



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN PENGARUH SISTEM TIRAI KABUT AIR
TERHADAP DENSITAS ASAP DAN DISTRIBUSI
TEMPERATUR PADA KEBAKARAN KOMPARTEMEN**

SKRIPSI

**HENDRA GUNAWAN SUSANTO
0706267074**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN PENGARUH SISTEM TIRAI KABUT AIR
TERHADAP DENSITAS ASAP DAN DISTRIBUSI
TEMPERATUR PADA KEBAKARAN KOMPARTEMEN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**HENDRA GUNAWAN SUSANTO
0706267074**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2011**

i

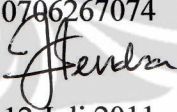
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PEMODELAN PENGARUH SISTEM TIRAI KABUT AIR TERHADAP DENSITAS ASAP DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA KEBAKARAN KOMPARTEMEN

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

Skripsi ini merupakan bagian dari skripsi yang dikerjakan bersama dengan rekan saya saudara Arian Dwi Putra (0706266903) sehingga harap maklum jika terdapat beberapa bagian dari buku ini yang memiliki kesamaan.

Nama : Hendra Gunawan Susanto
NPM : 0706267074
Tanda Tangan : 
Tanggal : 12 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Hendra Gunawan Susanto

NPM : 0706267074

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi :

PEMODELAN PENGARUH SISTEM TIRAI KABUT AIR TERHADAP DENSITAS ASAP DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA KEBAKARAN KOMPARTEMEN

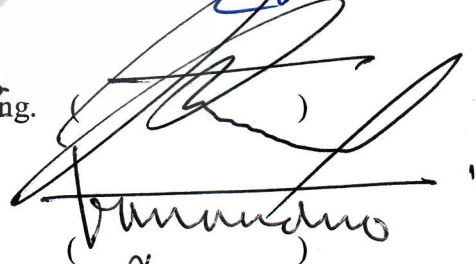
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

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

()

Penguji 1 : Prof. Dr. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.Eng.

()

Penguji 2 : Dr. Ir. Danardono A.S.

()

Penguji 3 : Dr. Agus S. Pamitran, ST., M.Sc.

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 12 Juli 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan banyak nikmat dan tidak lupa shalawat beserta salam semoga selalu tercurah kepada Baginda Nabi Besar Muhammad *Shallallahu 'alaihi wa sallam* beserta keluarganya, para sahabatnya, dan para pengikutnya yang selalu setia sampai hari akhir, sehingga penyusun dapat menyelesaikan skripsi dengan judul:

PEMODELAN PENGARUH SISTEM TIRAI KABUT AIR TERHADAP DENSITAS ASAP DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA KEBAKARAN KOMPARTEMEN

Atas kerja sama yang baik dari semua pihak, penulis telah berhasil dengan baik menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi ini. Skripsi ini ditulis guna memenuhi salah satu persyaratan pendidikan Sarjana Reguler pada jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Soelarto WRA (ayah) dan Dwi Mulyani (ibu), yang telah mendidik penulis sejak kecil hingga saat ini. Dengan kasih sayang yang ikhlas dan segala doa tercurah yang selalu membantu dan memberikan semangat dalam kehidupan penulis.
2. Dewy Handyka, Henry Purwono, dan Ika Setyanirahayu (kakak) serta keluarga besar penulis, Mbah Katmin (nenek), Tante Endang (Alm.), Tante Tuti, Om Sugeng (beserta keluarga) dan seluruh keluarga besar yang tidak dapat penulis sebutkan namanya satu persatu yang telah banyak membantu dan memberikan semangat dalam kehidupan penulis.
3. Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, MSc., PhD. sebagai pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan saran dan semangat dalam penyusunan skripsi.
4. Staf-staf DTM FTUI, Mas Yasin dan Mas Syarif, serta staff DTM FTUI yang telah banyak membantu dalam proses penyusunan skripsi.

5. Para guru dan dosen penulis yang telah banyak membimbing penulis dalam menjalani karier akademis semenjak TK sampai dengan kuliah S1 reguler di Teknik Mesin Universitas Indonesia.
6. Arian Dwi Putra, Fakhurrozi, Tri Cahyo Wibowo, Stevanus Sagala, Ryan Firmansyah serta rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Mesin FTUI lainnya yang senantiasa memberikan inspirasi dalam pembuatan laporan ini.
7. Keluarga besar Universitas Indonesia yang senantiasa memberikan semangat dan dukungannya.

Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian dan juga dalam penulisan skripsi ini sehingga penulis dapat menyelesaikannya.

Penulis juga minta maaf sebesar-besarnya kepada semua pihak atas kesalahan yang sengaja maupun tidak sengaja selama pelaksanaan penelitian. Dan juga penulis menyadari adanya ketidaksempurnaan dalam penyusunan skripsi ini karena keterbatasan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik membangun dari semua pihak agar menjadi lebih baik di masa yang akan datang.

Besar harapan penulis bahwa skripsi ini dapat memberikan informasi dan manfaat serta pengetahuan bagi pembaca dan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin. Demikian skripsi ini dibuat sebagaimana mestinya dan semoga bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca umumnya.

Depok, 12 Juli 2011



Hendra Gunawan S.

NPM 07 06 26 7074

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

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

Nama : Hendra Gunawan Susanto

NPM : 07 06 26 7074

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

**PEMODELAN PENGARUH SISTEM TIRAI KABUT AIR TERHADAP
DENSITAS ASAP DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA
KEBAKARAN KOMPARTEMEN**

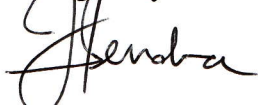
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / format-kan, mengelola dalam bentuk pengkalaan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis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

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 12 Juli 2011

Yang menyatakan



(Hendra Gunawan S.)

vi

ABSTRAK

Nama : Hendra Gunawan Susanto

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Pemodelan Pengaruh Sistem Tirai Kabut Air terhadap Densitas Asap dan Distribusi Temperatur pada Kebakaran Kompartemen

Penelitian tentang sistem kabut air sebagai suatu pengendali asap dan pengurangan panas pada kebakaran dilakukan pada suatu model kompartemen berukuran 50 cm x 50 cm x 100 cm menggunakan penskalaan 1 : 6 dengan ukuran ruangan sebenarnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur dalam kebakaran kompartemen. Penggunaan sistem kabut air dalam penelitian ini tidak memadamkan api secara langsung dengan menyemprotkan kabut air ke dalam nyala api akan tetapi hanya sebagai tirai air yang ditempatkan jauh dari sumber api. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah bensin premium sebanyak 8 ml yang ditempatkan pada suatu wadah dengan diameter 6.3 cm dengan tinggi 4.3 cm. Dalam penelitian ini dibahas tentang pengaruh penggunaan kabut air dalam suatu kebakaran kompartemen seperti: perbandingan nilai *optical density* asap dan temperatur ruangan. Variasi data dilakukan dengan pengukuran nilai *optical density* asap dan temperatur ruangan sebelum dan sesudah pengaktifan kabut air. Data eksperimen akan menghasilkan suatu grafik *optical density* asap dan distribusi temperatur ruangan pada kondisi dengan dan tanpa pengaktifan tirai kabut air. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *Fire Dynamics Simulator* (FDS. Ver. 5.0) kemudian membandingkan hasil simulasi dengan data yang di dapat dari hasil eksperimen.

Kata kunci: kabut air, kebakaran kompartemen, *enclosure effect*, pengendalian asap, *smoke optical density*, temperatur

ABSTRACT

Name : Hendra Gunawan Susanto

Study Program: Mechanical Engineering

Title : Modeling of The Effect of Watermist Curtain System on Smoke
Density and Temperature Distribution in a Compartment Fire

Research on water mist systems as a controller of smoke and reduction of heat in fires performed on a compartment model with the size of compartment is 50 cm x 50 cm x 100 cm with scaling 1: 6 with actual size room. This study aims to determine the extent of influence of water mist curtain system to the density of smoke and heat distribution in compartment fire. The application of water mist system in this study does not directly extinguish the fire by spraying water mist into the flame but only as a water curtain which is placed away from sources of ignition. The fuel, which is being used as much as 8 ml of premium (gasoline) in this study, is placed in a container with a diameter of 6.3 cm with 4.3 cm height. Comparison of smoke optical density and the room temperature will be conducted to determine the effectiveness of water mist curtains. Variation data was done by measuring the optical density of smoke and the room temperature before and after application of water mist system. Experimental data will produce a graph density of smoke and distribution of temperature compartment on conditions with and without activation of water mist curtains. Simulation was performed using *Fire Dynamics Simulator* (FDS. Ver. 5.0) and then the simulation results are compared with data obtained from the experimental results.

Key word : water mist, compartment fire, enclosure effect, smoke control, smoke optical density, temperature

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Pembatasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Api dan Pembakaran	7
2.2 <i>Pool Fire</i>	11
2.2.1 Laju Pelepasan Massa Pembakaran dan Produksi Kalor <i>Pool Fire</i>	12
2.2.2 Radiasi Api.....	15
2.2.3 Waktu Nyala Api	15
2.3 Kebakaran Kompartemen.....	17
2.4 Asap sebagai Hasil Pembakaran.....	20
2.4.1 Pergerakan Asap	21
2.4.2 Pengukuran Partikulat Asap	24
2.5 Fenomena Kebakaran	27
2.5.1 Kelas Kebakaran	27
2.5.2 Sistem Penanggulangan Kebakaran	28
2.6 Kabut Air	29
2.6.1 Pendahuluan.....	29
2.6.2 Pembuatan <i>Spray Droplet</i> dan Distribusi Ukuran <i>Droplet</i> Air.....	31
2.6.3 Tipe <i>Nozzle</i> dan Pola Penyebarannya	32
2.6.4 Mekanisme Pemadaman dari Sistem Kabut Air	33
2.7 <i>Fire Dynamic Simulator</i> (FDS)	35
2.7.1 <i>Hydrodynamics Model</i>	35

2.7.2 Model Pembakaran	36
2.7.2.1 Pertumbuhan dan Penyebaran Api.....	36
2.7.3 Perpindahan Panas Radiasi	37
2.7.4 Data Masukan dan Hasil dalam Suatu Simulasi FDS	37
2.8 Analisis Dimensional dan Keserupaan.....	39
2.8.1 Analisis Keserupaan Model	40
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	45
3.1 Tahap Persiapan.....	45
3.1.1 Peralatan Keamanan.....	45
3.1.2 Persiapan Alat Uji	46
3.2 Tahap Eksperimen	54
3.2.1 Kalibrasi Alat Pengukur Opasitas DIN 50055.....	55
3.2.2 Variasi Pengambilan Data.....	57
3.2.3 Prosedur Pengambilan Data Tanpa Pengaktifan Tirai Kabut Air.....	57
3.2.4 Prosedur Pengambilan Data dengan Menggunakan Tirai Kabut Air.....	58
3.3 Tahap Simulasi	59
3.3.1 Domain	60
3.3.2 Geometri	61
3.3.3 <i>Material Properties</i>	63
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS	64
4.1 Analisis Hasil Eksperimen	64
4.1.1 Pengaruh Tirai Kabut Air terhadap Distribusi Temperatur dalam Kebakaran Kompartemen.....	64
4.1.2 Pengaruh Tirai Kabut Air terhadap Penyebaran Asap dalam Kebakaran Kompartemen.....	77
4.2 Analisis Hasil Simulasi FDS	85
4.3 Perhitungan Skala Aktual terhadap Pemodelan yang dilakukan dalam Eksperimen	104
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	108
5.1 Kesimpulan.....	108
5.2 Saran	109
DAFTAR PUSTAKA	111
LAMPIRAN.....	114

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Elemen segitiga api	7
Gambar 2.2	Proses perubahan bahan bakar menjadi uap	8
Gambar 2.3	<i>Schematic representation of a burning surface</i>	13
Gambar 2.4	Fase perkembangan api. Garis putus-putus menunjukkan habisnya bahan bakar sebelum terjadi flashover	18
Gambar 2.5	Proses produksi dan pergerakan asap.....	21
Gambar 2.6	Buoyant plume interaction with ceiling a) <i>point source</i> (b) <i>real source</i>	22
Gambar 2.7	Gambaran peralatan yang dibutuhkan dalam pengukuran <i>optical density</i>	25
Gambar 2.8	Pembentukan <i>droplet</i> air (a) <i>Rayleigh break-up</i> , (b) <i>First wind-induce break-up</i> , (c) <i>Second wind- induce break-up</i> , (d) <i>Atomisasi</i>	32
Gambar 2.9	Alur kerja <i>Fire Dynamic Simulator</i> , <i>Smokezip</i> , dan <i>Smokeview</i>	38
Gambar 2.10	Analisis keserupaan model kebakaran kompartemen	40
Gambar 2.11	<i>Heat loss</i> melalui dinding kompartemen	42
Gambar 3.1	<i>Pressure vessel</i>	48
Gambar 3.2	<i>Pressure gauge</i>	48
Gambar 3.3	<i>Piping system</i>	49
Gambar 3.4	<i>Nozzle</i> kabut air.....	49
Gambar 3.5	Data akusisi	50
Gambar 3.6	Kompartemen.....	51
Gambar 3.7	Skema <i>light source</i>	52
Gambar 3.8	Skema <i>light receiver</i>	52
Gambar 3.9	<i>Control unit system</i>	53
Gambar 3.10	Dudukan <i>Light source</i> dan <i>Light reciever</i>	54
Gambar 3.11	Perangkat kalibrasi DIN 50055 (a) lensa kalibrasi (b) tempat lensa kalibrasi (c) sertifikat kalibrasi	55
Gambar 3.12	Grafik kalibrasi nilai <i>optical density</i> DIN 50055	56
Gambar 3.13	<i>Lay out mesh</i> yang digunakan pada simulasi	60
Gambar 3.14	<i>Lay out</i> simulasi tanpa pengaktifan tirai kabut air	61
Gambar 3.15	<i>Lay out</i> simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air	62
Gambar 4.1	Distribusi temperatur tanpa tirai kabut air	66
Gambar 4.2	Distribusi temperatur dengan tirai kabut air pada tekanan 150 psi	71
Gambar 4.3	Distribusi temperatur dengan tirai kabut air pada tekanan 200 psi	72
Gambar 4.4	Perbandingan temperatur untuk setiap skenario pada termokopel 5	73
Gambar 4.5	Pengaruh tirai kabut air terhadap temperatur termokopel 5 untuk setiap skenario.....	74
Gambar 4.6	Posisi <i>nozzle</i>	75

Gambar 4.7	<i>Flow rate nozzle</i> pada tekanan 150 psi untuk setiap pengujian.....	76
Gambar 4.8	<i>Flow rate nozzle</i> pada tekanan 200 psi untuk setiap pengujian.....	76
Gambar 4.9	<i>Optical density</i> asap untuk ketiga skenario pada jarak 0.28 m	79
Gambar 4.10	Perbandingan <i>Optical density</i> asap untuk setiap skenario pada jarak 0.28 m.....	80
Gambar 4.11	Pengaruh tirai kabut air terhadap <i>optical density</i> asap pada jarak 0.28 m untuk setiap skenario	81
Gambar 4.12	<i>Optical density</i> asap untuk ketiga skenario pada jarak 0.85 m	82
Gambar 4.13	Perbandingan <i>optical density</i> asap untuk setiap skenario pada jarak 0.85 m.....	84
Gambar 4.14	Pengaruh tirai kabut air terhadap <i>optical density</i> asap pada jarak 0.85 m untuk setiap skenario	84
Gambar 4.15	Pola distribusi temperatur hasil simulasi pada daerah sumbu-y 0.25 m	87
Gambar 4.16	Aliran udara pada kebakaran kompartemen.....	88
Gambar 4.17	Distribusi temperatur simulasi	88
Gambar 4.18	Distribusi temperatur simulasi tanpa tirai kabut air	89
Gambar 4.19	Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air 150 psi.....	91
Gambar 4.20	Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air 200 psi.....	91
Gambar 4.21	Vektor kecepatan temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air	92
Gambar 4.22	Partikel asap dan <i>droplet</i> air.....	92
Gambar 4.23	Perbandingan temperatur termokopel 5 simulasi tanpa dan dengan tirai kabut air tekanan 200 psi	93
Gambar 4.24	Perbandingan temperatur termokopel 5 simulasi tanpa dan dengan tirai kabut air tekanan 150 psi	93
Gambar 4.25	Pola penyebaran asap hasil simulasi pada daerah sumbu-y 0.25 m	94
Gambar 4.26	<i>Optical density</i> asap simulasi tanpa pengaktifan tirai kabut air	95
Gambar 4.27	<i>Optical density</i> asap simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 150 psi	96
Gambar 4.28	<i>Optical density</i> asap simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 200 psi	96
Gambar 4.29	Pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi pada jarak 0.85 m.....	97
Gambar 4.30	Pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi pada jarak 0.28 m.....	98
Gambar 4.31	Perbandingan pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi dan hasil eksperimen pada jarak 0.28 m	99

Gambar 4.32	Perbandingan pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi dan hasil eksperimen pada jarak 0.85 m	99
Gambar 4.33	Pola aliran partikel hasil pembakaran dan partikel kabut air pada kondisi dengan pelubangan pada bagian lantai kompartemen.....	100
Gambar 4.34	Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 150 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen	101
Gambar 4.35	Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 200 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen	101
Gambar 4.36	<i>Optical density</i> simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 150 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen.....	102
Gambar 4.37	<i>Optical density</i> simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 200 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen.....	102
Gambar 4.38	Perbandingan nilai <i>optical density</i> simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air jarak 0.28 m pada kondisi: (1) Tanpa pelubangan lantai (2). Dengan pelubangan lantai	103
Gambar 4.39	Perbandingan nilai <i>optical density</i> simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air jarak 0.85 m pada kondisi: (1) Tanpa pelubangan lantai (2). Dengan pelubangan lantai	103

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pembentukan volatil dari bahan bakar padat	9
Tabel 2.2	<i>Pool Burning: Thermochemical and Empirical Constant</i> untuk beberapa jenis bahan bakar organik	14
Tabel 2.3	Kelas kebakaran	28
Tabel 2.4	Perbandingan antara bentuk <i>droplet</i> sesuai dengan diameter ..	29
Tabel 2.5	Tipe <i>nozzle</i> dan pola penyebaran <i>droplet</i> air	32
Tabel 2.6	<i>Scaling correlation</i> eksperimen	44
Tabel 3.1	Nilai <i>optical density</i> sesuai standard DIN 50055	55
Tabel 3.2	Nilai <i>optical density</i> hasil pengukuran	56
Tabel 3.3	<i>Response time constants</i> DIN 50055	56
Tabel 3.4	Posisi peralatan pengukuran kondisi tanpa tirai kabut air.....	61
Tabel 3.5	Posisi peralatan pengukuran kondisi dengan tirai kabut air.....	62
Tabel 3.6	<i>Material properties</i> data masukan untuk simulasi FDS	63
Tabel 4.1	Perhitungan <i>flow rate nozzle</i> untuk skala aktual.....	106

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Nilai <i>Soot Yield</i> untuk Bensin Premium (<i>Gasoline</i>)	114
Lampiran 2. Perhitungan Persentase Pengurangan Nilai <i>Optical Density</i> Asap karena Pengaktifan Tirai Kabut Air.....	115
Lampiran 3. Grafik <i>Optical Density</i> dari Hasil beberapa Pengujian.....	117
Lampiran 4. Data Masukan pada Simulasi FDS.....	120
Lampiran 5. Gambar Kompartemen Dengan melakukan Pelubangan pada Bagian Lantai Kompartemen).....	138
Lampiran 6. Gambar Teknik Desain Eksperimen	139
Lampiran 7. Dokumentasi Penelitian	142



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam suatu kebakaran kompartemen, bahaya tidak hanya berasal dari api yang tidak terkendali, namun juga berasal dari asap yang merupakan salah satu produk pembakaran. Asap dapat menyebar ke lingkungan sekitarnya sehingga mengganggu jarak pandang dan dapat mengakibatkan terganggunya proses evakuasi. Berdasarkan data statistik *National Bureau of Standards USA (1983)*, bahwa 74 % penyebab utama kematian penghuni bangunan pada peristiwa kebakaran diakibatkan oleh asap dan hanya 10 % akibat luka bakar[6]. Dari data tersebut terbukti bahwa asap hasil kebakaran menimbulkan risiko yang tinggi terhadap bahaya kematian. Untuk itu diperlukan upaya dalam mengurangi penyebaran asap dan panas yang merupakan salah satu sumber bahaya pada peristiwa kebakaran.

