saat Kondisi Ruang Tangga Tanpa Tekanan

Sumber asap pada eksperimen adalah hasil dari pembakaran 1 gram kertas yang dipanaskan menggunakan solder. Opasitas asap akan diukur dari 3 titik utama yang akan memperlihatkan pergerakan asap dari dekat sumber asap hingga mencapai ruang tangga kebakaran. Peletakan ketiga sensor *beam* akan diberikan sejajar pada lantai 3 dengan ketinggian 0.5 m tepat berada di tengah lantai 3 pada model, peletakan berdasarkan sumbu x,y,z dapat dilihat pada Tabel 3.1. Aktivasi sensor *beam* akan dilakukan pada saat asap sudah mulai terlihat atau terbaca pada sensor *beam*, hal tersebut dilakukan untuk menyesuaikan kondisi bahwa HRR kertas ini adalah konstan pada angka 3.4 kW.



Gambar 4.12 Perubahan opasitas asap pada ruang tangga tanpa tekanan

Pada Gambar 4.1 terlihat perubahan densitas asap melalui cahaya sensor *beam* yang semakin terlihat. Pada saat 30 detik pertama sensor *beam* 1 dan dua sudah mulai terlihat jelas, sementara sensor *beam* 3 pada ruang tangga masih belum terlihat. Kemudian, pada saat mencapai menit pertama, sensor *beam* 3 sudah mulai terlihat samar. Pada saat waktu menunjukkan 1.5 menit, jendela yang berada di seberang sensor *beam* 1 sudah tidak terlihat, menandakan kerapatan asap sudah sangat tinggi. Selanjutnya, pada sensor *beam* 1 sudah semakin jelas, terlihat yang memperlihatkan bahwa tanpa tekanan pada ruang tangga terjadi peningkatan opasitas asap para ruang tangga karenadengan pintu yang terbuka maka asap bebas masuk setelah melewati *smoke barrier* yang berada sebelum sensor *beam* 2.

Dalam suatu sistem, apabila terdapat dua jenis fluida yang berdekatan di mana terjadi perbedaan massa jenis maka gaya apung akan sangat berpengaruh pada fluida tersebut. Fluida dengan massa jenis yang lebih rendah akan mengapung pada keadaan lingkungan sekitarnya di mana terdapat fluida yang memiliki massa jenis yang lebih besar. Besaran relatif yang terjadi antara dua gaya yang merupakan rasio gaya apung dengan drag viskositas dinyatakan dalam bilangan Grashof [8], yaitu:

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_0 - \rho)}{\rho v^2} = \frac{gl^3\beta\Delta T}{v^2}$$

Bilangan Grashof merupakan rasio antara gaya *buoyancy* dengan hambatan karena pengaruh massa jenis fluida. Pada suatu aliran asap, bilangan Grashof menentukan tipe dari aliran asap tersebut.

Nilai opasitas didapatkan dengan cara melakukan pengukuran intensitas cahaya dari suatu *beam* yang diakibatkan oleh lewatnya partikel asap dengan nilai I_0 dan I_x . Hubungan antara I_0 dan I_x yang dijelaskan pada bouger's Law berguna untuk menghitung besarnya nilai *optical density* asap [8]:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_x} \right) = KL$$

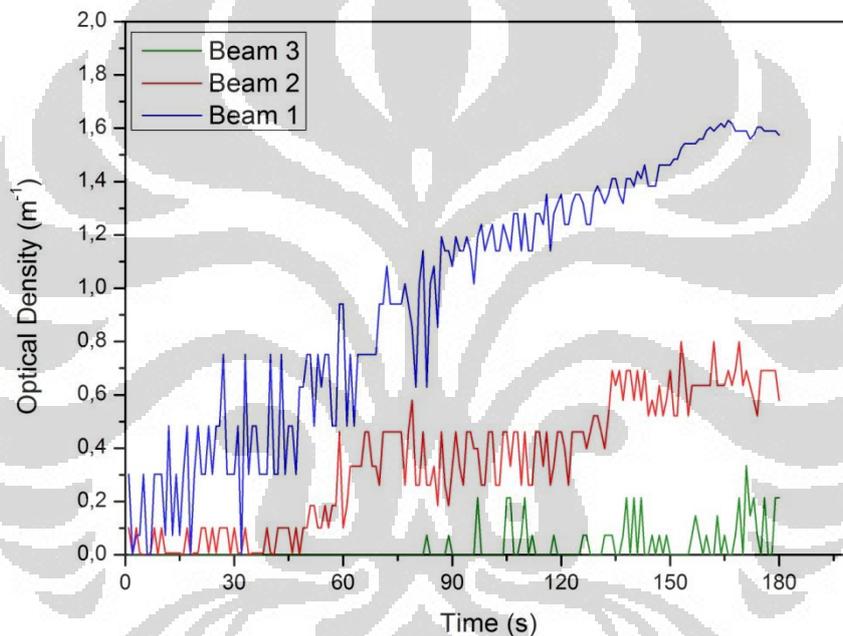
Untuk mengetahui besarnya nilai transmisi cahaya serta opasitas asap yang melewati cahaya dapat diketahui dengan persamaan:

$$T = \frac{I_x}{I_0} = 1 - \frac{N}{100}$$

Maka dari dua persamaan tersebut didapatkan nilai *optical density* dari suatu asap, yaitu:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Dari hasil penelitian didapatkan data yang menghasilkan grafik *optical density* dengan kondisi tanpa tekanan pada ruang tangga kebakaran:



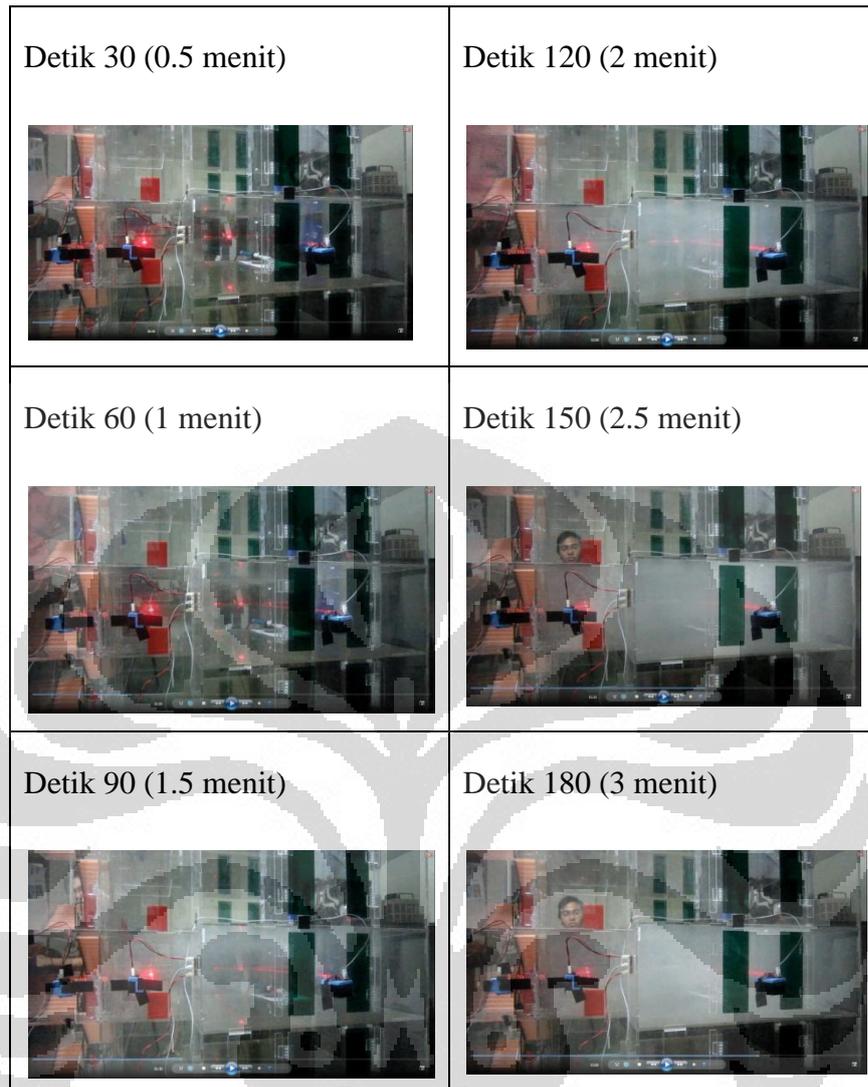
Gambar 4.13 Data opasitas pada ruang tangga tanpa tekanan, HRR 3.4 kW

Seperti halnya pada gambar hasil dari video, pada grafik dari hasil eksperimen dapat terlihat bahwa pada ruang dengan sensor beam memiliki *optical density* yang paling tinggi mencapai 1.6 m^{-1} karena asap hampir menutupi keseluruhan sinar sensor *beam* 1. Pada sensor *beam* 2 juga jelas terlihat bahwa opasitas asap di area tersebut cukup tebal mencapai 0.8 m^{-1} yang pada gambar terlihat mencapai setengah kerapatan dari area sensor *beam* 1. Tidak adanya penggunaan tekanan pd ruang tangga menyebabkan asap mampu memasuki ruang tangga yang terdeteksi oleh sensor *beam* 3. Setelah detik ke 70 atau setelah 1

menit terdeteksi adanya asap yang memasuki ruang tangga sekitar 0.3 m^{-1} saja yang terdeteksi