Kemajuan dalam penelitian dan aplikasi penggunaan kabut air menunjukkan bahwa sistem kabut air berpotensi untuk dapat menggantikan sistem proteksi kebakaran yang telah ada seperti halogen yang memiliki efek negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Tirai kabut air dapat berfungsi sebagai suatu sistem pengendali asap dan panas hasil pembakaran. Bidang pembatas yang dihasilkan oleh momentum dan laju penguapan *droplet* air dapat mengurangi penyebaran asap dan panas hasil pembakaran. *Flux density* yang dihasilkan oleh pengaktifan tirai kabut air dan *smoke scrubbing* oleh *droplet* air dapat menyebabkan partikel asap bercampur dengan partikel air sehingga penyebaran partikel asap dapat dikurangi. Ukuran *droplet* air yang sangat kecil juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam suatu sistem proteksi bahaya kebakaran. Selain itu, penggunaan tirai kabut air dapat mengatasi permasalahan dalam penyediaan air sebagai media penanganan bahaya kebakaran.

Perkembangan dalam Pemodelan Kebakaran (Fire Modeling) telah memungkinkan dilakukannya suatu simulasi kebakaran menggunakan pendekatan *Zone Model* maupun *Field Model*. Pemodelan pertumbuhan api dan pergerakan

asap yang akan dilakukan pada penelitian ini berbasis pada *Field Model* menggunakan *Fire Dynamic Simulator* (FDS) yang dikembangkan oleh NIST (National Institute for Standard and Technology)[3]. FDS merupakan model *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang berbasis pada pendekatan *Large Eddy Simulation* (LES). Simulasi ini digunakan untuk memecahkan suatu bentuk *high-speed* pada persamaan Navier-Stokes dan dapat dipergunakan untuk pergerakan aliran *low-speed buoyancy*. Api di modelkan sebagai bentuk penyemburan dari pirolisis bahan bakar pada bagian permukaan yang terbakar ketika bercampur dengan oksigen. Pemodelan api dan kemunculan asap berbasis pada parameter stokiometri dan *soot yield* dari asap yang bergantung pada jenis bahan bakar.

Oleh karena itu, penelitian terhadap penggunaan tirai kabut air pada suatu model kompartemen dilakukan untuk melihat apakah pengaruh sistem tersebut terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran. Suatu simulasi juga dilakukan dengan menggunakan *Fire Dynamics Simulator* (FDS, Ver. 5.0) dengan kondisi yang hampir sama dengan eksperimen. Validitas hasil simulasi akan dilakukan dengan membandingkan hasil yang di dapat dengan data hasil eksperimen. Perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi akan menghasilkan suatu tren grafik yang menunjukkan pengaruh sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bahan bakar.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini akan membahas pengaruh sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bahan bakar cair dalam suatu model kompartemen. Penggunaan sistem kabut air dalam penelitian ini tidak memadamkan api secara langsung dengan menyemprotkan kabut air ke dalam nyala api akan tetapi hanya sebagai tirai kabut air yang ditempatkan jauh dari sumber api. Perbandingan nilai *optical density* asap dan temperatur ruangan dilakukan pada kondisi dengan dan tanpa pengaktifan tirai kabut air. Suatu simulasi juga dilakukan dengan menggunakan *Fire Dynamics Simulator* (FDS, Ver. 5.0) dengan kondisi yang hampir sama dengan eksperimen. Validitas hasil simulasi akan dilakukan dengan membandingkan hasil yang di dapat dengan data

hasil eksperimen. Perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi akan menghasilkan suatu tren grafik yang menunjukkan pengaruh sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bahan bakar cair.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan, yaitu :

1. Mengetahui karakteristik pembakaran *pool fire* berbahan bakar bensin premium berupa *heat release rate* (HRR) teoritis.
2. Mengetahui besarnya nilai densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bensin premium dalam suatu kebakaran model kompartemen.
3. Mengetahui pengaruh penggunaan tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bensin premium dalam suatu kebakaran model kompartemen.
4. Mengetahui pengaruh tekanan kerja pada sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bensin premium dalam suatu kebakaran model kompartemen.
5. Mengetahui korelasi antara eksperimen dan pemodelan dengan melakukan perbandingan hasil yang di dapat pada masing-masing penelitian sehingga di dapatkan suatu tren grafik yang menunjukkan pengaruh sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bensin premium dalam suatu kebakaran model kompartemen.

1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Melakukan suatu penelitian terhadap pengaruh sistem kabut air pada densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bensin premium dalam suatu kebakaran kompartemen.
2. Kompartemen yang digunakan dalam penelitian ini merupakan suatu model dari kompartemen yang memiliki ukuran seperti pada bangunan sebuah ruko dalam skala aktual.

3. Model kompartemen yang digunakan dalam eksperimen dan simulasi memiliki ukuran panjang 1 m, lebar 0.5 m, dan tinggi 0.5 m menggunakan skala 1 : 6 dengan ukuran kompartemen aktual.
4. Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan merupakan bensin jenis premium dengan volume 8 ml.
5. Ukuran wadah bahan bakar memiliki diameter 6.3 cm dengan tinggi 4.3 cm.
6. Tekanan *pressure vessel* yang digunakan untuk menghasilkan *droplet* air dari *nozzle* adalah 150 psi dan 200 psi.
7. Penggunaan *flap* dalam sistem kabut air berfungsi sebagai pengatur *droplet* air sehingga membentuk suatu tirai kabut air.
8. Tirai kabut air tidak digunakan untuk memadamkan api secara langsung akan tetapi berfungsi sebagai pengedali asap dan panas hasil pembakaran *pool fire*.
9. *Nozzle* yang digunakan adalah *nozzle* dengan merek *Mist Nozzle* APO TW-3, sudut bukaan *nozzle* dan ukuran *droplet* yang dihasilkan mengacu kepada spesifikasi manufaktur yang di keluarkan oleh supplier *Mist Nozzle* APO TW-3.
10. Jumlah *nozzle* yang digunakan 3 buah dengan jarak antar *nozzle* adalah 15 cm.
11. Tidak dilakukan perhitungan terhadap *flow rate* dan *pressure drop* dari sistem pemipaan dan ukuran *droplet* serta mekanisme penyalaan api.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Melakukan studi literatur dengan mempelajari materi yang berkaitan dengan tema yang akan di bahas dalam skripsi ini. Materi pembelajaran berasal dari jurnal, buku-buku, dan skripsi dengan tema yang sama. Selain itu, literatur juga berasal dari situs-situs internet mengenai spesifikasi alat, dasar teori, dan informasi lain yang berkaitan dengan tema yang akan di bahas.
2. Melakukan pengujian atau pengambilan data sesuai dengan prosedur percobaan yang telah ditentukan serta melakukan simulasi dengan menggunakan *Fire Dynamics Simulator* (FDS. Ver. 5.0) dengan kondisi yang hampir sama dengan eksperimen.
3. Melakukan pengolahan data dan penganalisisan grafik hasil pengolahan data baik hasil eksperimen maupun hasil simulasi. Analisis dilakukan dengan mengacu kepada literatur yang telah ada.

4. Dari penganalisisan grafik hasil pengolahan data baik dari hasil eksperimen maupun hasil simulasi akan di buat kesimpulan mengenai pengaruh sistem tirai kabut air terhadap densitas asap dan distribusi temperatur hasil pembakaran bensin premium.

1.6 Sistematika Penulisan

Agar mudah dalam memahami dan mempelajari tugas akhir ini maka sistematika penulisan terbagi menjadi beberapa bagian menurut urutan bab-bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian 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 dalam penelitian ini dijelaskan secara garis besar dalam subbab perumusan masalah, pembatasan masalah, dan tujuan penulisan. Sedangkan subbab metodologi dan sistematika penulisan penelitian memberikan gambaran tentang proses yang terjadi dalam penelitian ini secara singkat.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang landasan teori dalam melakukan penelitian. Dasar teori yang terdapat dalam penelitian ini yaitu mengenai proses pembakaran pada bahan bakar cair, karakteristik *pool fire*, kebakaran kompartemen, asap sebagai hasil pembakaran, fenomena kebakaran, sistem kabut air, *fire dynamic simulator* (FDS), dan analisis dimensi dan keserupaan. Tinjauan pustaka ini diambil dari beberapa buku, jurnal dan beberapa situs internet.

BAB III METODOLOGI PENGUJIAN

Pada bab ini akan di bahas mengenai tahap persiapan, tahap eksperimen, dan tahap simulasi. Tahap persiapan merupakan suatu tahapan tentang persiapan alat uji dan peralatan keamanan yang digunakan dalam pengujian. Tahap eksperimen berisikan kalibrasi alat pengukur, variasi data yang dilakukan dalam penelitian, dan prosedur pengambilan data. Sedangkan tahap simulasi merupakan suatu

tahapan mengenai domain, geometri, dan *material properties* yang digunakan dalam simulasi.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini memuat data-data hasil pengujian yang di olah menjadi data berupa grafik hasil dari penelitian. Selanjutnya data ini akan di analisis berdasarkan literatur yang ada. Analisis tersebut mengenai pengaruh tirai air pada penyebaran asap dan distribusi temperatur akibat pembakaran *pool fire* dalam ruangan dengan melakukan pengukuran opasitas asap pada bagian sebelum tirai air (jarak 0.28 m) dan setelah tirai air (jarak 0.85 m). Hasil eksperimen yang dilakukan akan dibandingkan dengan simulasi FDS 5 dengan kondisi yang hampir sama dengan eksperimen.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

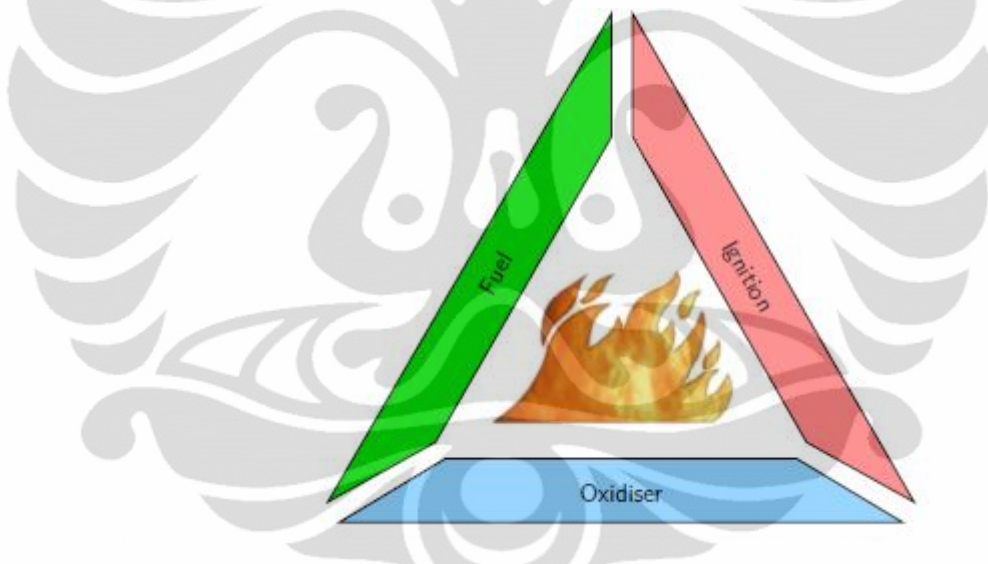
Pada bagian ini akan diambil beberapa kesimpulan dari seluruh analisis yang telah dilakukan dengan disertai beberapa saran terhadap pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Api dan Pembakaran

Api terjadi akibat proses pembakaran di mana terjadi oksidasi dan reaksi kimia kompleks antara oksigen, bahan bakar, dan sumber-sumber *ignition* yang disertai dengan munculnya panas (kalor), asap, dan gas sisa hasil pembakaran seperti karbon dioksida dan air. Bahan bakar merupakan semua zat yang dapat melepaskan energi ketika di oksidasi. Bahan bakar dapat berupa fase padat, cair, dan gas. Oksigen, bahan bakar, sumber-sumber *ignition*, dan reaksi-reaksi kimia yang terjadi merupakan elemen primer dari api. Keseimbangan api akan terganggu apabila salah satu dari elemen penting tersebut mulai tidak seimbang.



Gambar 2.1 Elemen segitiga api [5]

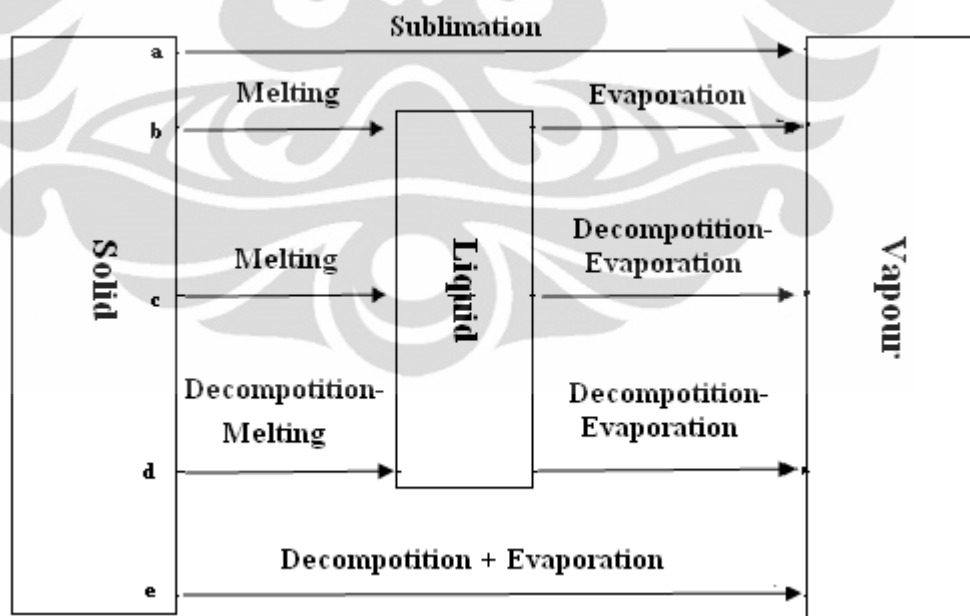
Api adalah pancaran yang terlihat yang merupakan hasil dari suatu reaksi oksidasi kimia yang melepaskan panas serta menghasilkan energi dan gas hasil sisa pembakaran.

Dari Gambar 2.1 dapat terlihat bahwa nyala api membutuhkan oksigen dan bahan bakar. Oleh karena itu, api akan terus menyala sesuai dengan reaksi oksidasi yang terjadi sampai bahan bakar habis. Komponen sebelum reaksi dalam suatu reaksi pembakaran adalah reaktan (bahan bakar + oksidator) dan komponen setelah reaksi pembakaran adalah produk pembakaran dan panas.

Bahan bakar + Oksidator \longrightarrow Produk pembakaran + Panas

Pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis yaitu pembakaran jenis *flaming* dan *smouldering*. Perbedaan mendasar antara kedua jenis pembakaran tersebut yaitu *smouldering* merupakan bentuk kebakaran yang terjadi tanpa adanya nyala api, pergerakannya lambat, dan temperatur yang rendah disertai dengan perambatan panas ketika oksigen mengenai permukaan bahan bakar pada fasa kondensasi sedangkan *flaming* merupakan pembakaran yang disertai dengan nyala api, pergerakannya cepat, dan temperatur tinggi.

Pembakaran jenis *flaming* menghasilkan api yang merupakan suatu fenomena yang terjadi dalam fase gas. Oleh karena itu, bahan bakar dalam fase padat atau cair harus terlebih dahulu mengalami perubahan fase menjadi fase gas untuk dapat terbakar. Dalam gambar 2.2 terdapat beberapa mekanisme dari proses perubahan wujud benda yang berfase padat lalu berubah ke fase cair kemudian menjadi fase gas.



Gambar 2.2 Proses perubahan bahan bakar menjadi uap [1]

Tabel 2.1 Pembentukan volatil dari bahan bakar padat [1]

Designation	Mechanism	Examples
a	Sublimation	Methenamine
b	Melting and evaporation without chemical change	Low molecular weight paraffin waxes, although the mechanism likely to involve (b) and (c)
c	Melting, then decomposition followed by evaporation of molecular weight products	Thermoplastics; high molecular weight waxes, etc
d	Decomposition to produce molten produce ^a which decompose further to yield <i>volatile</i> species	Polyurethane
e	Decomposition to give <i>volatile</i> species directly	Cellulose; most thermosetting resins (except polyurethanes)

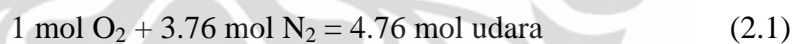
Material dalam fase padat, produksi *volatile* dari bahan bakar padat mengalami dekomposisi kimia atau pirolisis dengan berat molekular dari *volatile* rendah yang dapat melayang dari permukaan material yang kemudian memasuki api untuk proses pembakaran. Hal tersebut di dahului dengan proses melelehnya material padat yang bergantung pada temperatur di sekitar permukaan material dan *properties* dari material (Gambar 2.2 dan Tabel 2.1). Pada umumnya, *volatile* yang dihasilkan dari dekomposisi atau pirolisis suatu material terdiri dari campuran yang kompleks mulai dari molekul sederhana seperti hydrogen sampai pada spesies dengan berat molekul yang relatif tinggi yang terjadi pada temperatur di sekitar permukaan material ketika energi termal dapat menimbulkan suatu gaya kohesif pada permukaan material dan menyebabkan material terkondensasi.

Untuk material cair pada umumnya, apabila temperatur lingkungan sekitar material naik maka temperatur permukaan material akan naik. Pada suatu kondisi di mana temperatur permukaan zat cair tersebut telah mencapai temperatur jenuhnya maka material tersebut akan mengalami penguapan dibagian permukaan material. Hal ini yang kemudian akan menyebabkan terjadinya penguapan akibat naiknya temperatur di sekitar material. Pada saat penguapan biasanya akan terjadi transfer massa berupa pelepasan uap dan gas hasil penguapan. Perubahan fase

yang terjadi pada suatu material bergantung pada keadaan lingkungan dan *properties* dari material tersebut sehingga setiap material akan memerlukan suatu kondisi yang berbeda untuk dapat berubah fase.

Setelah material berubah fase menjadi fase gas maka akan siap bercampur dengan oksigen sebagai *oxidizer*. Udara yang dipergunakan dalam kebanyakan proses pembakaran berasal dari udara bebas. Dalam kebanyakan analisis teori atau praktis, udara dianggap dalam kondisi kering (dry air) yang tersusun atas komponen-komponen oksigen (O_2), nitrogen (N_2), argon (Ar), karbondioksida (CO_2), helium (He), neon (Ne), dan sebagainya. Dalam suatu keadaan normal untuk perhitungan pembakaran, satu satuan volume (mol) udara kering dapat diasumsikan terdiri dari 21% oksigen dan 79 % nitrogen sehingga suatu bahan bakar yang mampu bakar dapat terbakar dalam kondisi udara bebas.

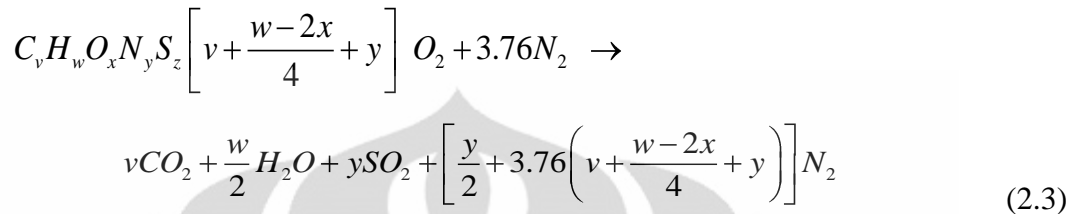
Di dalam praktik perhitungan stokiometri, pemenuhan kebutuhan oksigen dalam udara sebagai oksidator pada keadaan atmosfer standard, nilai $X_{N_2} = 0.79$ dan $X_{O_2} = 0.21$ maka rasio nitrogen dan oksigen di dalam udara normal dianggap sebagai $X_{N_2}/X_{O_2} = 0.79/0.21 = 3.76$. Pemenuhan kebutuhan oksigen untuk suatu proses pembakaran dapat dipenuhi oleh oksigen yang berasal dari udara bebas adalah sebagai berikut:



Dari hubungan di atas menunjukkan bahwa dalam 4.76 mol udara terdapat 1 mol O_2 bercampur 3.76 mol N_2 atau 4.30 kg udara terdapat 1 kg O_2 bercampur 3.30 kg N_2 . Pemenuhan oksigen dalam hubungan di atas merupakan jumlah kebutuhan udara kering minimum yang akan memberikan sejumlah oksigen untuk terjadinya suatu pembakaran sempurna yang disebut sebagai udara teoritis atau udara stokiometrik.

Istilah stokiometrik digunakan untuk menggambarkan hubungan antara jumlah reaktan dengan jumlah produk dalam suatu reaksi kimia. Dalam suatu reaksi stokiometrik tidak ada penambahan reaktan dalam suatu aliran produk.

Pada dasarnya, reaksi stokiometrik digambarkan pada basis molar. Untuk suatu bahan bakar dengan contoh formula yang mengandung karbon, hydrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur ($C_vH_wO_xN_yS_z$) maka akan diperoleh persamaan umum stokiometrinya yaitu[16]:



Campuran udara-bahan bakar tidak akan menimbulkan api apabila tidak dipicu dengan sumber panas yang cukup. Dengan adanya pemacu dari sumber panas yang cukup maka akan terjadi proses oksidasi dan pembakaran bahan bakar pada sebagian volume dalam campuran tersebut. Namun apabila campuran gas dan temperatur lingkungan sudah cukup maka penyalaan akan timbul tanpa adanya sumber api. Hal ini yang disebut dengan *auto- or spontaneous ignition*.

Api yang dihasilkan dari pembakaran tersebut memiliki temperatur yang tinggi daripada temperatur lingkungannya sehingga terjadi proses emisi kalor. Karena emisi kalor tersebut maka proses pembakaran merupakan reaksi eksotermik di mana terjadi perpindahan panas dari sistem ke lingkungannya.

2.2 Pool Fire

Pool fire merupakan suatu pembakaran yang terjadi di atas kolam horizontal yang bahan bakarnya berasal dari penguapan bahan bakar cair di mana momentum awalnya sangat rendah atau sama dengan nol. Suatu nyala api dari suatu *pool fire* bergantung pada besarnya luas permukaan bahan bakar (diameter *pool fire*). Selain itu, nyala api juga bergantung pada banyaknya bahan bakar yang telah mencapai titik mampu bakar yang tersedia dalam suatu *pool fire*. Dalam suatu *pool fire*, aliran pada pembakaran bahan bakar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu[1,19]:

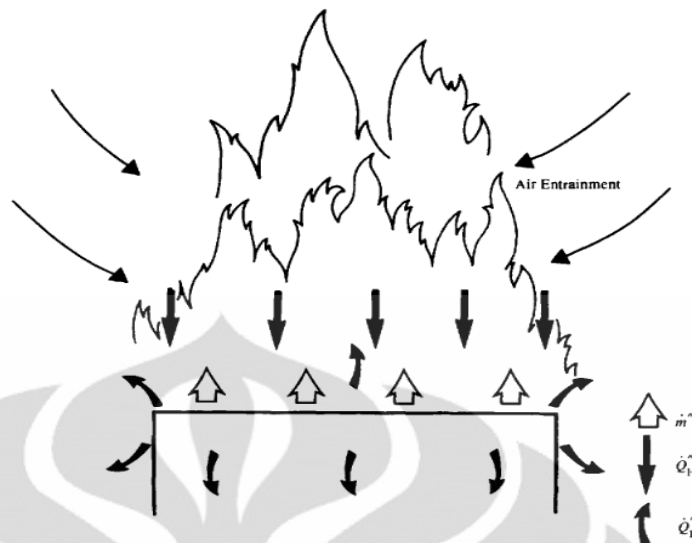
1. Untuk ukuran diameter *pool fire* kurang dari 0.03 m ($D < 0.03$ m) maka aliran api akan laminar

2. Untuk ukuran diameter *pool fire* yang besar dengan diameter lebih dari 1 m ($D > 1$ m) maka aliran api akan turbulenta
3. Apabila ukuran diameter *pool fire* berada pada nilai diantara 0.03 m sampai 1 m ($0.03 \text{ m} < D < 1 \text{ m}$) maka aliran api berada pada transisi antara aliran laminar dan aliran turbulenta

Analisis Hottel dari data yang ditunjukkan Blinov dan Khudiakov's menjelaskan bahwa penyebaran panas secara radiasi mendominasi pada permukaan bahan bakar dengan ukuran diameter *pool fire* yang besar. Sedangkan diameter *pool fire* yang berukuran kecil di dominasi oleh penyebaran panas pada permukaan bahan bakar secara konveksi[18].

2.2.1 Laju Pelepasan Massa Pembakaran dan Produksi Kalor *Pool Fire*

Pada suatu *pool fire*, api yang dihasilkan dari proses pencampuran bahan bakar dan oksigen dengan sumber panas yang cukup akan mempertahankan nyala api apabila kesetimbangan elemen api tidak terganggu. Hal ini diakibatkan oleh adanya penguapan dan terjadinya suatu reaksi kimia bahan bakar cair akibat panas yang ditimbulkan oleh nyala api. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.4 di mana nyala api mempertahankan fase penguapan yang terjadi di mana juga terjadi reaksi kimia yang dapat menghasilkan material *combustible* dengan fase gas yang siap untuk terbakar. Selanjutnya, material *combustible* yang dihasilkan oleh reaksi kimia pada fase penguapan bahan bakar akan mempertahankan nyala api. Keadaan nyala api akan terus stabil apabila kesetimbangan dari elemen api tetap setimbang. Nyala api akan berkurang apabila ketersediaan bahan bakar berkurang yang mengakibatkan material *combustible* yang dibutuhkan dalam proses terbentuknya api menurun. Hal ini juga berakibat pada proses pembentukan material *combustible* oleh api yang akan menurun akibat berkurangnya ketersediaan panas yang dibutuhkan dalam fase penguapan untuk terjadinya reaksi kimia yang menghasilkan material *combustible* dari suatu bahan bakar.



Gambar 2.3 Schematic representation of a burning surface [1]

Dalam suatu penyebaran nyala api seperti yang terlihat pada **Gambar** , laju pembakaran akan sama dengan laju suplai gas *combustible* bahan bakar di mana laju pembakarannya (\dot{m}'') dapat ditulis secara umum dengan persamaan[1]:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_V} \quad (2.4)$$

di mana \dot{Q}_F'' merupakan *heat flux* suplai dari api (kW/m^2) dan \dot{Q}_L'' adalah panas yang hilang atau *heat flux* dari permukaan bahan bakar. L_V merupakan panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan material *combustible* dalam fase gas (kJ/kg) atau untuk bahan bakar cair merupakan panas *latent* dari penguapan bahan bakar.

Babrauskas[18] merumuskan suatu persamaan untuk mengetahui besarnya *heat release rate* pada risiko api yang berasal dari pembakaran *pool fire* dengan diameter lebih kecil dari 0.2 meter ($D < 0.2 \text{ m}$) yaitu:

$$\dot{q} = \Delta h_c \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-\kappa\beta D}) \times A \quad (2.5)$$

di mana :

\dot{q} = laju pelepasan panas (*heat release rate*) *pool fire* (kW)

Δh_c = *effective heat of combustion* (kJ/kg)

\dot{m}''_{∞} = *asymptotic mass burning rate for large fire diameter* ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)

$\kappa\beta$ = *empirical constant* (konstanta ditunjukkan pada Tabel 2.2 untuk

beberapa jenis bahan bakar)

A = luas permukaan bahan bakar (m^2)

Untuk besarnya *mass burning rate* pada suatu *pool fire* maka dapat digunakan persamaan [18]:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{(-\kappa\beta D)}) \quad (2.6)$$

di mana \dot{m}'' adalah *mass burning rate pool fire* ($kgm^{-2}s^{-1}$)

Tabel 2.2 *Pool Burning: Thermochemical and Empirical Constant* untuk beberapa jenis bahan bakar organik [18]

Material	Density (kg/m^3)	Δh_g (kJ/kg^{-1})	Δh_c (MJ/kg^{-1})	\dot{m}'' (kg/m^2s^{-1})	k (m^{-1})
Cryogenics					
Liquid H_2	70	442	120.0	0.017 (± 0.001)	6.1 (± 0.4)
LNG (most CH_4)	415	619	50.0	0.078 (± 0.018)	1.1 (± 0.8)
LPG (mostly C_3H_8)	585	426	46.0	0.099 (± 0.009)	1.4 (± 0.5)
Alcohols					
Methanol (CH_3OH)	796	1195	20.0	See text	See text
Ethanol (C_2H_5OH)	794	891	26.8	See text	See text
Simple organic fuels					
Butane (C_4H_{10})	573	362	45.7	0.078 (± 0.003)	2.7 (± 0.3)
Benzene (C_6H_6)	874	484	40.1	0.085 (± 0.002)	2.7 (± 0.3)
Hexane (C_6H_{14})	650	433	44.7	0.074 (± 0.005)	1.9 (± 0.4)
Heptane (C_7H_{16})	675	448	44.6	0.101 (± 0.009)	1.1 (± 0.3)
Xylenes (C_8H_{10})	870	543	40.8	0.090 (± 0.007)	1.4 (± 0.3)
Acetone (C_3H_6O)	791	668	25.8	0.041 (± 0.003)	1.9 (± 0.3)
Dioxane ($C_4H_8O_2$)	1035	552	26.2	0.018	5.4
Diethyl ether ($C_4H_{10}O$)	714	382	34.2	0.085 (± 0.018)	0.7 (± 0.3)
Petroleum products					
Benzine	740	—	44.7	0.048 (± 0.002)	3.6 (± 0.4)
Gasoline	740	330	43.7	0.055 (± 0.002)	2.1 (± 0.3)
Kerosene	820	670	43.2	0.039 (± 0.003)	3.5 (± 0.8)
JP-4	760	—	43.5	0.051 (± 0.002)	3.6 (± 0.1)
JP-5	810	700	43.0	0.054 (± 0.002)	1.6 (± 0.3)
Transformer oil, hydrocarbon	760	—	46.4	0.039	0.7
Fuel oil, heavy	940–1,000	—	39.7	0.035 (± 0.003)	1.7 (± 0.6)
Crude oil	830–880	—	42.5–42.7	0.022–0.045	2.8 (± 0.4)
Solids					
Polymethylmethacrylate	1184	1611	24.9	0.020 (± 0.002)	3.3 (± 0.8)
Polyoxymethylene (CH_2O) _n	1425	2430	15.7		
Polypropylene (C_3H_6) _n	905	2030	43.2		
Polystyrene (C_8H_8) _n	1050	1720	39.7		

2.2.2 Radiasi Api

Radiasi dari suatu nyala api dan produk pembakaran merupakan suatu proses yang kompleks yang bergantung pada distribusi temperatur, ukuran, distribusi, dan konsentrasi dari jelaga (*soot partikel*), serta pancaran dan penyerapan suatu konsentrasi gas[5]. Radiasi panas dari suatu sumber api dapat diketahui apabila parameter yang memengaruhi radiasi api diketahui, namun hal tersebut tidak dapat dipergunakan sepenuhnya untuk dapat menjelaskan radiasi yang dihasilkan pada suatu kebakaran. Oleh karena itu, suatu perkiraan besarnya radiasi api dengan menggunakan korelasi empiris dilakukan dengan menghitung besarnya *heat flux* yang dihasilkan oleh suatu nyala api sebagai berikut[5]:

$$\bar{q}'' = (\bar{\epsilon}_g + \epsilon'_g) \sigma (\bar{T} + T')^4 \quad (2.7)$$

dimana garis pada bagian atas pada persamaan 2.7 menjelaskan waktu rata-rata serta menunjukkan fluktuasi untuk komponen aliran turbulen. Besarnya emisivitas api dalam hal ini dipengaruhi oleh *properties* dan bentuk dari api yang dapat dirumuskan sebagai berikut[5]:

$$\epsilon_g = 1 - e^{-\kappa_g l} \quad (2.8)$$

dimana κ_g adalah *absorption coefficient* yang besarnya $O(1) \text{ m}^{-1}$ untuk bergantung pada jenis bahan bakar dan l merupakan karakteristik panjang dari suatu nyala api.

2.2.3 Waktu Nyala Api

Laju pembakaran suatu bahan bakar bergantung pada bentuk dan senyawa kimia pembentuk bahan bakar tersebut. Bentuk dari suatu bahan bakar akan berpengaruh terhadap laju pembakaran. Faktor utama yang sangat penting adalah luas permukaan bahan bakar terhadap rasio massa dari bahan bakar yaitu luasnya permukaan bahan bakar yang dapat terbakar dibandingkan terhadap massa total dari bahan bakar.

Suatu pengukuran terhadap waktu pembakaran merupakan suatu cara untuk menentukan bahaya yang ditimbulkan oleh kebakaran dalam ruangan.

Lamanya waktu pembakaran dari suatu bahan bakar dalam ruangan dapat diperkirakan dengan melihat banyaknya material yang mungkin terbakar dan udara dalam suatu ruangan yang dipergunakan dalam suatu pembakaran. Ketika bahan bakar cair terbakar maka api akan berkembang sesuai dengan laju pelepasan massa dan panas dari produk pembakaran. Diameter *pool fire* yang merupakan luas permukaan bahan bakar akan memengaruhi laju pelepasan massa dan panas dari bahan bakar. Dalam suatu analisis di mana dua buah bahan bakar cair dengan jenis dan volume yang sama, bahan bakar cair dengan diameter permukaan yang lebih kecil dapat terbakar dalam waktu yang lebih lama dibandingkan dengan bahan bakar cair dengan diameter yang besar. Massa dari material terbakar persatuan waktu dan sejumlah material lain yang dapat terbakar dapat diperkirakan dengan menggunakan waktu pembakaran bahan bakar di mana[19]:

$$t_b = \frac{4V}{\pi D^2 v} \quad (2.9)$$

di mana:

V = volume bahan bakar cair (m^3)

D = diameter *pool fire* (m)

v = laju pembakaran *regression rate* (ms^{-1})

Bahan bakar cair yang terbakar dan bahan bakar yang di pakai dalam proses pembakaran akan berkurang seiring dengan laju pembakaran (*regression rate*) yang didefinisikan sebagai *loss volumetric* dari bahan bakar cair per satuan luasan area dalam satuan waktu seperti yang diustrasikan melalui persamaan[19]:

$$v = \frac{\dot{m}''}{\rho_{fuel}} \quad (2.10)$$

di mana :

\dot{m}'' = *mass burning rate pool fire* ($kgm^{-2}s^{-1}$)

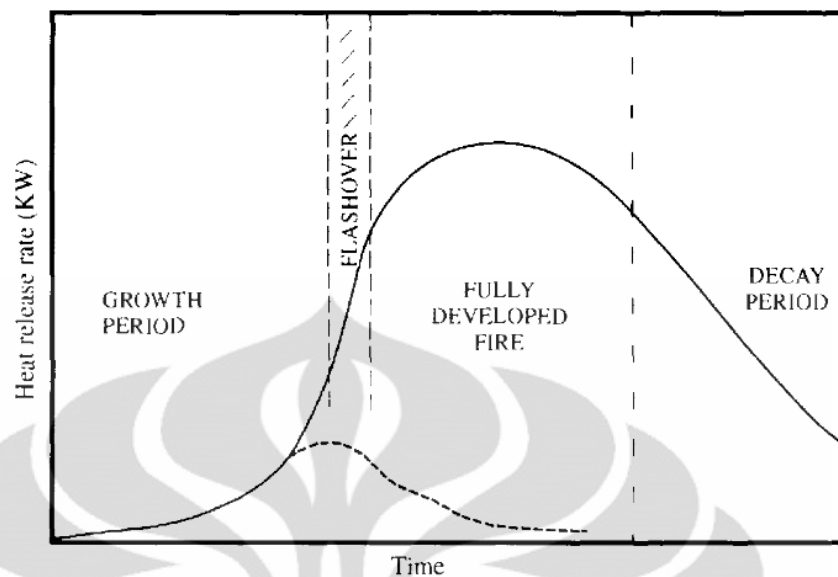
ρ_{fuel} = massa jenis bahan bakar (kgm^{-3})

2.3 Kebakaran Kompartemen

Kebakaran kompartemen merupakan nyala api yang terkurung dalam suatu ruangan tertutup yang terpisah dengan ruangan lainnya di dalam suatu bangunan. Faktor yang membatasi penyebaran dan pertumbuhan api adalah laju maksimum pembakaran dan durasi pembakaran. Dalam suatu ruangan, banyaknya udara, panas lingkungan luar, dan pengaruh lain dari lingkungan sekitar ruangan bergantung pada banyaknya ventilasi dan jenis dinding ruangan. Dalam suatu ruangan yang terbakar, banyaknya oksigen dan panas merupakan suatu akibat dari peristiwa kebakaran di dalam ruangan tersebut. Kebakaran dalam ruangan dapat dibagi menjadi lima fase, yaitu[7]:

1. *Ignition*
2. *Growth*
3. *Flashover*
4. *Fully developed fire*
5. *Decay*

Pada saat awal terbakarnya bahan bakar yaitu pada fase perkembangan api, api akan menyala dan berkembang yang dipengaruhi oleh banyaknya bahan bakar dan luasan permukaan bahan bakar. Apabila tidak ada suatu tindakan atau hal yang menyebabkan api tersebut padam maka api akan berkembang maksimum sesuai dengan banyaknya bahan bakar (*fuel controlled*) atau banyaknya udara (*ventilation limited*) yang memungkinkan untuk terjadinya suatu kebakaran. Ketika volume bahan bakar telah dibakar maka ukuran api akan berkurang. Apabila tidak ada suatu tindakan atau hal yang menyebabkan api tersebut padam maka dapat terlihat pada Gambar 2.5 fungsi pertambahan api dalam hubungan temperatur dan waktu.



Gambar 2.4 Fase perkembangan api. Garis putus-putus menunjukkan habisnya bahan bakar sebelum terjadi flashover[5]

Fase *ignition* merupakan suatu fase di mana api baru menyala. Ketika tidak ada suatu tindakan untuk memadamkan api baik secara manual (manusia) atau karena pengaruh *properties* api maka api akan berkembang ke ukuran yang lebih besar (*growth stage*). Api berkembang sebagai fungsi dari bahan bakar dengan sedikit pengaruh dari lingkungannya (ruangan). Api juga dapat digambarkan sebagai bentuk dari laju energi dan pembakaran produk bahan bakar. Apabila bahan bakar dan udara dalam ruangan cukup untuk terjadinya pembakaran maka api akan bertambah besar yang menyebabkan temperatur ruangan meningkat.

Fase *flashover* merupakan satu fase transisi dari fase *growth* ke fase *fully developed*. Pada fase transisi ini, keadaan dalam ruangan akan berubah dengan cepat baik dari banyaknya udara maupun suhu dalam ruangan. *Flashover* terjadi ketika radiasi dari gas panas dari produk pembakaran mencapai suhu 300 sampai 650°C namun temperatur *flashover* yang dikenal secara luas berada pada suhu 500 sampai 600°C[20].

Bebepara hal meliputi mekanisme flashover [5] yaitu:

1. *Remote ignition*, yaitu penyalaan tiba-tiba dengan autoignition atau piloted ignition yang merupakan hasil dari radiasi panas api. Radiasi panas yang

dihasilkan terutama berasal dari bagian atas ruangan di mana gas hasil pembakaran berkumpul dan memiliki panas yang cukup untuk dapat menjadi pemicu api pada suatu material.

2. *Rapid flame spread*. Ketika material memiliki suhu yang sudah relative tinggi sebelum datangnya radiasi dari panas gas hasil pembakaran. Radiasi yang dipancarkan oleh panas gas hasil pembakaran menjadi suatu pemicu terbakarnya material tersebut sehingga ketika nyala api menyebar dengan tiba-tiba, pada saat itu pula material lain ikut terbakar.
3. *Burning instability*. Ketika pada mulanya tidak terdapat penyebaran material hasil pembakaran, namun tiba-tiba api membesar pada saat yang sama. Panas diantara objek bahan bakar yang terbakar dengan ruangan dapat meningkat dengan cepat dari kondisi stabilnya pada saat belum terjadi pemanasan.
4. *Oxygen supply*. Kerusakan yang terjadi pada jendela atau pintu secara tiba-tiba yang merupakan akibat dari kondisi flashover membuat sejumlah oksigen baru dapat masuk ke dalam ruangan yang terbakar. Pada saat itu terjadi pencampuran oksigen baru tersebut dengan gas panas hasil pembakaran yang mengandung banyak bahan bakar yang belum terbakar. Hal ini dapat terjadi secara cepat dan menyebabkan peningkatan tekanan yang signifikan.
5. *Boilover*. Fenomena ini terjadi ketika air disemprotkan ke dalam suatu bahan bakar yang sedang terbakar dengan massa jenis bahan bakar yang lebih rendah dan boiling temperatur yang lebih tinggi daripada air. *Droplet* air yang masuk ke permukaan bahan bakar secara instan menguap dengan pemuaian yang sangat besar yang berakibat penyemprotan keluar bahan bakar yang terbakar. Peningkatan area permukaan bahan bakar yang terbakar dengan penyemprotan bahan bakar menimbulkan peningkatan nyala api yang sangat besar. Apabila air tidak hanya terdapat pada permukaan bahan bakar dan dapat masuk ke dalam bahan bakar karena pengaruh massa air yang lebih berat dari bahan bakar maka dapat terjadi

pendidihan air dalam bahan bakar secara tiba-tiba maka terjadilah *boilover*.