4.2.2 Pengambilan Data Saat Kondisi Ruang Tangga Bertekanan

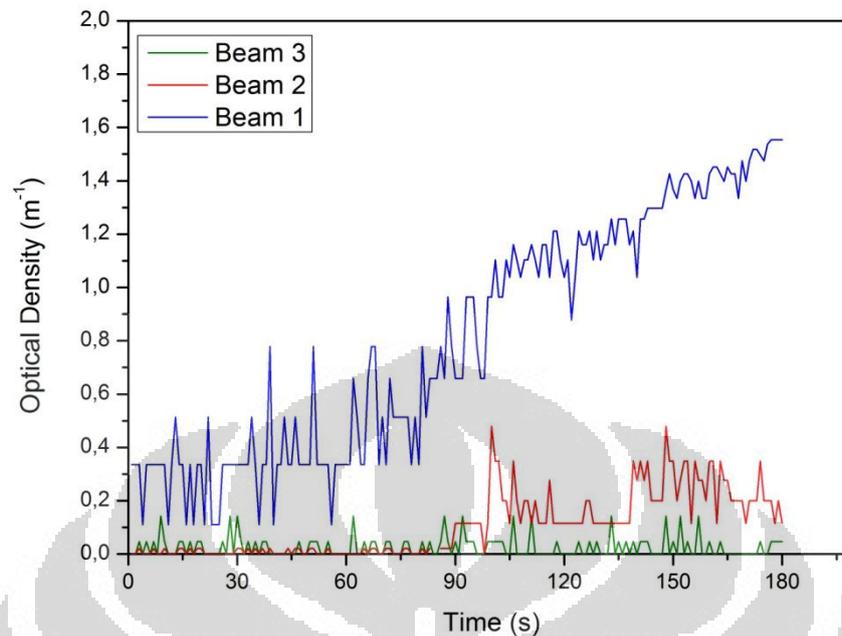
Pada eksperimen kedua ini akan dilakukan dengan parameter yang sama seperti pada eksperimen pertama. Namun, kondisi yang diberikan berbeda, yaitu ruang tangga akan diberikan tekanan melalui penggunaan fan sentrifugal yang berada di atas model gedung bertingkat tinggi. Sistem injeksi yang digunakan untuk memberikan tekanan pada ruang tangga adalah *multiple injection* yang berada disamping setiap pintu ruang tangga. Kapasitas udara yang diberikan melalui fan tersebut adalah $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$. Seperti pada eksperimen ruang tangga tanpa tekanan, sumber asap pada eksperimen dengan presurisasi adalah hasil dari pembakaran 1 gram kertas yang dipanaskan menggunakan solder. Opasitas asap akan diukur dari 3 titik utama yang akan memperlihatkan pergerakan asap dari dekat sumber asap hingga mencapai ruang tangga kebakaran. Peletakan ketiga sensor *beam* akan diberikan sejajar pada lantai 3 dengan ketinggian 0.5 m tepat berada di tengah lantai 3 pada model, peletakan berdasarkan sumbu x,y,z dapat dilihat pada Tabel 3.1. Aktivasi sensor *beam* akan dilakukan pada saat asap sudah mulai terlihat atau terbaca pada sensor *beam*, hal tersebut dilakukan untuk menyesuaikan kondisi bahwa HRR kertas ini adalah konstan pada angka 3.4 kW. Berikut ini adalah analisis gambar dan grafik hasil dari eksperimen ruang tangga kebakaran pada model gedung bertingkat tinggi dengan tekanan.



Gambar 4.14 Perubahan opasitas asap pada ruang tangga dengan tekanan HRR 3.4 kW

Pemberian pasokan udara sebesar 0.0016 cukup berpengaruh dalam menurunkan tingkat opasitas asap. Secara kasat mata intensitas asap baru mulai terlihat jelas pada memasuki detik ke 90, berbeda dengan ruang tangga tanpa tekanan saat memasuki detik ke 60 asap sudah mulai terlihat pekat. Kemudian, yang paling signifikan adalah tidak terlihatnya asap pada ruang tangga kebakaran, walaupun terlihat secara samar warna merah sensor *beam 3*.

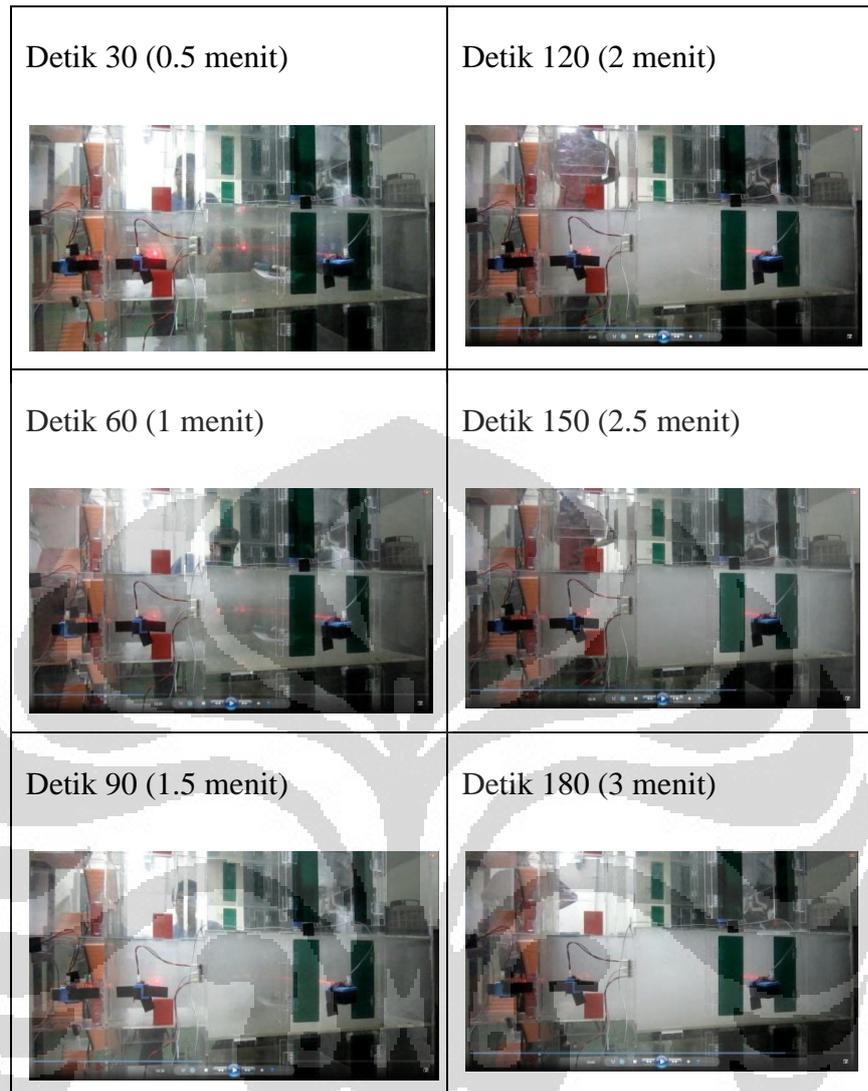
Dari hasil data penelitian pada kondisi ruang tangga kebakaran dengan tekanan dihasilkan grafik *optical density* sebagai berikut:



Gambar 4.15 Data opasitas pada ruang tangga tekanan, HRR 3.4 kW

Dari grafik di atas dapat dianalisis bahwa pengaruh tekanan yang diberikan melalui pasokan udara dari fan, mampu menurunkan tingkat opasitas asap terutama di bagian ruang tangga kebakaran dan ruang dimana *smoke barrier* berada atau pada posisi sensor *beam 3* dan *2* diletakan. Pada sensor *beam* nilai opasitasnya turun 0.1 menjadi maksimum 1.5 m⁻¹. Sedangkan pada *beam 2*, nilai maksimumnya turun secara signifikan sebesar 0.4 menjadi 0.4 m⁻¹. Terakhir adalah pada sensor *beam 3* dari detik pertama terdeteksi opasitas asap, kemungkinan besar adalah sisa-sisa dari eksperimen pertama yang belum sepenuhnya menghilang. Namun, nilai maksimum pada ruang tangga pun sangat rendah hanya 0.1 m⁻¹ saja.

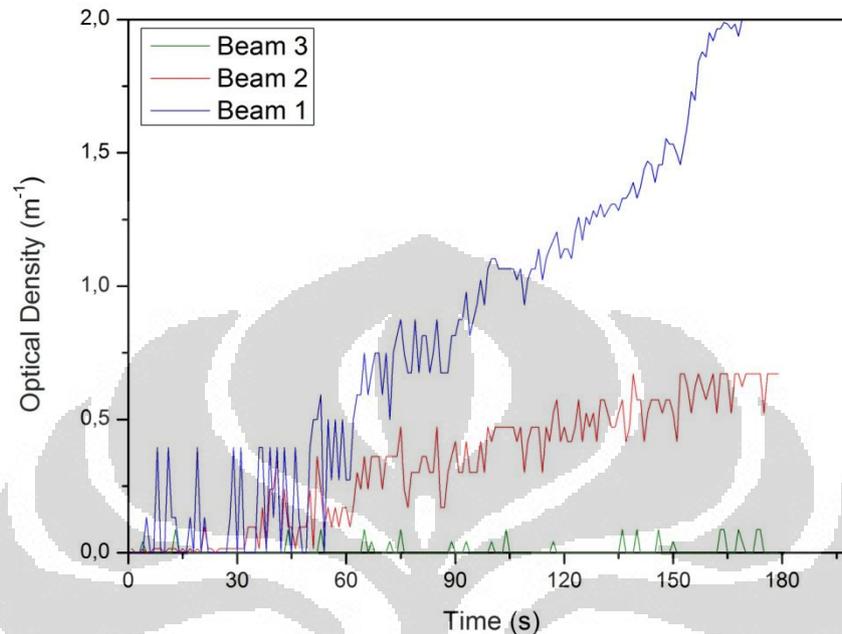
Selanjutnya adalah dilakukan peningkatan *heat release rate* pada sumber api penghasil asap dari 3.4 kW menjadi 6.8 kW pada kondisi ruang tangga kebakaran bertekanan dengan suplai udara sebesar 0.0016 m³/s.



Gambar 4.16 Perubahan opasitas asap pada ruang tangga dengan tekanan HRR 6.8 kW

Pada ruang tangga bertekanan dengan HRR lebih besar dua kali lipat dari pada yang sebelumnya, memperlihatkan perubahan opasitas asap yang cukup signifikan. Hingga detik ke 60 terlihat perubahan lebih kecil dari pada pada saat ruang tangga tidak diberikan tekanan melalui suplai udara. Namun, mulai detik ke 90 dan selanjutnya asap terlihat jauh lebih pekat dari pada saat ruang tangga tanpa tekanan dikarenakan HRR yang lebih besar dua kali lipat dibandingkan sebelumnya. Yang patut diperhatikan adalah sampai akhir terlihat jelas tidak adanya asap yang memasuki ruang tangga kebakaran walaupun memiliki HRR yang lebih besar.