Pada fase *fully developed*, terjadi laju pelepasan api paling besar diantara fase lain dalam suatu kebakaran ruangan. Banyaknya bahan bakar yang terbakar dalam fase ini dipengaruhi oleh banyaknya udara yang tersedia dalam ruangan (*ventilation controlled*). Apabila terdapat cukup ventilasi pada ruangan tersebut, bahan bakar yang belum terbakar dapat keluar ruangan bersama gas hasil pembakaran yang dapat mengakibatkan nyala api sehingga bagian luar ruangan terbakar. Selama fase *fully developed* berlangsung, lingkungan di dalam ruangan sangat berpengaruh pada laju pirolisis material yang ada di dalam ruangan. Setelah fase *fully developed* terjadi dan bahan bakar yang ada sudah berkurang, fase *decay* terjadi di mana laju pelepasan panas pembakaran akan menurun. Dalam kondisi ini, nyala api akan berganti dari *ventilation controlled* ke *fuel controlled* di mana api akan mati apabila bahan bakar sudah habis terbakar.

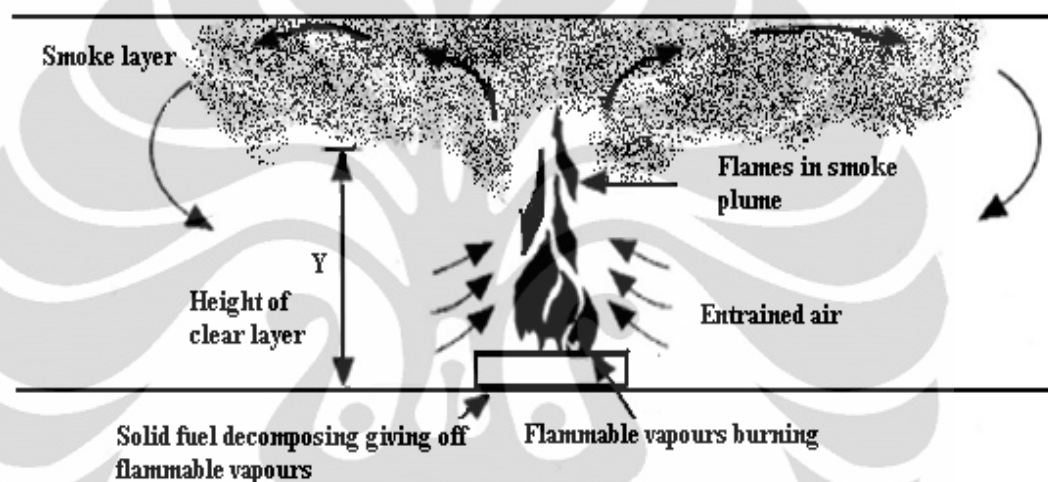
2.4 Asap sebagai Hasil Pembakaran

Asap merupakan salah satu produk hasil pembakaran dari suatu material yang berbahaya bagi manusia karena terdiri dari partikel-partikel uap dan gas serta unsur-unsur yang terurai yang dilepaskan oleh pembakaran suatu material. Kondisi pembakaran di mana asap diproduksi seperti *flaming*, *pyrolysis*, dan *smoldering* merupakan suatu aspek yang menentukan banyaknya dan karakter dari asap. Asap yang diproduksi melalui *flaming combustion* cenderung akan mengandung sejumlah besar elemen karbon. Sedangkan proses *pyrolysis* terjadi pada permukaan bahan bakar yang diakibatkan oleh kenaikan temperatur material yang mungkin disebabkan oleh pemanasan secara radiasi *heat flux*. Pada saat uap mengembang dari permukaan bahan bakar yang termasuk di dalamnya *fuel monomer*, rantai *polymer*, dan produk oksidasi, tekanan uap rendah menyebabkan unsur pokok tersebut dapat terkondensasi dan pembentukan *droplet* asap muncul seperti sinar yang diwarnai asap. Untuk *smoldering combustion*, pembentukan *droplet* asap di mana proses *pyrolysis* membutuhkan sumber panas dari luar. Hanya terdapat beberapa material seperti *cellulosic material* (*wood, paper,*

cardboard, etc) dan *flexible polyurethane foam* yang dapat menghasilkan *smoldering combustion* [2].

2.4.1 Pergerakan Asap

Pada suatu nyala api dalam suatu ruangan, terdapat suatu kolom gas asap panas yang terdapat di atas nyala api tersebut dengan densitas yang lebih rendah dari lingkungannya. Oleh karena itu, asap bergerak keatas dan membentuk cendawan sampai bagian atap dan menyebar secara horizontal keberbagai arah.



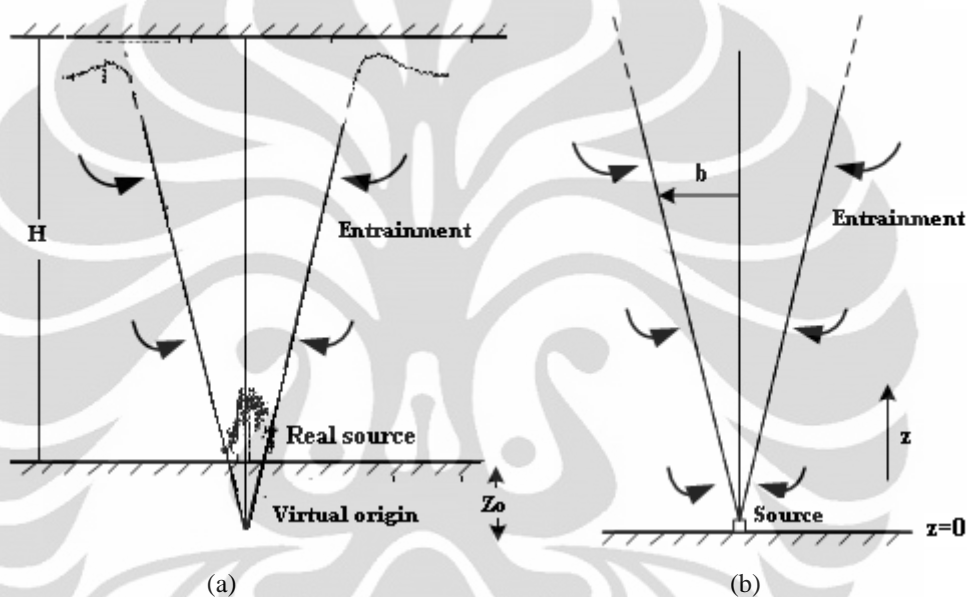
Gambar 2.5 Proses produksi dan pergerakan asap [1]

Pada suatu ruangan yang terdapat nyala api, udara sekitar nyala api mensuplai oksigen untuk proses pembakaran selanjutnya. Apabila sumber oksigen dari udara semakin menipis maka produksi asap akan semakin banyak. Selain panas, asap yang juga dapat menyebar ke lingkungan sekitarnya. Penyebaran asap hasil kebakaran ini dapat menyulitkan proses evakuasi dalam suatu kebakaran karena dapat menghalangi pandangan.

Asap adalah gas panas yang mengapung yang pada dasarnya adalah udara panas yang terkontaminasi yang merupakan salah satu produk pembakaran. Asap mengikuti hukum-hukum dasar mekanika fluida. Jumlah produksi asap dari suatu sumber api berbeda dalam setiap satuan waktu. Jumlah produksi asap bergantung dari ukuran dan panas nyala api yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran.

Sedangkan massa jenis dan komposisi partikel atau racun yang terkandung dalam asap bergantung pada material dari bahan bakar.

Penyebaran asap dalam suatu ruangan bergantung pada geometri dari suatu ruangan yang di lewati oleh asap khususnya terkait dengan peningkatan, keliling, serta tinggi *plume* dari asap tersebut. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya peningkatan gaya turbulensi dari sekeliling *plume* yang memasuki udara. Udara tersebut akan meningkatkan volume asap akan tetapi mengurangi temperatur dari asap tersebut.



Gambar 2.6 Buoyant plume interaction with ceiling (a) *point source* (b) *real source* [1]

Gaya *buoyancy* yang merupakan gaya apung juga sangat berpengaruh pada penyebaran asap dalam ruangan. Gaya apung yang terjadi pada asap berkaitan langsung dengan konveksi alamiah. Dalam suatu sistem, apabila terdapat dua jenis fluida yang berdekatan di mana terjadi perbedaan massa jenis antara kedua fluida tersebut maka gaya apung akan menyebabkan fluida dengan massa jenis yang lebih rendah akan mengapung pada keadaan lingkungan sekitarnya di mana terdapat fluida yang memiliki massa jenis yang lebih besar. *Buoyancy* dari *plume* menggambarkan suatu kolom peningkatan aliran konveksi di atas sumber nyala api di mana temperatur dari *plume* yang berinteraksi dengan lingkungannya bergantung pada besarnya laju pelepasan panas sumber api. Pada Gambar 2.6 (b)

terlihat *buoyant plume* yang berasal dari suatu sumber api yang berinteraksi dengan atap suatu ruangan. Struktur dari *buoyancy plume* dipengaruhi oleh gaya drag terutama viskositas yang diakibatkan oleh interaksi *plume* dengan fluida di lingkungan sekitar *plume*. Besaran relative yang terjadi antara dua gaya yang merupakan rasio gaya apung dengan drag viskositas dinyatakan dalam bilangan Grashof [1], yaitu:

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_\infty - \rho)}{\rho\nu} = \frac{gl^3\beta\Delta T}{\nu^2} \quad (2.11)$$

di mana G_r merupakan bilangan Grashof dan $g(\rho_\infty - \rho)$ merupakan gaya apung per satuan volume.

Pemodelan matematika dari suatu *buoyant plume* sederhana dapat ditunjukkan pada Gambar (a) di mana bentuk dari *buoyant plume* terjadi pada kondisi ideal. Kondisi ini terjadi pada keadaan atmosfer tak hingga dan diameter sehingga bentuk dari pelemahan gaya apung karena adanya drag viskositas akan mengembang dan berbentuk simetris. Bentuk dari *plume* dapat diturunkan secara teoritis melalui persamaan konservasi energi, massa, dan momentum di mana terdapat korelasi fungsional antara temperatur dengan kecepatan aliran asap ke atas serta besarnya sumber panas dan ketinggian atap ruangan.

Konservasi momentum pada kondisi *buoyant plume* ideal pada keadaan atmosfer tak hingga (massa jenis ρ_∞) pada radius b dengan ketinggian z dari sumber api pada temperatur lingkungan yang rendah dan gaya viskositas diabaikan[1], maka:

$$\frac{d}{dz} (\rho_o u_o^2 b^2) \approx g (\rho_o - \rho_\infty) b^2 \quad (2.12)$$

di mana u_o dan ρ_o merupakan kecepatan aliran vertical dan massa jenis *plume* pada ketinggian z dari sumber api. Kemudian, untuk konservasi massa [5]:

$$\frac{d}{dz} (\rho_o u_o b^2) \approx \rho_o v b \approx \rho_o u_o b \quad (2.13)$$

di mana kecepatan udara yang terbawa (v) berbanding lurus dengan kecepatan *plume* dengan arah vertical (u_o). Untuk persamaan energi dapat digambarkan melalui persamaan [5]:

$$c_p \rho_o u_o b^2 \Delta T \approx \dot{Q}_{conv} \quad (2.14)$$

di mana ΔT adalah perbedaan temperatur ambient pada ketinggian z dan \dot{Q}_{conv} adalah panas yang hilang dari *buoyant plume* yang dihasilkan dari sumber panas secara konveksi.

Asap merupakan fluida yang bergerak di mana akan selalu berubah bentuk ketika diberikan suatu tegangan geser. Tegangan geser atau gaya yang memengaruhi pergerakan asap hasil pembakaran merupakan gaya yang dihasilkan oleh gradient tekanan disekitar asap. Gradient tekanan ini disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur antara asap dengan lingkungannya. Penyebaran atau gerakan asap dalam suatu ruangan dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya adalah [1]:

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

2.4.2 Pengukuran Partikulat Asap

Banyaknya partikulat asap hasil pembakaran suatu bahan bakar dapat diperkirakan dengan salah satu metode di bawah ini [1]:

1. Menyaring asap dan menentukan berat dari partikulat dari asap (hanya cocok untuk suatu eksperimen skala kecil)
2. Mengumpulkan asap pada suatu ruangan yang telah diketahui volumenya dan tentukan *optical density* dari asap tersebut (hanya untuk eksperimen skala kecil dan menengah)
3. Mengalirkan asap pada suatu saluran dan ukurlah *optical density* asap secara berkesinambungan terhadap waktu untuk mendapatkan pengukuran partikulat asap total.

Pada suatu kebakaran dalam ruangan, sejumlah asap dan gas berbahaya yang dihasilkan akan mengapung menuju atap ruangan tersebut. Asap tersebut

akan membentuk suatu lapisan asap pada atap ruangan tersebut. *Mass flow rate* (kg/s) dari lapisan asap pada ketinggian tertentu dari bagian bawah ruangan dapat diketahui dengan rumusan sebagai berikut[1]:

$$\dot{m} = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3} [1 + 0.026 \dot{Q}_c^{2/3} z^{-5/3}] \quad (2.15)$$

di mana \dot{Q}_c merupakan laju pelepasan panas bahan bakar (kW), z adalah ketinggian daerah yang diukur dari bagian bawah ruangan (m).

Dengan mengetahui besarnya *mass flow rate* pada suatu daerah dengan ketinggian tertentu pada ruangan maka dapat dihitung besarnya laju aliran *volumetric* dari asap yang dapat diperkirakan besarnya massa jenis udara diketahui. Welty et al. (1976) menyatakan bahwa besarnya massa jenis udara $\rho_{air} = 1.038 \text{ kg/m}^3$ pada suhu 67°C (340 K), di mana[1]:

$$\dot{V}_s = \frac{\dot{m}}{\rho_{air}} \quad (2.16)$$

Pengukuran optical density dilakukan dengan melakukan pengukuran terhadap pengurangan intensitas cahaya dari suatu beam yang diakibatkan oleh lewatnya partikel asap pada daerah beam tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Gambaran peralatan yang dibutuhkan dalam pengukuran *optical density* [1]

Pada keadaan awal di mana belum terdapat asap, intensitas cahaya yang dihasilkan oleh *power source* akan sama dengan intensitas cahaya yang diterima oleh *receiver* maka nilai intensitas yang terukur adalah I_0 . Nilai intensitas cahaya akan berkurang apabila terdapat asap dengan ketebalan tertentu yang melewati daerah cahaya diantara *power source* dan *receiver*. Nilai intensitas cahaya yang

terukur adalah I_x di mana pengurangan nilai tersebut disebabkan oleh adanya suatu ketebalan asap yang menghalangi sampainya cahaya dari *power source* menuju *receiver*. Hubungan antara I_o dan I_x yang dijelaskan pada Bouger's Law[2]:

$$I_x = I_o \exp(-KL) \quad (2.17)$$

di mana K adalah koefisien absorpsi dan L adalah jarak sinar yang dilalui oleh asap. Sedangkan besarnya nilai *optical density* (OD) yaitu[2]:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{I_o}{I_x} \right) = KL \quad (2.18)$$

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

$$T = \left(\frac{I_x}{I_o} \right) = \left(1 - \frac{N}{100} \right) \quad (2.19)$$

di mana T merupakan persentase transmisi cahaya yang dapat diterima oleh *receiver* (%) dan N adalah nilai persentase opasitas asap yang lewat (%). Dengan mensubstitusi persamaan (2.16) dan persamaan (2.17) maka didapatkan korelasi antara transmisi cahaya dengan *optical density*, yaitu:

$$T = \exp(-OD) \quad (2.20)$$

Dari persamaan (2.18) tersebut didapatkan nilai *optcal density* dari suatu asap adalah:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.21)$$

Dari Persamaan dapat diketahui bahwa nilai *optical density* dari asap berbanding lurus dengan jarak cahaya yang dilewati asap dan ketebalan asap yang melewati cahaya tersebut. Untuk mengetahui dalam suatu ruangan tertentu dapat ditentukan dengan[2]:

$$m = \frac{K}{K_m} \quad (2.22)$$

di mana K_m merupakan sifat ekstensif yang dapat dinyatakan sebagai produk dari koefisien absorpsi dalam satuan massa (m^2g^{-1}). Dengan mengetahui besarnya konsentrasi asap dalam ruangan maka dapat diketahui massa asap (gram) yang terdapat dalam ruangan[2]

$$M_s = V_r \times m \quad (2.23)$$

di mana V_r adalah volume ruangan (m^3). Dari besarnya massa asap maka dapat ditentukan besarnya nilai *soot yield* (gg^{-1}) yaitu[2]:

$$Y_s = \frac{M_s}{M_b} \quad (2.24)$$

di mana M_b adalah massa bahan bakar yang terbakar (g).

2.5 Fenomena Kebakaran

Kebakaran adalah bahaya yang diakibatkan oleh adanya ancaman potensial dan derajat terkena pancaran api sejak awal terjadinya kebakaran hingga penjalaran api, asap, dan gas yang ditimbulkan[4]. Penjalaran asap dan api dalam peristiwa kebakaran tidak terkendali dan terprediksi. Besarnya nyala api dan produksi asap bergantung pada banyaknya material yang terbakar. Semakin banyak material yang terbakar maka akan semakin banyak pula api, asap, dan gas yang ditimbulkan.

Dalam peristiwa kebakaran, terdapat beberapa jenis api di mana perbedaan antara jenis api tersebut terletak pada sumber bahan bakar yang terbakar. Sumber bahan bakar yang terbakar akan menentukan alat pemadam api yang sesuai dengan jenis kebakaran yang terjadi.

2.5.1 Kelas Kebakaran

Peristiwa kebakaran di Indonesia dapat dibagi menjadi beberapa kelas apabila ditinjau dari material yang terbakar dapat dilihat pada Tabel 2.5[4]:

Tabel 2.3 Kelas kebakaran

Kelas Kebakaran	Keterangan	Penanggulangan Api
Kelas A	Material yang terbakar dalam kebakaran kelas ini merupakan benda-benda padat, misalnya kayu, kertas, dan lain-lain	Karung goni yang dibasahi air, pasir, dan alat pemadam api ringan (APAR) atau racun api tepung kimia kering
Kelas B	Material yang terbakar dalam kebakaran kelas ini berbentuk cairan yang mudah terbakar merupakan benda-benda	Pasir dan APAR atau racun api tepung kimia kering
Kelas C	Sumber api disebabkan oleh listrik	APAR atau racun api tepung kimia kering
Kelas D	Material yang terbakar berupa material logam yang dapat memicu terjadinya kebakaran kelas A	Racun api tepung kimia kering
Kelas K	Material yang terbakar berasal dari minyak goreng	Racun api tepung kimia kering

2.5.2 Sistem Penanggulangan Kebakaran

Peraturan tentang kriteria keselamatan, kesehatan, kenyamanan, serta kemudahan di dalam bangunan suatu gedung telah diatur dalam Undang-Undang Republik Indonesia No. 28 tahun 2002. Penerapannya dalam hal desain ruang, struktur, mekanikal, elektrik, serta arsitektur harus dapat memenuhi persyaratan tersebut. Semua aspek yang terdapat dalam gedung harus terintegrasi dengan baik sehingga memenuhi kriteria keselamatan, kesehatan, kenyamanan, serta kemudahan dalam pemakaian suatu gedung.

Sistem penanggulangan kebakaran merupakan suatu upaya pencegahan kebakaran yang harus ada suatu gedung. Dengan adanya sistem penanggulangan kebakaran maka kriteria keselamatan dan kemudahan dalam aspek evakuasi apabila terjadi kebakaran telah terpenuhi. Tujuan dari perancangan suatu sistem penanggulangan kebakaran adalah untuk menyelamatkan jiwa manusia dan meminimalisasi kerusakan yang diakibatkan oleh peristiwa kebakaran.

Implementasi dari sistem tersebut terhadap tindakan penanggulangan kebakaran dapat di bagi menjadi empat bagian utama, yaitu:

1. Menyelamatkan jiwa manusia
2. Menyelamatkan barang-barang yang ada
3. Meminimalisasi kerusakan yang ada
4. Menjadi pedoman dalam proses penanggulangan dan pengendalian kebakaran

Pengelolaan dalam suatu sistem penanggulangan kebakaran harus dilakukan dengan baik. Kegiatan tersebut dimulai dengan pengenalan terhadap sumber api yang berpotensi menyebabkan terjadinya kebakaran. Pengetahuan tersebut akan sangat membantu dalam menentukan metode pemadaman api yang paling sesuai dengan jenis kebakaran.

2.6 Kabut Air

2.6.1 Pendahuluan

Kabut air diartikan sebagai suatu proteksi terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh api dengan penyemprotan air di mana ukuran *droplet*-nya lebih kecil dari 1000 μm (microns)[9]. Istilah kabut air di ambil dari National Fire Protection Association Committee, NFPA 750, *Standard for Water Mist Fire Protection Systems* 2000 edition, pada awal tahun 1990 sebagai pembaharuan dalam efisiensi penggunaan air dalam pemadaman api[15].

Kabut air dapat didefinisikan sebagai suatu *water spray* di mana[15]:

1. Rata-rata diameter *droplet* air sebesar 80-200 μm dan 99 % volume *droplet* memiliki besaran rata-rata 500 μm (Grant et al, 2000)
2. Rata-rata ukuran *droplet* di bawah 100 μm (Lentati and Chelliah, 1998)

Selain itu, ukuran diameter suatu *droplet* kabut air dalam sumber lain dinyatakan memiliki ukuran diameter 50 μm . Hal tersebut dapat terlihat pada Tabel 2.4:

Tabel 2.4 Perbandingan antara bentuk *droplet* sesuai dengan diameter[20]

Radius <i>Droplet</i>	Deskripsi
10	<i>Fog</i>
50	<i>Mist</i>
100	<i>Spray</i>
500	Hujan

Sistem perlindungan terhadap bahaya kebakaran dengan menggunakan sistem kabut air biasanya dipasang tetap pada suatu instalasi bangunan gedung yang berfungsi untuk mengontrol dan menahan laju panas dan asap hasil kebakaran. Suatu sistem kabut air biasanya dikorelasikan dengan sistem proteksi pasif kebakaran seperti *smoke detector* atau sistem pendeteksi api dalam satu sistem instalasi. Pada saat terjadi kebakaran dalam ruangan, asap atau panas hasil kebakaran akan di deteksi oleh sistem proteksi pasif kebakaran yang dapat memberikan suatu perintah kepada sistem kabut air untuk dapat bekerja. Pada saat beroperasi, sistem kabut air akan mengeluarkan *droplet* air dengan ukuran yang sangat kecil sehingga efisiensi penggunaan air dan penyerapan panas pada suatu sistem dapat ditingkatkan dan merupakan salah satu kelebihan sistem kabut air. Beberapa kelebihan lain dari penggunaan kabut air dibandingkan dengan sistem pemadam kebakaran konvensional yang ada sekarang, yaitu:

1. Sistem kabut air menggunakan media air sehingga tidak menimbulkan bahaya keracunan atau sesak napas.
2. Penggunaan media air dalam sistem kabut air tidak merusak lingkungan
3. Biaya penyediaan air sebagai bahan kabut air lebih murah dibandingkan dengan alat pemadam api ringan (APAR)
4. Konsistensi dalam hal biaya pemakaian
5. Akses air yang mudah untuk diperoleh
6. *Droplet* dari kabut air yang kecil sehingga relatif lebih aman bagi komponen listrik dan peralatan yang sensitif terhadap air

Selain itu, sistem kabut air juga memiliki kelebihan dibandingkan dengan sistem sprinkler konvensional, kelebihan tersebut diantaranya adalah:

1. Memiliki laju aliran air yang lebih rendah sehingga mengurangi konsumsi air dan sisa air yang terpakai pada waktu penggunaan yang sama
2. Ukuran *droplet* dari kabut air yang sangat kecil sehingga menghindarkan terjadinya *Boilover* pada kebakaran dengan bahan bakar cair
3. Perbedaan ukuran *droplet* menyebabkan risiko kerusakan pada peralatan listrik maupun peralatan lain yang sensitif terhadap air dapat dikurangi

Sistem kabut air juga memiliki beberapa kekurangan diantaranya adalah biaya instalasi yang relative lebih mahal jika dibandingkan dengan sistem pemadam kebakaran lain.

2.6.2 Pembuatan *Spray Droplet* dan Distribusi Ukuran *Droplet Air*

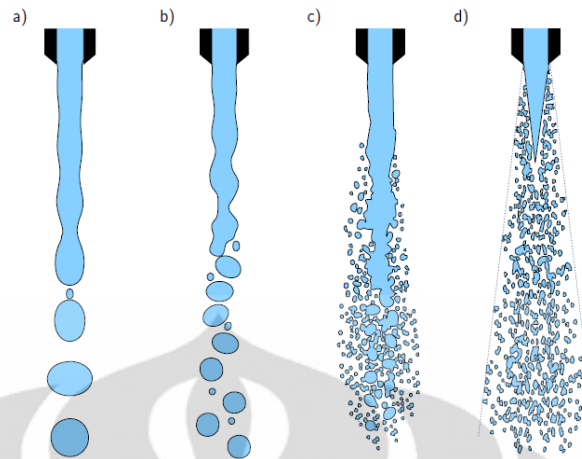
Spray droplet dalam sistem kabut air dapat dibentuk dengan tiga cara, yaitu:

1. *Impingement nozzle*
2. *Twin-fluid nozzle*
3. *Pressure jet nozzle*

Dalam penelitian ini, pembentukan menggunakan cara yang ketiga, yaitu dengan *pressure jet nozzle*. Pembentukan *spray droplet* langsung dari aliran turbulen jet melalui penyemprotan air (*break-up*). Terdapat dua cara utama dalam penyemprotan air (*break-up*)[15]: *bag break-up* dan *stripping break-up*. Dalam model *bag break-up*, satu *droplet* terpisah menjadi dua atau lebih *droplet* baru dengan ukuran masing-masing *droplet* yang hampir sama. Dalam model *stripping break-up*, *droplet* dengan ukuran kecil terpisah dari permukaan *droplet* dengan ukuran yang lebih besar.

Terdapat empat cara untuk membuat *spray droplet* dari jet air, yaitu[15]:

1. Dengan aturan “Rayleigh break-up” di mana *droplet* air dibentuk jauh dari ujung *nozzle* dengan diameter *droplet* yang dihasilkan lebih besar daripada diameter *orifice nozzle*
2. Dengan cara “First wind-induce break-up” yaitu suatu cara pembentukan *droplet* air di mana *droplet* yang dibentuk memiliki ukuran yang hampir sama dengan ukuran diameter *orifice nozzle*
3. Dengan cara “Second wind-induce break-up” di mana pemencaran *droplet* air terjadi dekat di bawah aliran sekitar *nozzle* dan diameter *droplet* yang dihasilkan lebih kecil daripada diameter *orifice nozzle*
4. Dengan cara *Atomisasi* yaitu pembentukan *droplet* air yang di mulai dari dari *orifice nozzle* tempat keluar *droplet* yang disebabkan ukuran dan tekanan yang diberikan pada air. Diameter *droplet* air yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan diameter *orifice nozzle*.



Gambar 2.8 Pembentukan *droplet* air (a) *Rayleigh break-up*, (b) *First wind-induced break-up*, (c) *Second wind-induced break-up*, (d) *Atomisasi*[15]

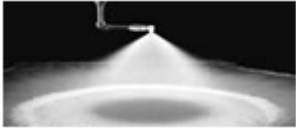

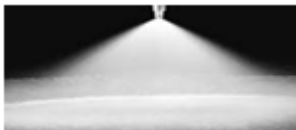

Dalam suatu pembentuk *spray droplet*, terdapat tiga kategori tekanan yang digunakan, yaitu[9]:

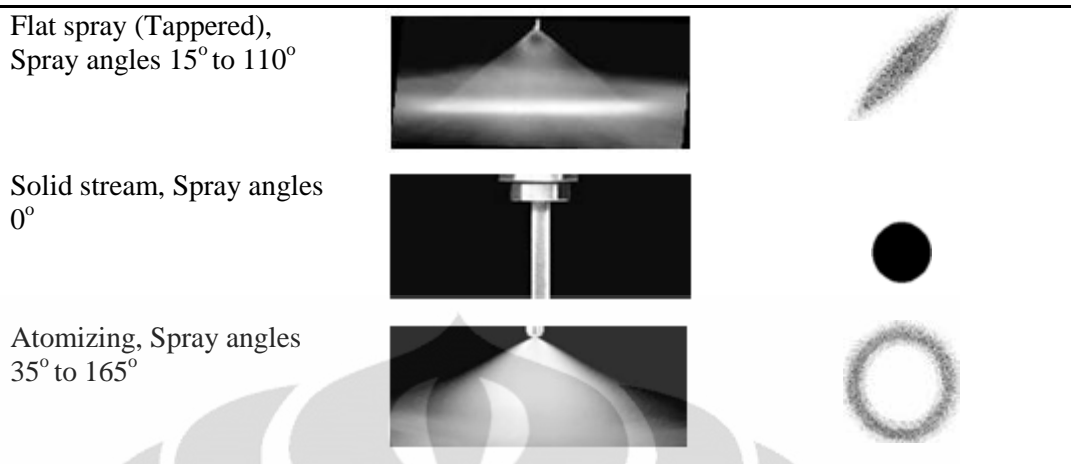
1. *Low pressure water mist system* di mana tekanan sistem kurang atau sama dengan 12.5 bar ($P \leq 12.5$ bar)
2. *Medium pressure water mist system* di mana tekanan sistem diantara 12.5 sampai 35 bar ($12.5 \text{ bar} < P < 35 \text{ bar}$)
3. *High pressure water mist system* di mana tekanan sistem lebih besar atau sama dengan 35 bar ($P \geq 35$ bar)

2.6.3 Tipe *Nozzle* dan Pola Penyebarannya

Tipe *nozzle* beserta pola penyebaran kabut air dapat terlihat pada Tabel 2.5[24]

Tabel 2.5 Tipe *nozzle* dan pola penyebaran *droplet* air

Tipe <i>nozzle</i>	Gambar	Penyebaran <i>Spray</i>
Hollow cone (whirl chamber type), <i>Spray</i> angles 40° to 165°		
Full cone, <i>Spray</i> angles 15° to 125°		



2.6.4 Mekanisme Pemadaman dari Sistem Kabut Air

Efektivitas kabut air sebagai salah satu alat pemadam kebakaran dinilai sangat baik dalam pemadaman suatu kebakaran. Sejumlah mekanisme pemadaman dengan menggunakan kabut air telah banyak diteliti untuk mengembangkan pemakaian kabut air. Mekanisme ini bergantung pada tipe dari api yang dipengaruhi oleh jenis bahan bakar, ukuran api, dan sebagainya. Mawhinney et al.,[10] menggambarkan tiga mekanisme utama dan dua mekanisme sekunder dari pemadaman dan penindihan nyala api berbahan bakar hidrokarbon. Tiga mekanisme utamanya yaitu:

1. Pendinginan fase gas
2. Pengurangan oksigen dan pengurangan penguapan material *flamable*
3. Pendinginan permukaan bahan bakar

dan mekanisme sekunder, yaitu:

1. Pelemahan radiasi api
2. Efek kinetik

Mekanisme pemadaman dipergunakan untuk pemadaman nyala api untuk kelas kebakaran A berbahan bakar cair dan kelas kebakaran B dengan bahan bakar padat. Mekanisme utama dalam pemadaman nyala api karena sistem kabut air:

- Pendinginan fase gas

Air memiliki panas laten yang sangat besar yaitu sekitar (2270 kJ/kg) dan penguapan air memiliki spesifik panas yang paling tinggi diantara gas yang ada di

atmosfer bumi. Evaporasi air akan mengurangi temperatur udara lingkungan. Apabila hal ini terjadi dekat pada suatu nyala api maka akan mengganggu dinamika api. Pada suatu bahan bakar padat dan cair, hal ini merupakan suatu reaksi panas dari suatu api yang disebabkan oleh volatilisasi bahan bakar. Pengurangan temperatur ini juga menyebabkan pengurangan jelaga (*soot*) yang dihasilkan dari proses pembakaran. Hal tersebut sangat penting karena radiasi dari partikel jelaga yang memiliki temperatur tinggi merupakan suatu bentuk dari reaksi panas yang dihasilkan dari api.

- Pengurangan oksigen dan pengurangan penguapan material *flammable*

Pengurangan oksigen dapat terjadi secara lokal dan menyeluruh pada suatu sistem. Pengurangan oksigen pada daerah lokal terjadi ketika *droplet* air masuk ke dalam reaksi pembakaran. Evaporasi yang dihasilkan oleh *droplet* air akan mengganggu masuknya oksigen ke dalam suatu reaksi pembakaran sehingga mengganggu kesetimbangan api.

- Pendinginan permukaan bahan bakar

Droplet air yang masuk ke permukaan suatu bahan bakar padat yang terbakar akan mendinginkan permukaan bahan bakar tersebut. Hal ini mengurangi laju volatilisasi bahan bakar dan menghalangi penyebaran api.

Mekanisme sekunder dalam pemadaman nyala api karena sistem kabut air:

- Pelemahan radiasi api dan efek kinetik

Kabut air dan uap air mengurangi radiasi *heat flux* ke suatu objek yang dekat dengan api di mana juga membantu pencegahan penyebaran api ke bahan bakar yang belum terbakar. Pengurangan efek radiasi merupakan hasil dari pendinginan fase gas dan kenaikan konsentrasi penguapan air diantara api dan bahan bakar. Sedangkan kabut air memiliki pengaruh efek kinetik dari pertumbuhan api kepada pemadaman api. Efek kinetik yang berpengaruh pada pemadaman api merupakan hasil dari pendinginan fase gas dan pengurangan oksigen untuk reaksi pembakaran.

2.7 Fire Dynamic Simulator (FDS)

Fire Dynamic simulator (FDS) merupakan model *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk fire-driven fluid flow yang dikembangkan oleh National Institute of Standards and Technology (NIST). Dalam model ini, partikel Lagrangian digunakan untuk mensimulasikan pergerakan asap, semburan sprinkler maupun semburan bahan bakar. Software ini menyelesaikan secara numerik persamaan Navier-Stokes yang di peruntukkan untuk lowspeed dan thermally-driven flow pada pergerakan asap dan perpindahan panas dari api [3]. Inti dari algoritmanya merupakan suatu bentuk eksplisit dari *predictor-corrector* dari kejadian yang akurat dalam satuan ruang dan waktu. Pendekatan turbulensi menggunakan *Large Eddy Simulation* dan memungkinkan untuk menampilkan *Direct Numerical Simulation* jika ukuran grid cukup baik[3].

2.7.1 Hydrodynamics Model

FDS dapat memecahkan secara numerik suatu bentuk dari persamaan Navier-Stokes secara tepat untuk *low-speed*, suatu aliran termal dengan penekanan pada penyebaran asap dan perpindahan panas dari nyala api. Inti algoritma dalam FDS digunakan untuk memprediksi dan mengoreksi suatu skema dalam suatu ruang dan waktu. Turbulensi dalam simulasi ini di perlakukan sebagai suatu bentuk *Smargonski* dari *Large Eddy Simulation* (LES). Komputasi dalam FDS dapat menggunakan *Direct Numerical Simulation* (DNS) yang merupakan suatu bentuk komputasi pelepasan grid dari suatu subjek secara langsung dan *Large Eddy Simulation* (LES) dimana dalam model ini large-scale eddies dikomputasikan secara langsung dan untuk bentuk sub-grid scale proses pelepasan grid dari suatu subjek dilakukan secara berangsur-angsur. Pemilihan dalam penggunaan bentuk LES maupun DNS bergantung pada objektifitas dari perhitungan dan resolusi dari komputasi pemakaian grid dalam suatu simulasi. Dalam suatu bentuk simulasi pergerakan asap dalam skala besar dan memiliki ruangan yang cukup banyak dalam suatu gedung maka tidak memungkinkan memakai bentuk DNS dalam proses pembakaran dan pergerakan produk hasil pembakaran. Akan tetapi, untuk eksperimen tertentu dalam skala kecil, bentuk

DNS dapat digunakan untuk komputasi secara langsung suatu proses pembakaran dan pergerakan produk hasil pembakaran[3].

2.7.2 Model Pembakaran

Combustion model pada simulasi FDS didasarkan pada *mixture fraction* model pembakaran dari suatu material yang merupakan suatu jumlah skalar yang didefinisikan sebagai suatu fraksi gas yang dimasukkan pada file input yang diasumsikan sebagai bahan bakar. Model ini di asumsikan sebagai suatu pembakaran pada campuran yang terkontrol dimana reaksi dari bahan bakar dan oksigen berlangsung dengan cepat. Fraksi massa dari reaktan dan produk diperoleh dari fraksi campuran dengan menggunakan prinsip “*state relations*” yang merupakan kombinasi dari analisis dan pengukuran yang telah disederhanakan[3].

2.7.2.1 Pertumbuhan dan Penyebaran Api

Simulasi FDS dapat digunakan untuk menganalisis laju pelepasan panas (HRR) pada suatu kebakaran. Besarnya HRR dalam suatu kebakaran dipengaruhi oleh laju perpindahan panas dan luas permukaan dari produk yang terbakar. Dalam hal ini, suatu model dapat memprediksi kecepatan aliran dan temperatur dengan akurasi mencapai 5 % sampai 20 % dari pengukuran yang dilakukan dalam suatu eksperimen, yang bergantung pada ukuran grid yang digunakan dalam simulasi tersebut[3]. Bagaimanapun juga, suatu skenario kebakaran dimana besarnya HRR hanya dapat diprediksikan dan tidak dapat ditentukan berapa besarnya HRR dalam kebakaran tersebut yang disebabkan ketidakpastian yang cukup besar dari suatu model dalam menggambarkan suatu keadaan. Hal tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah:

1. *Properties* dari suatu material dan bahan bakar pada kondisi aktual sering kali sulit untuk dapat diketahui
2. Proses fisik dari pembakaran, perpindahan panas baik secara radiasi, konveksi dan konduksi lebih rumit representasi matematik yang terdapat dalam FDS yang sensitif terhadap parameter dalam bentuk numerik maupun fisik.

Pemodelan dengan menggunakan FDS membutuhkan tingkat keterampilan dan penilaian yang baik dari pengguna dari suatu penyebaran asap dan panas pada simulasi suatu peristiwa kebakaran.

2.7.3 Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi termasuk ke dalam model dari suatu persamaan radiasi untuk *non-scattering gray gas*, dan dalam beberapa kasus menggunakan *wide band model*. Persamaan ini diselesaikan dengan menggunakan teknik yang sama dengan Finite Volume Method (FVM) untuk suatu perpindahan panas secara konveksi[3].