Selanjutnya akan dilihat berdasarkan analisis dari grafik hasil dari eksperimen, sebagai berikut:



Gambar 4.17 Data opasitas pada ruang tangga tekanan, HRR 6.8 kW

Pada eksperimen ruang tangga menggunakan tekanan dengan HRR yang lebih besar terlihat pergejolan pada awal eksperimen dikarenakan produksi asap yang cukup besar dari awal tetapi belum memenuhi ruangan pada sensor *beam* 1, sehingga terbaca secara fluktuatif pada sensor *beam* tersebut.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap opasitas asap di gedung bertingkat tinggi adalah sebagai berikut:

1. Pemberian tekanan pada ruang tangga melalui suplai udara memiliki grafik dengan tren yang sama saat dibandingkan antara hasil eksperimen dan simulasi walaupun dengan beberapa penyesuaian yang sudah dilakukan.
2. Desain gedung bertingkat tinggi dengan ukuran aktual dengan mesh yang besar turut berperan dalam lamanya *computing time*.
3. Pengaktifan tekanan dengan suplai udara pada ruang tangga kebakaran dapat menurunkan tingkat densitas dengan kisaran $0.1-0.4 \text{ m}^{-1}$.
4. Peletakan tiga sensor *beam* pada setiap bagian gedung sangat membantu untuk melihat perubahan opasitas asap. Sehingga dapat dianalisis perbedaan antara ruang tangga kebakaran dengan dan tanpa tekanan.
5. Sistem ruang tangga kebakaran terbukti menurunkan tingkat opasitas asap, sehingga dapat diaplikasikan untuk mencegah asap kebakaran memasuki ruang tangga kebakaran.

5.2 Saran

Penelitian pengaruh tekanan pada ruang tangga kebakaran terhadap opasitas asap di gedung bertingkat tinggi perlu dikaji dan diteliti lebih lanjut untuk mendapatkan sistem yang lebih efektif dan ideal, berikut adalah saran untuk penelitian lebih lanjut:

1. Mengkaji desain gedung lebih menyeluruh, termasuk mempertimbangkan berbagai faktor yang mempengaruhi penggunaan tangga presurisasi pada gedung bertingkat tinggi.
2. Meningkatkan analisa terhadap *high rised building* yang memiliki ketinggian ratusan meter di atas permukaan tanah.
3. Mengkombinasikan penggunaan *smoke stop lobby* sebagai salah satu sistem proteksi asap sebelum memasuki ruang tangga kebakaran.
4. Melakukan variasi terhadap posisi fan pensuplai udara dan juga sistem injeksi untuk suplai udara itu sendiri.
5. Melakukan pengujian secara aktual yaitu dilakukan pada gedung bertingkat tinggi yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Nugroho, Yulianto (2009). *Compartment Fire*. Depok: Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [2] Suprpto, 1992, Sistem Proteksi Kebakaran pada Bangunan Gedung, Lembaga Pengabdian pada Masyarakat, Institut Teknologi Bandung-PT.Jaya Teknik Indonesia, Jakarta, hlm.30.
- [3] SNI 03-6571-2001, Sistem Pengendalian Asap Kebakaran pada Bangunan Gedung, 2001
- [4] Direktorat Jendral Cipta Karya. (2008). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No: 26/PRT/M/2008 Tanggal 30 Desember 2008 Tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi Kebakaran pada Bangunan Gedung dan Lingkungan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- [5] McGrattan, K., et al., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide*, National Institute of Standards and Technology, USA, 2007.
- [6] Quintiere, G.J. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. England: John Willey & Sons.
- [7] Mulholland, G.W., *Smoke Production and Properties*, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 2/Chapter 13, 3rd Edition, 2002
- [8] Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, John Wiley & Sons, 2003
- [9] Mulholland, G.W., *Smoke Production and Properties*, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 2/Chapter 13, 3rd Edition, 2002
- [10] Klote, J.D., *Smoke Control*, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 4/Chapter 12, 3rd Edition, 2002
- [11] McGrattan, Kevin. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. USA: National Institute of Technology

- [12] McGrattan, Kevin (2007). *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide*. USA: National Institute of Technology
- [13] Ingason, Haukur (2007). *Model Scale Railcar Fire Tests*. Science Direct, Fire Safety Journal. Swedish: National Testing and Research Institute
- [14] Thomas, P.H. *Movement of Smoke in Horizontal Corridors Against an Airflow*. Institution of Fire Engineers Vol. 30 No. 72, 1970
- [15] Wild, J.A. *Smoke Control by Pressurization*. Fans in Fire Safety, Flakt Woods Limited, Third Edition, 1998
- [16] Hobson, P.J. and Stewart, L.J, *Pressurisation of Escape Routes in Buildings*, Fire Research Note 958 Desember, 1977
- [17] Sungkar, Ali Abdurrahman dkk (2012). *Development of Smoke Venting by Stairwell and Passage Pressurisation System for Demonstration Apparatus*. Depok: Mechanical Department University of Indonesia
- [18] “Gambar akrilik lembaran” <http://autochemindustry.com> (diakses pada tanggal 22 Juni 2012)
- [19] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 36 Tahun 2005, Peraturan Pelaksanaan Undang-undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, 2005
- [20] NFPA 101 *Life Safety Code, Technical/Substantive Change, 3.3.28.7 Page 1, 2003 Edition to 2006 Edition*
- [21] Kohno, Mamoru. 2007. *High-Rise Building Fires*. Building Department, National Institute for Land and Infrastructure Management.
- [22] SNI 03-1746-2000, Tata Cara Perencanaan dan Pemasangan Sarana Jalan ke Luar untuk Penyelamatan Terhadap Bahaya Kebakaran pada Bangunan Gedung, 2000

LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengkodean pada FDS fan 8.9 m³/s, pintu terbuka 2

```
&TIME T_END=600.00/
&DUMP DT_RESTART=300.00/

&MESH ID='Final', IJK=60,80,180, XB=5.50,19.50,16.50,34.50,0.00,41.50/

&DEVC ID='Beam 1', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=6.25,18.75,25.00,25.00,10.80,10.80/
&DEVC ID='Beam 2', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=9.00,16.00,22.00,22.00,10.80,10.80/
&DEVC ID='Beam 3', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=9.00,16.00,19.20,19.20,10.80,10.80/
&DEVC ID='THCP 1.1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,25.00,10.80/
&DEVC ID='THCP 1.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,25.00,11.80/
&DEVC ID='THCP 1.3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,25.00,12.80/
&DEVC ID='THCP 2.1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,22.00,10.80/
&DEVC ID='THCP 2.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,22.00,11.80/
&DEVC ID='THCP 2.3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,22.00,12.80/
&DEVC ID='THCP 3.1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,19.20,10.80/
&DEVC ID='THCP 3.2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,19.20,11.80/
&DEVC ID='THCP 3.3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.20,19.20,12.80/
&DEVC ID='Velocity Dalam Tangga 1', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=15.20,19.20,10.20/
&DEVC ID='Velocity Dalam Tangga 2', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=15.20,19.20,11.20/
&DEVC ID='Velocity Dalam Tangga 3', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=15.20,19.20,12.20/
&DEVC ID='Velocity Luar Tangga 1', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=15.20,21.20,10.20/
&DEVC ID='Velocity Luar Tangga 2', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=15.20,21.20,11.20/
&DEVC ID='Velocity Luar Tangga 3', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=15.20,21.20,12.20/
&MATL ID='CONCRETE',
  FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',
  SPECIFIC_HEAT=1.04,
  CONDUCTIVITY=1.80,
  DENSITY=2.2800000E003/
&MATL ID='GYPSUM PLASTER',
  FYI='Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation',
  SPECIFIC_HEAT=0.84,
  CONDUCTIVITY=0.4800,
  DENSITY=1.4400000E003/
&MATL ID='STEEL',
  FYI='Drysedale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',
  SPECIFIC_HEAT=0.4600,
  CONDUCTIVITY=45.80,
  DENSITY=7.8500000E003,
  EMISSIVITY=0.95/

&SURF ID='Concrete',
  COLOR='GREEN',
  BURN_AWAY=.TRUE.,
  MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
  THICKNESS(1)=0.2000/
&SURF ID='Burner',
```

```

COLOR='RED',
HRRPUA=3.4550000E003/
&SURF ID='Gypsum Plaster',
COLOR='GRAY 80',
MATL_ID(1,1)='GYPSUM PLASTER',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.2000/
&SURF ID='Steel',
RGB=146,202,166,
MATL_ID(1,1)='STEEL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.2000/
&SURF ID='Vent',
RGB=26,204,26,
VOLUME_FLUX=-8.81/

&OBST XB=6.05,6.25,24.00,34.20,1.00,41.20, RGB=0,255,0, TRANSPARENCY=0.80,
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ Kiri Ruangan
&OBST XB=18.75,18.95,24.00,34.20,1.00,41.20, COLOR='INVISIBLE',
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ Kanan Ruangan
&OBST XB=6.05,18.75,34.00,34.20,1.00,41.20, RGB=0,255,0, TRANSPARENCY=0.80,
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ Belakang Ruangan
&OBST XB=16.00,18.75,24.00,24.20,1.00,41.20, RGB=0,255,0, TRANSPARENCY=0.60,
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ Sela Kanan
&OBST XB=6.05,9.00,24.00,24.20,1.00,41.20, RGB=0,255,0, TRANSPARENCY=0.80,
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ Sela Kiri
&OBST XB=15.95,16.20,20.20,24.00,1.00,41.20, COLOR='INVISIBLE',
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ kanan ruang tangga 1
&OBST XB=8.80,9.00,17.00,24.20,1.00,41.20, RGB=0,255,0, TRANSPARENCY=0.80,
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ kiri ruang tangga
&OBST XB=9.00,16.00,17.00,17.20,1.00,41.20, COLOR='INVISIBLE',
PERMIT_HOLE=.FALSE., THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ depan ruang tangga
&OBST XB=9.00,16.00,19.95,20.20,1.00,41.20, THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/
pembatas ruangan & ruang tangga
&OBST XB=15.95,16.20,17.00,20.20,1.00,41.20, COLOR='INVISIBLE', THICKEN=.TRUE.,
SURF_ID='Concrete'/ Kanan ruang tangga 2
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,1.00,1.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 1
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,5.00,5.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 2
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,9.00,9.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 3
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,13.00,13.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 4
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,17.00,17.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 5
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,21.00,21.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 6
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,25.00,25.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 7
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,29.00,29.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 8
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,33.00,33.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 9
&OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,37.00,37.20, RGB=0,153,153, SURF_ID='Concrete'/ 10
&OBST XB=9.00,16.00,17.00,24.20,1.00,1.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
SURF_ID='Concrete'/ Lantai Dasar
&OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,5.00,5.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
SURF_ID='Concrete'/ 2
&OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,9.00,9.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
SURF_ID='Concrete'/ 3
&OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,13.00,13.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
SURF_ID='Concrete'/ 4
&OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,17.00,17.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
SURF_ID='Concrete'/ 5