Terdapat beberapa keterbatasan dari model ini, yaitu:

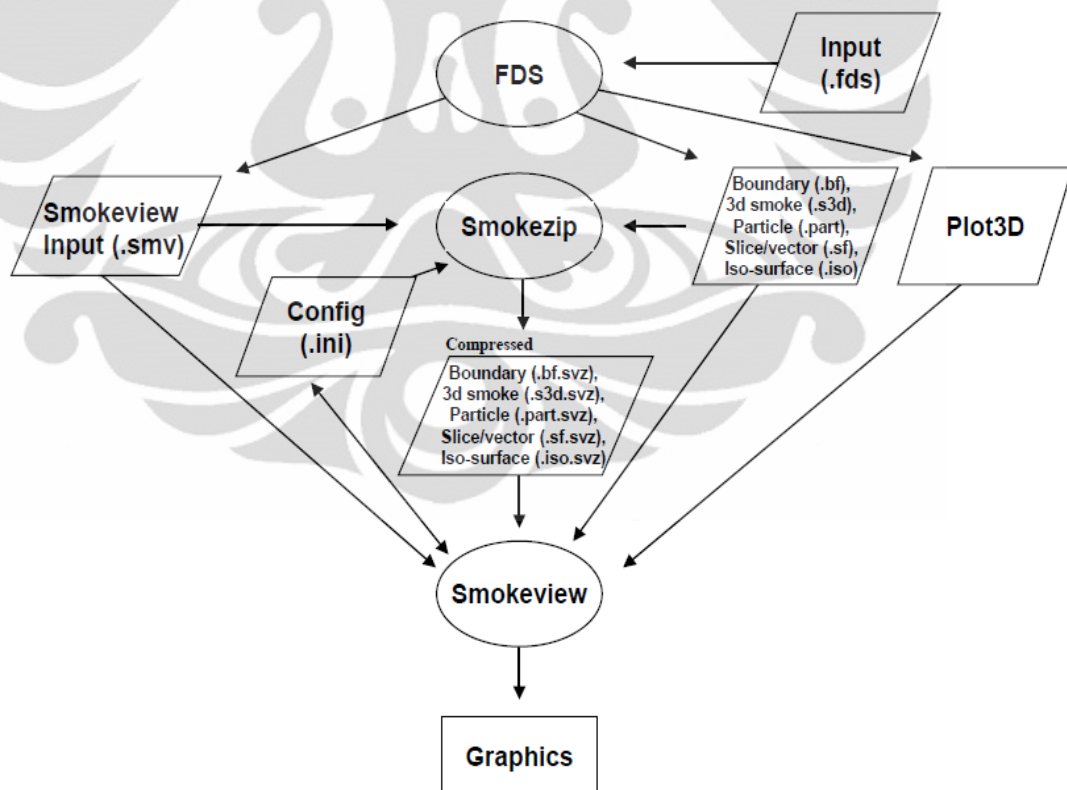
1. *Absorption coefficient* untuk *smoke-laden gas* merupakan suatu fungsi yang kompleks dari komposisi dan temperatur suatu gas. Hal ini disebabkan oleh penyederhanaan model pembakaran, komposisi kimia dari komposisi asap hasil pembakaran, terutama pada *soot* (jelaga) asap yang berakibat pada penyerapan dan emisi panas radiasi.
2. Perpindahan panas radiasi terbagi melalui sekitar 100 sudut solid. Untuk suatu target yang letaknya jauh dari sumber radiasi, seperti pada suatu nyala api, dapat mengakibatkan distribusi panas radiasi yang tidak seragam. Hal ini dapat terlihat pada suatu visualisasi suhu permukaan suatu benda dimana penyebaran panas akan dipengaruhi oleh banyaknya sudut pada suatu permukaan benda. Permasalahan ini dapat dikurangi dengan menambah jumlah grid pada suatu benda agar lebih solid akan tetapi hal tersebut akan menambah waktu komputasi dari suatu simulasi.

2.7.4 Data Masukan dan Hasil dalam Suatu Simulasi FDS

Program Fire Dynamic Simulator ini membaca parameter masukan dari *text file*, menghitung solusi numeric dengan persamaan atur, dan membuat output file sebagai definisi hasil dari input file. Beberapa data masukan dalam simulasi FDS diantaranya adalah[3]:

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

FDS melakukan pendekatan geometri sebagai suatu persamaan dari satu atau lebih rectangular grid. Perpindahan massa dan panas dari suatu solid surface disimulasikan melalui korelasi empiris. Pengaktifan *nozzle* pada suatu sistem kabut air dimodelkan dengan korelasi terhadap waktu, panas, dan variabel lain yang terdeteksi oleh suatu device.



Gambar 2.9 Alur kerja *Fire Dynamic Simulator*, *Smokezip*, dan *Smokeview* [3]

File Output dari simulasi FDS berupa temperatur, konsentrasi, dan perkembangan api pada domain tertentu sesuai dengan *input file*. Animasi perkembangan api tidak dapat ditampilkan langsung melalui FDS, akan tetapi dapat ditampilkan menggunakan Smokeview.

Tipe output dalam simulasi FDS dalam fase gas diantaranya adalah:

1. Temperatur gas
2. Kecepatan gas
3. Tekanan
4. HRR per unit volume
5. Fraksi campuran bahan bakar (rasio udara-bahan bakar)
6. Massa jenis gas
7. Massa *droplet* air dalam satuan volume

Pada suatu permukaan solid, FDS memprediksikan hasil dari suatu hubungan kesetimbangan energi antara fase solid dan gas, diantaranya adalah:

1. Temperatur permukaan solid
2. Heat flux, baik radiasi maupun konveksi
3. Burning rate
4. Massa *droplet* air dalam suatu area

Dalam simulasi FDS juga dihasilkan besaran secara umum untuk suatu pemodelan, diantaranya adalah:

1. Total heat release rate (HRR)
2. Waktu pengaktifan *sprinkler*, *nozzle*, dan detektor
3. Massa dan fluks energi yang melalui suatu bentuk solid

2.8 Analisis Dimensional dan Keserupaan

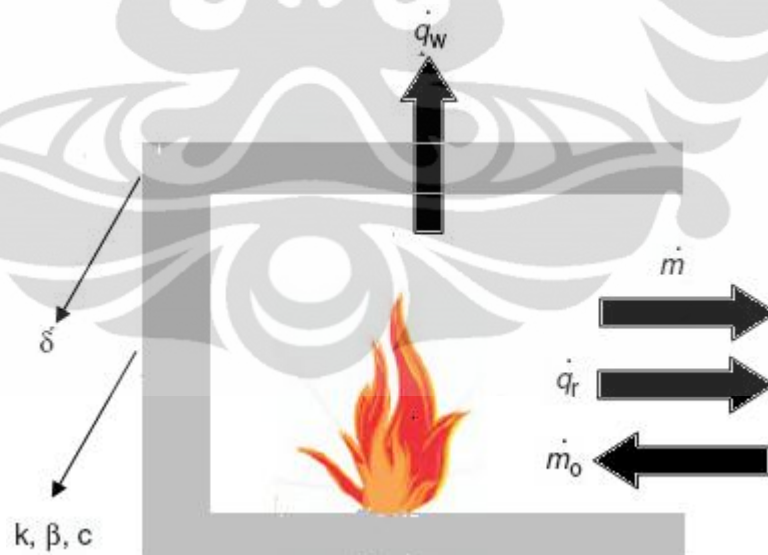
Pendekatan keserupaan digunakan untuk menganalisis suatu fenomena yang terjadi yang akan dijadikan suatu bahan eksperimen dalam skala yang lebih kecil dengan menggunakan suatu bilangan yang tak berdimensi. Terdapat banyak faktor yang mendorong berkembangnya pemodelan dalam suatu eksperimen di mana salah satu faktornya adalah biaya eksperimen dengan melakukan pemodelan lebih kompetitif dibandingkan dengan eksperimen tanpa pemodelan. Selain itu,

fenomena yang terjadi pada suatu model lebih mudah dikontrol sehingga lebih mudah untuk mendapatkan data yang dibutuhkan dalam suatu eksperimen.

Analisis dimensional dan keserupaan dilakukan untuk mengetahui fenomena pada suatu keadaan tanpa melakukan pengamatan terhadap objek tersebut akan tetapi cukup dengan melakukan pengamatan pada *prototype* dari keadaan sesungguhnya.

2.8.1 Analisis Keserupaan Model

Untuk mengetahui mekanisme yang tepat dari pengaruh tirai air terhadap distribusi asap dan temperature yang disebabkan pembakaran *pool fire* dalam suatu ruangan, dipergunakan suatu analisis keserupaan model untuk mengurangi biaya penelitian dan mengakomodasi tempat yang tersedia dengan kebutuhan eksperimental. Analisis keserupaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *reduce-scale compartment fire*[12]. Pada Gambar 2.10 terlihat suatu ilustrasi yang menggambarkan fenomena yang terjadi pada pembakaran dalam suatu ruangan.



Gambar 2.10 Analisis keserupaan model kebakaran kompartemen[12]

Dari Gambar kita dapat mengetahui beberapa variable terkait dalam bentuk bilangan tak berdimensi

1. Heat generation rate

Korelasi heat generation dengan bilangan tak berdimensi dapat mempergunakan *Zukoski number* yaitu[5]:

$$\Pi_1 = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{gl}^{5/2}} \quad (2.25)$$

Dari bilangan tak berdimensi di atas maka di peroleh suatu hubungan antara heat generation rate terhadap skala yang digunakan adalah $\dot{Q} \approx l^{5/2}$.

2. Heat loss

Heat loss yang terjadi pada suatu kebakaran dalam ruangan dapat terjadi melalui dinding ruangan dan ventilasi yang terdapat pada suatu ruangan. Heat loss pada suatu ventilasi dapat di rumuskan menjadi[5]:

$$\dot{q}_v = A_{vent} \sigma_g [\varepsilon_g (T^4 - T_{\infty}^4) + (1 - \varepsilon_g) (T_w^4 - T_{\infty}^4)] \quad (2.26)$$

di mana ε merupakan *emissivity* yang apabila diasumsikan dinding hitam sempurna (*black body*)

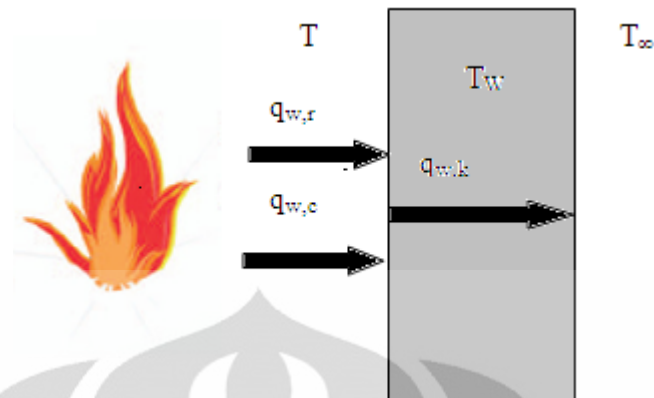
$$\varepsilon_g \approx 1 - e^{-\kappa S} \quad (2.27)$$

Dari persamaan diatas maka didapatkan suatu hubungan bilangan tak berdimensi heat loss melalui ventilasi oleh radiasi benda hitam sempurna

$$\Pi_2 = \kappa l \quad (2.28)$$

maka dapat di peroleh suatu hubungan bilangan tak berdimensi untuk heat loss pada ventilasi adalah $\kappa \approx l^{-1}$

Selain itu, *heat loss* juga terjadi melalui dinding kompartemen ke lingkungan sekitar. Perpindahan panas terjadi secara radiasi, konveksi, dan konduksi.



Gambar 2.11 Heat loss melalui dinding kompartemen[12]

Dari Gambar maka dapat diperoleh persamaan untuk perpindahan panas pada dinding kompartemen, yaitu[5]:

$$\dot{q}_w = \dot{q}_{w,k} = \dot{q}_{w,r} = \dot{q}_{w,c} \quad (2.29)$$

Dengan perumpamaan dinding hitam sempurna (*black body*) maka besarnya radiasi dapat dirumuskan menjadi[5]:

$$q_r \approx \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4) A_w \quad (2.30)$$

Dari persamaan tersebut maka dapat diperoleh bilangan tak berdimensi yang merupakan rasio antara radiasi dari api dengan *enthalpy flow*[5]

$$\Pi_3 = \frac{\sigma T_\infty^3}{\rho_\infty c_p \sqrt{g l}} \quad (2.31)$$

Maka didapatkan hubungan skala geometri untuk perpindahan panas radiasi pada kebakaran kompartemen adalah $T_\infty \approx l^{1/6}$

Untuk perpindahan panas secara konveksi antara nyala api dengan dinding kompartemen dapat dirumuskan menjadi[5]:

$$\dot{q}_c \approx h_c A_w (T - T_w) \quad (2.32)$$

dari persamaan di atas maka dapat diketahui bilangan tak berdimensi yang merupakan rasio antara perpindahan panas secara konveksi dengan *enthalpy flow*[5]

$$\Pi_4 = \frac{h_c}{\rho_c C_p \sqrt{gl}} \quad (2.33)$$

dari bilangan tak berdimensi tersebut maka di dapatkan hubungan skala geometri untuk perpindahan panas secara konveksi pada dinding kompartemen adalah $h_c \approx l^{1/2}$.

Untuk perpindahan panas secara konduksi yang terjadi pada dinding kompartemen dapat dirumuskan menjadi[5]:

$$\dot{q}_k = \frac{k_w A_w (T_w - T_\infty)}{\delta_T} \quad (2.34)$$

dari persamaan di atas maka dapat diketahui bilangan tak berdimensi yang merupakan rasio antara perpindahan panas secara konduksi dengan *enthalpy flow*

$$\Pi_5 = \frac{(k\rho c)_w^{1/2}}{\rho_\infty c_p g^{1/4} l^{3/4}} \quad (2.35)$$

$$\Pi_6 = \left(\frac{\rho c}{k}\right)_w^{1/2} \left(\frac{g}{l}\right)^{1/4} \delta_w \quad (2.36)$$

Dari persamaan 1 dan 2 maka akan didapatkan hubungan skala geometri untuk perpindahan panas secara konduksi pada dinding kompartemen akibat panas radiasi dan konveksi api adalah $(k\rho c)_w \approx l^{3/2}$ dan $\delta_w \approx l^{1/4}$.

Dengan melakukan pendekatan untuk *heat loss* pada suatu kebakaran kompartemen yaitu[5]:

$$\dot{q}'' \approx \left(\frac{k_w}{\delta_w}\right) T \approx l^0 \quad (2.37)$$

Maka korelasi antara *heat loss* pada suatu kebakaran kompartemen adalah $T \approx l^0$, $\delta_w \approx l^{1/4}$, dan $k_w \approx \rho_w \approx l^{1/4}$.

Untuk penskalaan terhadap waktu pada suatu eksperimen dapat menggunakan bilangan tak berdimensi[5]

$$\Pi_7 = \frac{t}{\sqrt{l/g}} \quad (2.38)$$

dari bilangan tak berdimensi tersebut maka di dapatkan hubungan skala geometri untuk waktu yang digunakan pada eksperimen yaitu $t \approx l^{1/2}$.

Tabel 2.6 *Scaling correlation* eksperimen

Variabel	Scaling model ^a	Referensi
Heat release rate (HRR)	$\dot{Q}_F = \dot{Q}_S (l_F/l_S)^{5/2}$	5
Temperature	$T_F = T_S (l_F/l_S)^0$	5
Tebal dinding	$\delta_F = \delta_S (l_F/l_S)^{1/4}$	5
Material dinding	$k_F \approx \rho_F = k_S \approx \rho_S (l_F/l_S)^{1/4}$	5
Waktu dalam eksperimen	$t_F = t_S (l_F/l_S)^{1/2}$	5
Flow rate kabut air	$\dot{q}_F = \dot{q}_S (l_F/l_S)^{1/2}$	13

^a l adalah besarnya skala dan indeks S berhubungan dengan skala model sedangkan indeks F untuk skala penuh ($l_S=1$ dan $l_F=6$)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam melakukan penelitian pengaruh kabut air terhadap asap dan temperatur pembakaran bensin diperlukan beberapa tahapan, yaitu tahap persiapan, tahap eksperimen, dan tahap simulasi.

3.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan merupakan tahapan awal yang harus dilakukan dalam suatu penelitian sehingga penelitian yang dilakukan sesuai dengan standard yang ada. Hal tersebut bertujuan guna menjamin suatu kegiatan penelitian yang dilakukan dapat berjalan dengan baik serta menghindari suatu hal yang tidak diinginkan yang mungkin terjadi dalam suatu kegiatan penelitian. Dalam tahap ini, terdapat beberapa persiapan yang dilakukan sebelum melakukan suatu penelitian. Tahapan persiapan meliputi persiapan peralatan keamanan dan alat uji

1.1.1 Peralatan Keamanan

Keamanan, keselamatan, dan kesehatan kerja serta lingkungan kerja dalam suatu penelitian merupakan suatu hal yang harus diperhatikan. Pengkajian risiko bahaya yang mungkin terjadi ketika penelitian berlangsung dapat mengantisipasi serta meminimalisasi terjadinya risiko bahaya yang tidak diinginkan. Dalam penelitian ini, sumber bahaya dapat berasal dari alat uji dan faktor lain pada saat dilakukannya penelitian. Sumber bahaya yang mungkin dapat menimbulkan suatu risiko kecelakaan dalam penelitian ini yaitu:

1. Nyala Api

Pool fire yang menjadi sumber panas dan penghasil asap dalam penelitian ini dapat menimbulkan suatu risiko bahaya yang disebabkan oleh panas dan asap yang dihasilkan oleh pembakaran bensin. Besarnya nyala api dan banyaknya asap yang dihasilkan oleh suatu pembakaran bergantung pada jenis bahan bakar dan diameter dari wadah bahan bakar yang digunakan. Risiko panas dan asap yang dihasilkan oleh nyala api sangat berbahaya bagi

kesehatan dan lingkungan sehingga perlu adanya suatu tindakan pencegahan terhadap risiko tersebut.

2. Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah bensin premium yang mudah menguap pada suhu kamar ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) sehingga risiko terjadinya kebakaran sangat tinggi. Dengan laju penguapan bensin yang cukup tinggi dengan panas dan oksigen yang cukup dapat menimbulkan suatu nyala api. Hal tersebut harus diantisipasi dengan menempatkan bensin pada wadah tertutup dan jauh dari sumber panas.

3. Rangkaian listrik

Pada saat penelitian dilakukan, terdapat beberapa peralatan yang membutuhkan suplai listrik sehingga rangkaian listrik yang digunakan dapat menimbulkan suatu risiko terjadinya kecelakaan akibat bahaya listrik apabila tidak ditempatkan dengan baik. Kemungkinan terjadinya bahaya listrik dapat muncul akibat kabel yang terkelupas, hubungan arus pendek listrik, dan lain-lain. Oleh karena itu, diperlukan rangkaian listrik harus diperhatikan dan diletakkan ditempat yang sesuai sehingga risiko kecelakaan akibat listrik dapat dihindari.

Untuk mengantisipasi terjadinya kecelakaan pada saat penelitian, diperlukan beberapa alat pengaman berdasarkan risiko yang ada. Peralatan tersebut yaitu:

1. Alat Pemadam Api Ringan (APAR) tipe *dry blower*. Alat pemadam ini harus di periksa terlebih dahulu apakah masih dapat digunakan untuk memadamkan suatu kebakaran.
2. Sarung tangan tahan panas berguna untuk melindungi tangan dari temperatur tinggi yang dapat diakibatkan oleh *pool fire* pada saat pengujian.
3. Masker yang digunakan untuk mencegah bahaya keracunan akibat asap yang dihasilkan dari pembakaran bensin.

1.1.2 Persiapan Alat Uji

Dalam proses pengambilan data, terdapat beberapa peralatan yang digunakan untuk mendapatkan data-data yang diinginkan, yaitu:

1. Wadah bahan bakar

Wadah bahan bakar berfungsi sebagai tempat untuk menampung bensin untuk menghasilkan suatu poses kebakaran. Wadah yang digunakan dalam eksperimen ini memiliki diameter 6.3 cm dan tinggi 4.3 cm. Sebelum bensin dalam wadah dibakar, sebaiknya wadah terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran atau sisa pembakaran sehingga bensin yang digunakan tidak terpengaruh *propertiesnya* oleh kerak sisa hasil pembakaran. Selain itu, perlu dipastikan bahwa wadah yang dipakai tidak bocor karena dapat mengakibatkan tumpahnya bensin dan menimbulkan suatu risiko kebakaran.

2. Bensin

Pada penelitian ini, bahan bakar yang digunakan adalah bensin premium. Volume bensin yang digunakan sebanyak 8 ml setiap satu kali pengujian.

3. Ignitor

Ignitor yang digunakan berupa *ignitor* gas yang banyak digunakan sebagai sumber api untuk kompor-kompor rumah tangga. *Ignitor* dalam penelitian ini digunakan sebagai sumber api *pool fire*.

4. Stop watch

Stop watch digunakan untuk mengetahui waktu padam api dan penggunaan sistem kabut air.

5. Tabung nitrogen dan regulator

Tabung nitrogen dan regulator berfungsi sebagai tenaga pendorong untuk menghasilkan *droplet* air bertekanan. Nitrogen akan mendorong air dalam *pressure vessel* untuk mengalir keluar sampai ke *nozzle*. Untuk mengatur tekanan gas yang keluar dari dalam tabung digunakan *pressure regulator*. Sebelum pengujian dengan menggunakan kabut air harus dipastikan bahwa tekanan nitrogen masih cukup dan tidak terdapat kebocoran. Selain itu, pemeriksaan *pressure regulator* juga harus dilakukan agar pengaturan tekanan gas dapat dilakukan dengan baik.

6. Pressure vessel



Gambar 3.1 *Pressure vessel*

Pressure vessel merupakan alat yang digunakan untuk mengkompresikan air menuju *nozzle*. Alat ini bekerja berdasarkan volume *control*, yaitu jumlah volume gas nitrogen yang masuk ke pressure vessel sama dengan jumlah volume air yang keluar menuju *nozzle*. Untuk menjaga tekanan di dalamnya tetap aman digunakan pressure relief yang dapat mengatur tekanan sampai nilai tertentu. Saat memasukkan air ke dalam pressure vessel, volume air jangan sampai melebihi batas pipa yang telah ditentukan. Selain itu, air yang digunakan dalam pembuatan *droplet* kabut air harus bersih dari kotoran sehingga mencegah penyumbatan *nozzle*.

7. Stop valve

Stop valve digunakan untuk membuka-tutup aliran air. Stop valve diletakkan antara *nozzle* dan pressure gauge. Alat ini digunakan sebagai pengontrol aliran menuju *nozzle* untuk dijadikan kabut air.

8. Check valve

Check valve berfungsi guna menjaga agar tidak terjadi aliran balik bertekanan ke dalam tabung nitrogen. Pada alat uji, *check valve* diletakkan diantara nitrogen dengan *pressure vessel*.

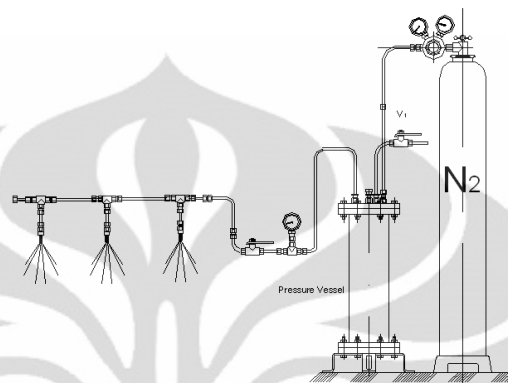
9. Pressure gauge



Gambar 3.2 *Pressure gauge*

Alat ini digunakan untuk mengetahui tekanan air yang mengalir menuju *nozzle*. Tekanan air dibutuhkan untuk mengetahui karakteristik pemadaman pada tekanan yang berbeda.

10. *Piping system*



Gambar 3.3 *Piping system*

Piping system dalam sistem kabut air menggunakan pipa dengan diameter $\frac{1}{4}$ inci yang terbuat dari *stainless steel*. Pipa ini cukup baik untuk menahan tekanan tinggi di mana setiap sambungan pipa digunakan *ferrule* sehingga sambungan pipa kuat dan tidak bocor. *Piping system* terdiri atas pipa *steel* berukuran $\frac{1}{4}$ inci, plastik *tube* berukuran $\frac{1}{4}$ inci, dan beberapa *fittings*, diantaranya *caps dan plugs* berukuran $\frac{1}{4}$ inci, *union fitting* dan *end plug*.

11. *Nozzle*

Nozzle digunakan sebagai penghasil *droplet* air sebagai media pembentuk tirai air yang menggunakan sistem kabut air. *Nozzle* yang dipakai dalam penelitian ini adalah *nozzle* yang biasa digunakan untuk melembabkan dan menjaga temperatur lingkungan tanaman dalam rumah kaca. *Nozzle* ini dipilih karena kemudahan untuk mendapatkan *nozzle* tersebut dipasaran Indonesia, di mana *nozzle* khusus yang digunakan untuk pemadam kebakaran dengan standard internasional tidak terdapat dipasaran Indonesia.



Gambar 3.4 *Nozzle* kabut air

Berikut ini merupakan spesifikasi dari *nozzle* yang digunakan:

Nama pasaran/merek	: Mist Nozzle Apo TW-3
Material	: Kuningan
Diameter Orifice	: 0,1 mm
Tekanan kerja	: 20 – 100 bar
<i>Droplet</i> Keluaran	: 10 - 50 μm
Sudut <i>Spray</i>	: 50° - 65°

Nozzle harus diperiksa sebelum melakukan pengujian. Hal ini dibutuhkan karena kinerja dari *nozzle* sangat berpengaruh pada data-data yang diperoleh. *Nozzle* yang baik dapat memancarkan *spray* dengan sempurna dan tidak terjadi tetesan air pada *orifice nozzle* ataupun keanehan bentuk *spray* yang dihasilkan. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan karena kotoran yang menyumbat *orifice* sehingga bentuk *spray* yang dihasilkan tidak sempurna.

12. Termokopel

Termokopel yang digunakan pada penelitian ini adalah termokopel tipe K yang memiliki temperatur maksimum 600°C. Termokopel digunakan untuk mengubah perbedaan temperatur lingkungan yang terdeteksi menjadi perubahan tegangan listrik (voltase) yang kemudian diketahui data hasil pengukurannya dengan menggunakan data akusisi.

13. Data akusisi



Gambar 3.5 Data akusisi

Data akusisi yang dipergunakan untuk mengkonversi data pembacaan temperatur hasil pengukuran thermocouple adalah *Advantech Portabel Data Acquisition Module* type USB-4178. Data akusisi ini menggunakan *software Adam view* sebagai *interface* yang dioperasikan dengan menggunakan sistem operasi Windows XP.

14. Kompartemen



Gambar 3.6 Kompartemen

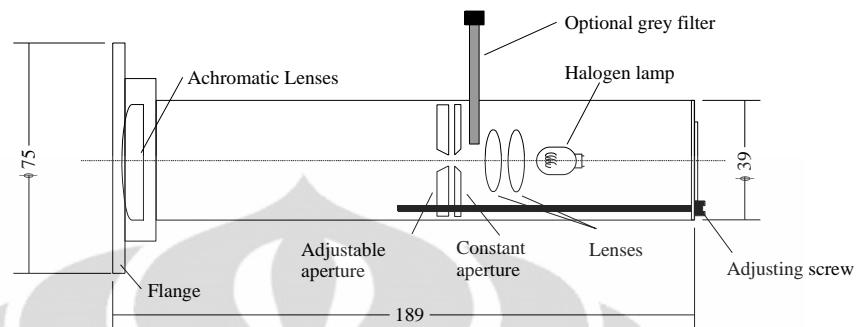
Ruangan yang dipakai dalam penelitian ini memiliki volume dalam kompartemen 0.25 m^3 dengan panjang 1 m, lebar 0.5 m, dan tinggi 0.5 m. Material yang dipergunakan pada dinding *compartment* adalah kalsium silikat dengan ketebalan 1.3 cm.

15. Alat Pengukur Opasitas DIN 50055

DIN 50055 adalah standardisasi sistem *Light Measurement System for Testing Smoke Development*, atau disebut juga *Smoke density Photometric System*[17]. Alat ini diproduksi oleh *Fire Testing Technology Inc.*, yang berbasis di Inggris. Sistem DIN 50055 di rancang untuk mengukur opasitas asap yang dihasilkan oleh pembakaran suatu material. Sesuai dengan *Bouguer's law*, nilai densitas (*optical density*) asap dapat diketahui dengan mendapatkan nilai opasitas. Hasil pengukuran dengan menggunakan alat berupa tegangan 0-1 V=100% transmisi. Alat ini juga dilengkapi dengan kabel data *Acquisition* yang berfungsi sebagai penghubung dari alat pengukuran sehingga data pengukuran dapat ditampilkan melalui komputer. Perangkat yang digunakan untuk pembacaan data dari kabel data *Acquisition* ke komputer adalah Digital Multim APPA-109N, yang merupakan salah satu produk dari APPA Technology Corp.

Perangkat DIN 50055 terdiri dari:

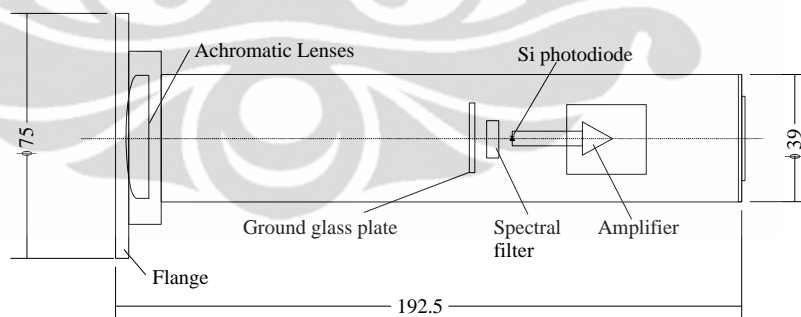
1. *Light source*



Gambar 3.7 Skema *light source*[17]

Light source merupakan sumber cahaya yang digunakan sebagai media pengukuran yang terdiri dari lampu halogen dan sistem lensa. Alat ini diperkirakan menghasilkan cahaya dengan diameter 25 mm pada ujung pemancar sinar. Alat ini juga dilengkapi dengan pengatur lubang bidik kamera yang dapat mengatur intensitas cahaya yang dihasilkan sehingga densitas fluks cahaya yang di terima *light receiver* dapat diatur untuk setiap jarak tertentu.

2. *Light Reciever*



Gambar 3.8 Skema *light receiver*[17]

Light Reciever merupakan alat yang berfungsi sebagai penerima cahaya yang dipancarkan oleh *Light source*. Alat ini terdiri dari sebuah sistem lensa *achromatic*, *ground glass plate*, *silicon photoelectric cell*, dan sebuah *amplifier system*.

3. Control Unit



Gambar 3.9 Control unit system[17]

Control unit system terdiri dari[17]:

- a. "Power on/off" yaitu tombol yang digunakan untuk menyalakan alat yang terletak di dasar kotak.
- b. "Lamp on/off" yaitu tombol yang digunakan untuk menyalakan atau mematikan *Light source*
- c. "*Transmission %*". Menampilkan tegangan yang sudah diperkuat dalam persentase dari nilai awal
- d. "*Damping*" digunakan untuk mengatur respon waktu pengukuran alat
- e. "*Span*" adalah potensiometer yang digunakan untuk mengatur transmisi ke nilai 100% ketika *Light source* tidak tertutup
- f. "*Zero*" adalah potensiometer yang digunakan untuk mengatur transmisi ke nilai 0% ketika *Light source* tertutup
- g. "*Calibrate/Measure*". Biasanya diatur dalam posisi *measure* pada saat pengukuran dilakukan sehingga nilai transmisi yang dihasilkan dapat ditampilkan dalam persentase opasitas. Jika posisi di ubah ke *calibrate* maka data yang ditampilkan merupakan nilai voltase. Nilai *calibrate* yang ditampilkan pada layar seharusnya 150 pada keadaan transmisi penuh pada nilai *measure* 100, maka nilai akan menjadi 1.5 Volt.

16. Dudukan *Light source* dan *Light receiver*



Gambar 3.10 Dudukan *Light source* dan *Light receiver*

Dudukan *Light source* dan *Light receiver* terbuat dari material steel dengan berat keseluruhan mencapai 22 kg. Dudukan *Light source* dan *Light receiver* sebenarnya sudah termasuk dalam Alat Pengukur Opasitas DIN 50055 namun karena pengukuran opasitas asap pada *compartment* pengujian tidak dapat menggunakan desain yang sudah ada maka dudukan di desain ulang dengan penambahan komponen alat sehingga memungkinkan untuk digunakan dalam pengujian pengukuran opasitas asap pada *compartment*.

3.2 Tahap Eksperimen

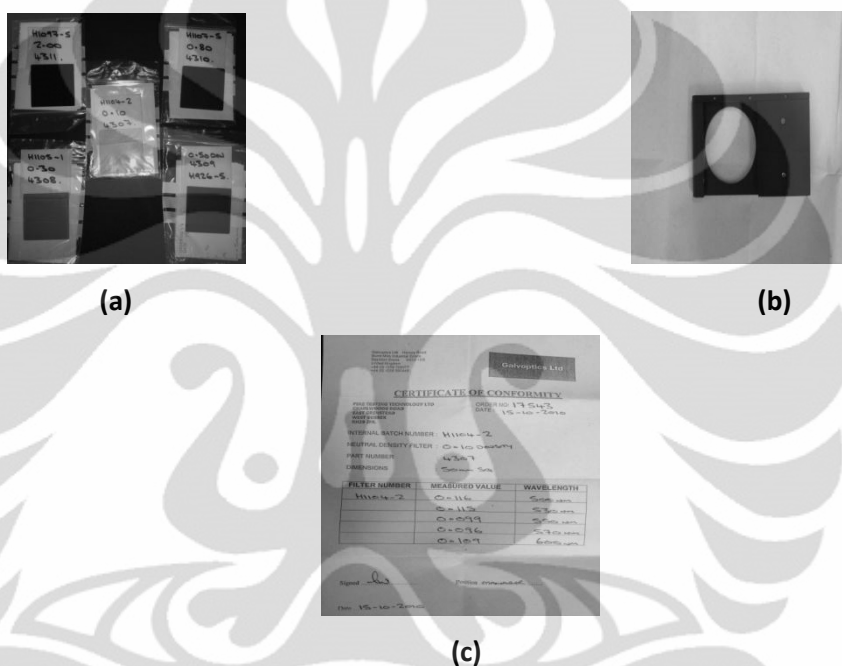
Eksperimen ini dilakukan untuk mengadakan penelitian tentang pengaruh tirai kabut air pada distribusi asap dan temperatur akibat pembakaran *pool fire* dalam ruangan. Eksperimen ini dilakukan di laboratorium keselamatan kebakaran Department Teknik Mesin FTUI. Pada saat eksperimen dilakukan, terdapat pengaruh angin serta suhu lingkungan di sekitar kompartemen yang dapat berpengaruh terhadap hasil penelitian.

Pengukuran opasitas asap dilakukan dengan menggunakan Alat Pengukur Opasitas DIN 50055 dengan perangkat yang digunakan untuk pembacaan data dari kabel data *Acquisition* ke komputer adalah Digital Multim APPA-109N.

Untuk mendapatkan data hasil eksperimen yang sesuai maka sebelum melakukan eksperimen, alat ukur harus terlebih dahulu di kalibrasi.

3.2.1 Kalibrasi Alat Pengukur Opasitas DIN 50055

Kalibrasi Alat Pengukur Opasitas DIN 50055 dilakukan dengan menggunakan suatu alat seperti kaca dengan nilai *optical density* yang telah ditentukan sesuai dengan standard DIN 50055[17].



Gambar 3.11 Perangkat kalibrasi DIN 50055 (a) lensa kalibrasi (b) tempat lensa kalibrasi (c) sertifikat kalibrasi

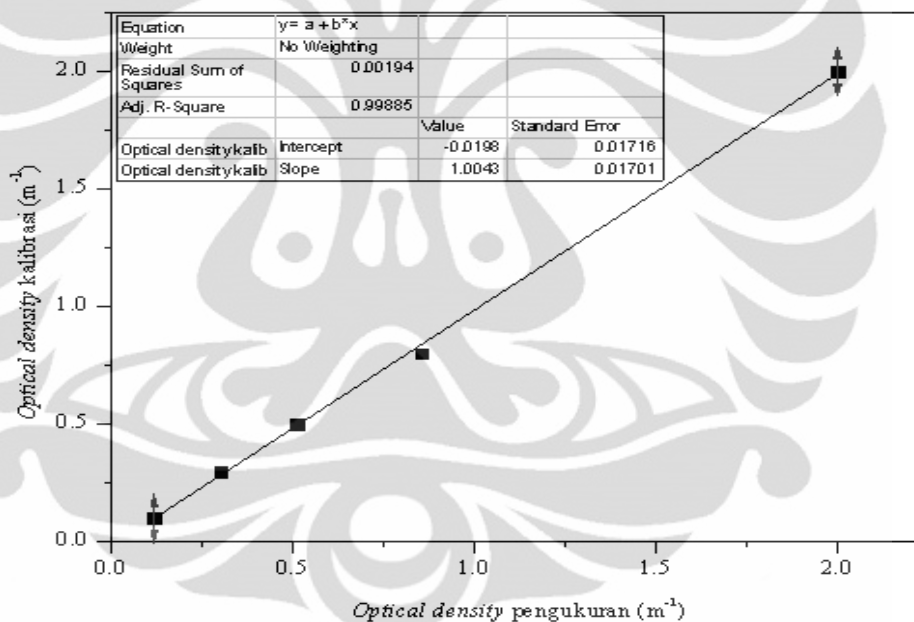
Tabel 3.1 Nilai *optical density* sesuai standard DIN 50055[17]

Transmisi (%)	Nilai <i>optical density</i> kalibrasi (m^{-1})
79	0.1
50	0.3
32	0.5
16	0.8
1	2

Dengan mengetahui nilai *optical density* yang sesuai dengan standard lalu dilakukan pengukuran nilai *optical density* sehingga didapatkan nilai:

Tabel 3.2 Nilai *optical density* hasil pengukuran

Transmisi	Nilai <i>optical density</i> pengukuran (m^{-1})
79	0.119186
50	0.30103
32	0.508638
16	0.853872
1	2



Gambar 3.12 Grafik kalibrasi nilai *optical density* DIN 50055

Tabel 3.3 Response Time Constants DIN 50055[17]

Damping Level	Time Constant in s $\pm 10\%$
0	0.75
1	1.60
2	2.50
3	4.00
4	6.00
5	8.00

Dalam penelitian ini, terdapat variasi pengambilan data yang dilakukan dalam eksperimen adalah sebagai berikut:

3.2.2 Variasi Pengambilan Data

Pengambilan data eksperimen pengaruh tirai kabut air terhadap distribusi asap dan temperatur akibat pembakaran *pool fire* dalam suatu ruangan yaitu:

1. Pengambilan data *optical density* asap pembakaran *pool fire* tanpa tirai kabut air pada jarak 0.28 m dan 0.85 m dengan ketinggian 0.47 m dari atap kompartemen
2. Pengambilan data *optical density* asap pembakaran *pool fire* dengan menggunakan tirai air dengan tekanan 150 psi pada jarak 0.28 m dan 0.85 m pada ketinggian 0.47 m dari atap kompartemen.
3. Pengambilan data *optical density* asap pembakaran *pool fire* dengan menggunakan tirai air dengan tekanan 200 psi pada jarak 0.28 m dan 0.85 m pada ketinggian 0.47 m dari atap kompartemen
4. Pengambilan data distribusi temperatur pembakaran *pool fire* tanpa menggunakan tirai kabut air
5. Pengambilan data distribusi temperatur pembakaran *pool fire* dengan menggunakan tirai kabut air dengan tekanan 150 psi
6. Pengambilan data distribusi temperatur pembakaran *pool fire* dengan menggunakan tirai kabut air dengan tekanan 200 psi

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.2.3 Prosedur Pengambilan Data Tanpa Pengaktifan Tirai Kabut Air

1. Persiapkan peralatan pengambilan data *optical density* asap yaitu alat pengukur opasitas DIN 50055 pada posisi sinar *light source* dan *light receiver* 0.28 m (sebelum tirai kabut air) atau 0.85 m (setelah tirai kabut air) serta hubungkan dengan Digital Multim APPA-109N yang kemudian terhubung dengan komputer
2. Kalibrasi data hasil pengukuran dengan mengatur span dan zero pada *control unit* alat pengukur opasitas DIN 50055. Arahkan tombol pada *control unit* ke

calibrate. Atur baut dan mur pada dudukan *light source* dan *light receiver* sampai persentase pada layar menunjukkan angka 100. Lalu arahkan tombol pada *control unit* ke *measure* lalu atur *span* dan *zero* sampai persentase pada layar menunjukkan angka 100 untuk maksimum dan 0 untuk minimum nilai pengukuran. Diamkan kurang-lebih selama satu jam agar alat stabil.