```

&OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,21.00,21.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,25.00,25.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,29.00,29.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,33.00,33.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=9.00,16.00,20.50,24.20,37.00,37.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,5.00,5.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,9.00,9.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[1]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,13.00,13.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[2]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,17.00,17.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[3]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,21.00,21.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[4]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,25.00,25.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[5]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,29.00,29.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[6]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,33.00,33.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[7]
 &OBST XB=13.50,16.00,17.00,20.00,37.00,37.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[8]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,3.00,3.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,7.00,7.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[1]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,11.00,11.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[2]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,15.00,15.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[3]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,19.00,19.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[4]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,23.00,23.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[5]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,27.00,27.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[6]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,31.00,31.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[7]
 &OBST XB=9.00,11.50,17.00,20.00,35.00,35.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1[8]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,5.00,5.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,9.00,9.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[1]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,13.00,13.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[2]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,17.00,17.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[3]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,21.00,21.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[4]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,25.00,25.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[5]

&OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,29.00,29.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[6]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,33.00,33.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[7]
 &OBST XB=14.50,16.00,20.00,20.50,37.00,37.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[8]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,5.00,5.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,9.00,9.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[1]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,13.00,13.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[2]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,17.00,17.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[3]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,21.00,21.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[4]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,25.00,25.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[5]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,29.00,29.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[6]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,33.00,33.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[7]
 &OBST XB=9.00,13.30,20.20,20.50,37.00,37.20, RGB=0,153,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2[8]
 &OBST XB=7.00,7.40,29.50,29.77,9.20,9.50, PERMIT_HOLE=.FALSE., SURF_ID='Burner'/
 Burner
 &OBST XB=13.30,14.50,20.50,20.70,1.20,41.00, RGB=153,0,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ depan
 &OBST XB=13.30,13.50,20.20,20.50,1.20,41.00, RGB=153,0,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ Kanan
 &OBST XB=14.30,14.50,20.20,20.50,1.20,41.00, RGB=153,0,153, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ Obstruction
 &OBST XB=9.00,16.00,20.20,24.20,41.00,41.20, RGB=240,240,240,
 TRANSPARENCY=0.2000, THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=6.25,18.75,24.20,34.00,41.00,41.20, RGB=240,240,240,
 TRANSPARENCY=0.2000, THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=9.00,16.00,17.00,20.00,41.00,41.20, RGB=240,240,240,
 TRANSPARENCY=0.2000, THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.30,16.00,23.00,23.20,12.20,13.00, COLOR='YELLOW', THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Gypsum Plaster'/ 1
 &OBST XB=12.10,12.30,20.20,23.20,12.20,13.00, COLOR='YELLOW', THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Gypsum Plaster'/ 2
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,1.21,3.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,5.21,7.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[1]
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,13.21,15.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[3]
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,17.21,19.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[4]
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,21.21,23.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[5]
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,25.21,27.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[6]
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,29.21,31.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[7]
 &OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,33.21,35.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[8]

&OBST XB=14.80,15.60,19.95,20.20,37.21,39.20, COLOR='RED', PERMIT_HOLE=.FALSE.,
 THICKEN=.TRUE., SURF_ID='Steel'/ 1[9]
 &OBST XB=13.50,14.30,20.20,20.50,40.70,41.00, COLOR='BLUE', THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='INERT'/ Obstruction
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,1.20,1.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,1.40,1.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,1.60,1.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,1.80,2.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,2.00,2.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,2.20,2.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,2.40,2.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,2.60,2.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,2.80,3.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,3.00,3.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,3.20,3.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,3.40,3.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,3.60,3.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,3.80,4.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,4.00,4.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,4.20,4.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,4.40,4.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,4.60,4.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,4.80,5.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,5.00,5.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,5.20,5.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,5.40,5.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,5.60,5.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,5.80,6.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,6.00,6.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,6.20,6.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,6.40,6.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7

&OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,6.60,6.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,6.80,7.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,7.00,7.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,7.20,7.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,7.40,7.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,7.60,7.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,7.80,8.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,8.00,8.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,8.20,8.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,8.40,8.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,8.60,8.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,8.80,9.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,9.00,9.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,9.20,9.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,9.40,9.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,9.60,9.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,9.80,10.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,10.00,10.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,10.20,10.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,10.40,10.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,10.60,10.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,10.80,11.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,11.00,11.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,11.20,11.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,11.40,11.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,11.60,11.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,11.80,12.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,12.00,12.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,12.20,12.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6

&OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,12.40,12.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,12.60,12.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,12.80,13.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,13.00,13.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,13.20,13.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,13.40,13.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,13.60,13.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,13.80,14.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,14.00,14.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,14.20,14.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,14.40,14.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,14.60,14.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,14.80,15.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,15.00,15.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,15.20,15.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,15.40,15.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,15.60,15.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,15.80,16.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,16.00,16.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,16.20,16.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,16.40,16.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,16.60,16.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,16.80,17.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,17.00,17.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,17.20,17.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,17.40,17.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,17.60,17.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,17.80,18.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,18.00,18.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5

&OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,18.20,18.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,18.40,18.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,18.60,18.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,18.80,19.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,19.00,19.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,19.20,19.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,19.40,19.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,19.60,19.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,19.80,20.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,20.00,20.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,20.20,20.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,20.40,20.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,20.60,20.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,20.80,21.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,21.00,21.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,21.20,21.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,21.40,21.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,21.60,21.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,21.80,22.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,22.00,22.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,22.20,22.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,22.40,22.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,22.60,22.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,22.80,23.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,23.00,23.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,23.20,23.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,23.40,23.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,23.60,23.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,23.80,24.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4

&OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,24.00,24.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,24.20,24.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,24.40,24.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,24.60,24.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,24.80,25.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,25.00,25.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,25.20,25.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,25.40,25.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,25.60,25.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,25.80,26.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,26.00,26.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,26.20,26.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,26.40,26.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,26.60,26.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,26.80,27.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,27.00,27.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,27.20,27.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,27.40,27.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,27.60,27.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,27.80,28.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,28.00,28.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,28.20,28.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,28.40,28.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,28.60,28.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,28.80,29.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,29.00,29.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,29.20,29.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,29.40,29.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,29.60,29.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3

&OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,29.80,30.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,30.00,30.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,30.20,30.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,30.40,30.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,30.60,30.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,30.80,31.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,31.00,31.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,31.20,31.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,31.40,31.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,31.60,31.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,31.80,32.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,32.00,32.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,32.20,32.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,32.40,32.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,32.60,32.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,32.80,33.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,33.00,33.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=13.30,13.50,17.00,18.50,33.20,33.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=13.10,13.30,17.00,18.50,33.40,33.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2
 &OBST XB=12.90,13.10,17.00,18.50,33.60,33.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.70,12.90,17.00,18.50,33.80,34.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.50,12.70,17.00,18.50,34.00,34.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.30,12.50,17.00,18.50,34.20,34.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.10,12.30,17.00,18.50,34.40,34.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=11.90,12.10,17.00,18.50,34.60,34.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=11.70,11.90,17.00,18.50,34.80,35.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=11.50,11.70,17.00,18.50,35.00,35.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10
 &OBST XB=11.50,11.70,18.50,20.00,35.20,35.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 1
 &OBST XB=11.70,11.90,18.50,20.00,35.40,35.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 2

&OBST XB=11.90,12.10,18.50,20.00,35.60,35.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 3
 &OBST XB=12.10,12.30,18.50,20.00,35.80,36.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 4
 &OBST XB=12.30,12.50,18.50,20.00,36.00,36.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 5
 &OBST XB=12.50,12.70,18.50,20.00,36.20,36.40, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 6
 &OBST XB=12.70,12.90,18.50,20.00,36.40,36.60, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 7
 &OBST XB=12.90,13.10,18.50,20.00,36.60,36.80, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 8
 &OBST XB=13.10,13.30,18.50,20.00,36.80,37.00, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 9
 &OBST XB=13.30,13.50,18.50,20.00,37.00,37.20, RGB=255,102,102, THICKEN=.TRUE.,
 SURF_ID='Concrete'/ 10

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,2.800000E000,3.200000E000, COLOR='INVISIBLE'/ 1

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,6.800000E000,7.200000E000, COLOR='INVISIBLE'/ 1[1]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,1.080000E001,1.120000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[2]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,1.480000E001,1.520000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[3]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,1.880000E001,1.920000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[4]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,2.280000E001,2.320000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[5]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,2.680000E001,2.720000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[6]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,3.080000E001,3.120000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[7]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,3.480000E001,3.520000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[8]

&HOLE

XB=1.350000E001,1.430000E001,1.995000E001,2.020000E001,3.880000E001,3.920000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[9]

&HOLE

XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,1.200000E000,3.200000E000, COLOR='INVISIBLE'/ 1

&HOLE

XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,5.200000E000,7.200000E000, COLOR='INVISIBLE'/ 1[1]

&HOLE

XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,9.200000E000,1.120000E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[2]

```

&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,1.320000E001,1.520000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[3]
&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,1.720000E001,1.920000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[4]
&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,2.120000E001,2.320000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[5]
&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,2.520000E001,2.720000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[6]
&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,2.920000E001,3.120000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[7]
&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,3.320000E001,3.520000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[8]
&HOLE
XB=1.480000E001,1.560000E001,1.995000E001,2.020000E001,3.720000E001,3.920000
E001, COLOR='INVISIBLE'/ 1[9]
&HOLE
XB=1.595000E001,1.620000E001,1.725000E001,1.825000E001,1.200000E000,3.200000
E000, COLOR='RED'/ Exit

&VENT SURF_ID='Vent', XB=13.50,14.30,20.20,20.50,40.70,40.70, IOR=-3, COLOR='BLUE'/
Vent

&SLCF QUANTITY='W-VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=13.90/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', VECTOR=.TRUE., PBX=15.20/
&SLCF QUANTITY='W-VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=15.20/
&SLCF QUANTITY='THERMOCOUPLE', VECTOR=.TRUE., PBX=15.50/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=18.25/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBX=28.50/

```