3. Persiapkan peralatan pengambilan data distribusi temperatur yaitu termokopel dan data akusisi yang kemudian terhubung dengan komputer
4. Menyiapkan wadah bahan bakar lalu di isi dengan bensin dengan volume 8 ml dan letakkan dibagian lantai kompartemen pada jarak 0.095 m
5. Nyalakan *pool fire* dengan menggunakan *ignitor* yang telah dipersiapkan
6. Lakukan pengukuran temperatur dan *optical density* asap
7. Catat waktu api mati lalu tunggu sampai 4 menit untuk melakukan percobaan berikutnya

3.2.4 Prosedur Pengambilan Data dengan Menggunakan Tirai Kabut Air

1. Persiapkan peralatan pengambilan data *optical density* asap yaitu alat pengukur opasitas DIN 50055 pada posisi sinar *light source* dan *light receiver* 0.28 m (sebelum tirai kabut air) atau 0.85 m (setelah tirai kabut air) serta hubungkan dengan Digital Multim APPA-109N yang kemudian terhubung dengan komputer.
2. Kalibrasi data hasil pengukuran dengan mengatur *span* dan *zero* pada *control unit* alat pengukur opasitas DIN 50055. Arahkan tombol pada *control unit* ke *calibrate*. Atur baut dan mur pada dudukan *light source* dan *receiver source* sampai persentase pada layar menunjukkan angka 100. Lalu arahkan tombol pada *control unit* ke *measure* lalu atur *span* dan *zero* sampai persentase pada layar menunjukkan angka 100 untuk maksimum dan 0 untuk minimum nilai pengukuran. Diamkan kurang-lebih selama satu jam agar alat stabil.
3. Persiapkan peralatan pengambilan data distribusi temperatur yaitu termokopel dan data akusisi yang kemudian terhubung dengan komputer
4. Menyiapkan wadah bahan bakar lalu di isi dengan bensin dengan volume 8 ml dan letakkan dibagian lantai pada jarak 0.095 m

5. Menyiapkan sistem kabut air dengan mengatur tekanan kerja pada 150 bar atau 200 bar
6. Nyalakan *pool fire* dengan menggunakan *ignitor* yang telah dipersiapkan
7. Lakukan pengukuran temperatur dan *optical density* asap
8. Tunggu sampai 60 s dari waktu penyalaan *pool fire* lalu buka katup pada sistem kabut air dan tunggu sampai 60 s lalu tutup kembali katup kabut air untuk melihat pengaruh penggunaan sistem kabut air dalam waktu 60 s
9. Catat waktu api mati lalu tunggu sampai 4 menit untuk melakukan percobaan berikutnya

3.3 Tahap Simulasi

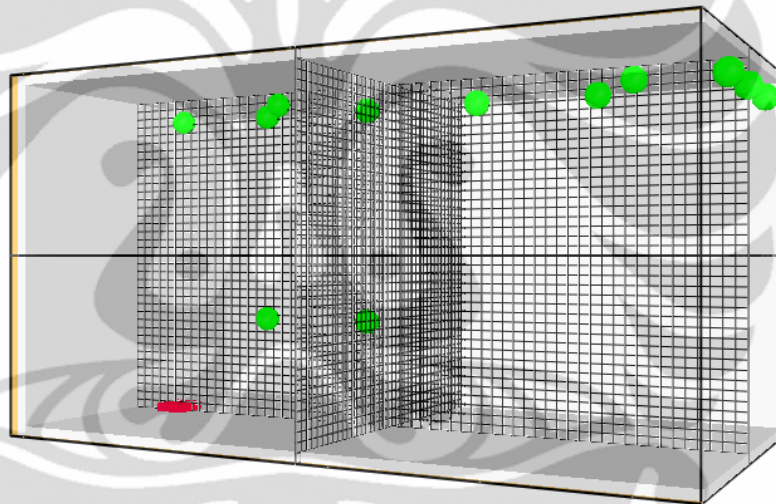
Pada simulasi penelitian ini, pemodelan dilakukan dengan menggunakan FDS 5 untuk mensimulasikan suatu ruangan di mana di dalam ruangan tersebut terdapat suatu nyala api *pool fire*. Simulasi ini akan dilakukan dengan:

1. Simulasi nyala api *pool fire* dalam suatu kebakaran kompartemen tanpa sistem tirai kabut air
2. Simulasi nyala api *pool fire* dalam suatu kebakaran kompartemen tanpa sistem tirai kabut air

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi dengan menggunakan *software* FDS 5. Dalam simulasi ini, digunakan sistem *water mist* sebagai suatu tirai air yang berfungsi untuk menahan penyebaran asap dan panas hasil pembakaran *pool fire*. Pengaktifan sistem *water mist* pada skenario 2 dilakukan pada saat temperature maksimum yang terukur oleh termokopel skenario 1 untuk mengetahui seberapa besar pengaruh sistem *water mist* pada penyebaran asap dan panas hasil pembakaran *pool fire*. Pengaktifan sistem *water mist* pada simulasi FDS 5 berbeda dengan eksperimen yang dilakukan karena temperature maksimum yang terjadi tidak pada waktu yang sama. *Initial temperature* dalam kompartemen dibuat seragam yaitu 33°C dengan *relative humidity* 60 %. Simulasi ini tidak dipengaruhi oleh kemiringan kompartemen dengan sudut yang digunakan adalah 0° dan tanpa adanya masukan data tentang kecepatan angin dan tekanan lingkungan pada *open properties boundary*.

3.3.1 Domain

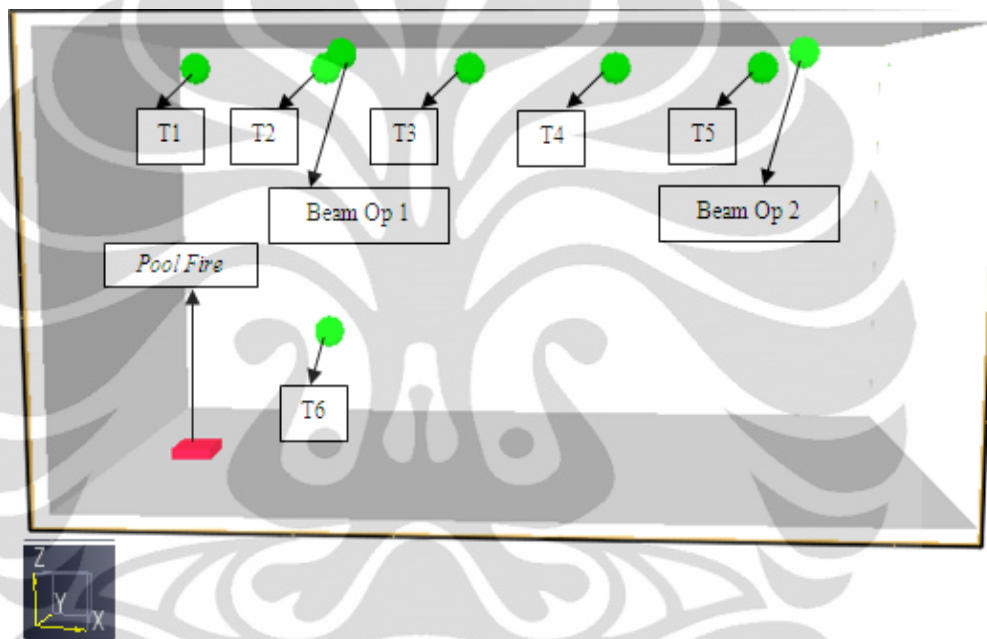
Dalam suatu simulasi dengan menggunakan FDS 5, perbandingan antara besarnya domain dan ukuran grid yang digunakan dalam simulasi sangat berkaitan satu sama lain. Besarnya grid yang digunakan dalam suatu simulasi FDS akan sangat memengaruhi akurasi hasil simulasi. Besarnya ukuran grid yang dipakai juga akan berpengaruh pada *computing time* untuk suatu simulasi. Jika merujuk pada FDS 5 *user guide* [3], untuk simulasi pertumbuhan api dalam suatu bangunan dapat menggunakan grid dengan ukuran 0.1 m x 0.1 m x 0.1 m. Dengan merujuk pada hal tersebut maka dalam simulasi ini dipergunakan grid dengan ukuran 0.02 m x 0.01 m x 0.01 m.



Gambar 3.13 Lay out mesh yang digunakan pada simulasi

3.3.2 Geometri

Geometri yang digunakan dalam simulasi ini berdasarkan pada ukuran sesungguhnya di mana skala perbandingan ukuran eksperimen dengan simulasi adalah 1 : 1. Simulasi ini terdiri dari dua skenario yaitu dengan pengaktifan sistem tirai kabut air dan tanpa pengaktifan sistem tirai kabut air. Kompartemen yang digunakan dalam simulasi ini memiliki dimensi bagian dalam 1 m x 0.5 m x 0.5 m (x,y,z).

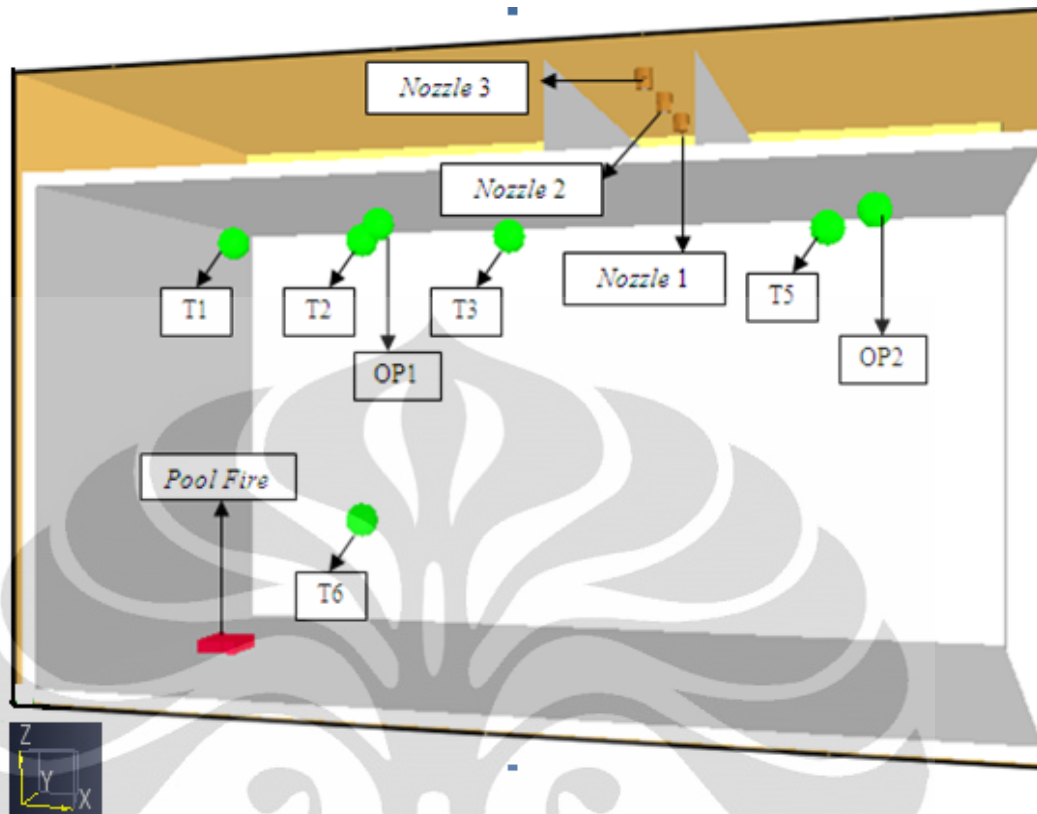


Gambar 3.14 Lay out simulasi tanpa pengaktifan tirai kabut air

Adapun posisi peralatan pengukuran yang digunakan dalam simulasi tanpa pengaktifan tirai kabut air yaitu:

Tabel 3.4 Posisi peralatan pengukuran kondisi tanpa tirai kabut air

<i>Device</i>	<i>Sumbu-x</i>	<i>Sumbu-y</i>	<i>Sumbu-z</i>
Termokopel 1	0.095 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 2	0.26 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 3	0.44 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 4	0.62 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 5	0.80 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 6	0.26 m	0.26 m	0.15 m
<i>Beam Optical Density 1</i>	0.2676 m - 0.2926 m	0.0 m - 0.5 m	0.4753 m - 0.5 m
<i>Beam Optical Density 2</i>	0.84 m - 0.865 m	0.0 m - 0.5 m	0.4753 m - 0.5 m



Gambar 3.15 Lay out simulasi dengan menggunakan tirai kabut air

Adapun posisi peralatan pengukuran yang digunakan dalam simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air yaitu:

Tabel 3.5 Posisi peralatan pengukuran kondisi dengan tirai kabut air

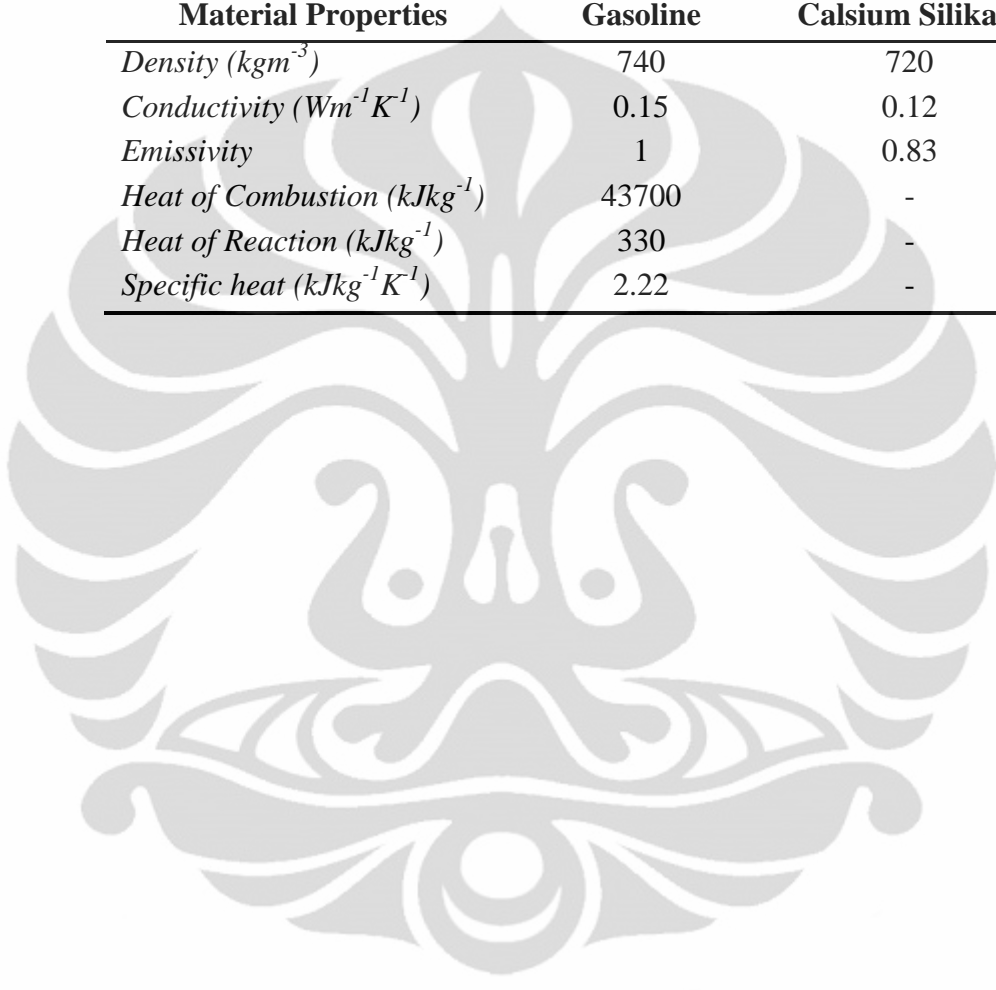
<i>Device</i>	Sumbu-x	Sumbu-y	Sumbu-z
Termokopel 1	0.095 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 2	0.26 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 3	0.44 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 5	0.80 m	0.25 m	0.47 m
Termokopel 6	0.26 m	0.26 m	0.15 m
<i>Beam Optical Density 1</i>	0.2676 m - 0.2926 m	0.0 m - 0.5 m	0.4753 m - 0.5 m
<i>Beam Optical Density 2</i>	0.84 m - 0.865 m	0.0 m - 0.5 m	0.4753 m - 0.5 m

3.3.3 Material Properties

Properties dari material sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi yang dilakukan. Properties dari material yang digunakan dalam simulasi ini yaitu:

Tabel 3.6 *Material properties* data masukan untuk simulasi FDS[18,11,21,22]

Material Properties	Gasoline	Calsium Silikate
<i>Density (kgm^{-3})</i>	740	720
<i>Conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$)</i>	0.15	0.12
<i>Emissivity</i>	1	0.83
<i>Heat of Combustion ($kJkg^{-1}$)</i>	43700	-
<i>Heat of Reaction ($kJkg^{-1}$)</i>	330	-
<i>Specific heat ($kJkg^{-1}K^{-1}$)</i>	2.22	-



BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

Dalam penelitian ini, sumber api yang digunakan merupakan pembakaran jenis *flaming* berbahan bakar bensin premium. Sumber api dalam kompartemen diletakkan pada jarak 0.095 m dari arah sumbu-x minimum di mana terdapat ventilasi dengan luas 0.25 m² pada sumbu-x maksimum (lihat Gambar 3.15). Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan enam buah termokopel Tipe K. Pengukuran temperatur ini dilakukan melalui eksperimen dengan dua skenario yaitu tanpa tirai kabut air dan dengan tirai kabut air. Penggunaan tirai air kabut air menggunakan dua tekanan kerja yaitu 150 psi dan 200 psi. Simulasi menggunakan FDS 5 dilakukan dengan dengan kondisi yang hampir menyerupai eksperimen di mana hasil simulasi akan divalidasi melalui eksperimen yang telah dilakukan dengan membandingkan data yang di dapat dari hasil eksperimen dan data hasil simulasi.

4.1 Analisis Hasil Eksperimen

4.1.1 Pengaruh Tirai Kabut Air Terhadap Distribusi Temperatur dalam Kebakaran Kompartemen

Eksperimen mengenai pengaruh tirai kabut air terhadap distribusi temperatur dalam kebakaran kompartemen ini menggunakan termokopel Tipe K sebagai alat pengukur temperatur. Dalam penelitian ini akan menganalisa distribusi temperatur hasil pengukuran dengan skenario:

1. Tanpa pengaktifan tirai kabut air
2. Dengan pengaktifan tirai kabut air pada tekanan 150 psi
3. Dengan pengaktifan tirai kabut air pada tekanan 200 psi.

Sumber nyala api dalam kebakaran kompartemen berasal dari *pool fire* yang termasuk dalam pembakaran jenis *flaming* dengan bahan bakar bensin premium. Api dari suatu *pool fire* bergantung pada luas permukaan bahan bakar. Bentuk aliran api dalam penelitian ini berada pada daerah transisi antara aliran

laminar dan turbulen. Hal tersebut dapat diperkirakan dari besarnya diameter wadah bahan bakar yang dipakai yaitu 0.063 m ($0.03 \text{ m} < D < 1 \text{ m}$)[1,19].

Nyala api juga bergantung pada banyaknya bahan bakar mampu bakar. Penguapan yang terjadi pada permukaan bahan bakar disebabkan oleh perbedaan temperatur permukaan bahan bakar dengan temperatur lingkungan. Ketika penguapan bahan bakar terjadi, aliran konveksi pada bahan bakar bergantung pada besarnya nilai laju pemanasan, massa jenis, tegangan permukaan, gravitasi, dan geometri dari permukaan bahan bakar. Material dalam fase gas yang diproduksi dari pemanasan bahan bakar cair dikenal sebagai material *combustible*. Bahan bakar akan menghasilkan *volatile* dalam jumlah besar jika tekanan uap berada pada temperatur tinggi (*boiling point* pada tekanan rendah) dan panas laten yang rendah.

Nyala api dalam penelitian ini dapat bertahan karena kesetimbangan elemen api tidak terganggu. Pada saat bahan bakar terbakar, nyala api mempertahankan fase penguapan untuk menghasilkan material *combustible*. Material *combustible* akan menyuplai bahan bakar siap bakar yang akan mempertahankan nyala api. Dalam penelitian ini, api akan padam ketika material *combustible* atau bahan bakar telah habis.

Penyebaran api pada suatu *pool fire*, laju pembakaran bahan bakar akan sama dengan laju suplai material *combustible*. Laju pembakaran bahan bakar penting untuk mengetahui karakteristik dari *pool fire* yang digunakan dalam penelitian. Untuk menghitung besarnya *mass burning rate* pada suatu *pool fire* maka dapat digunakan persamaan:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{(-\kappa\beta D)})$$

Berdasarkan Tabel 2.2 pada BAB 2, untuk bahan bakar bensin (gasoline) nilai $\dot{m}''_{\infty} = 2.1 \text{ m}^{-1}$ dan $\kappa\beta = 0.055 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ maka besarnya nilai *mass burning rate* *pool fire* dalam penelitian ini yaitu:

$$\dot{m}'' = 0.055(1 - e^{(-2.1 \times 0.063)})$$

$$\dot{m}'' = 6.8157 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

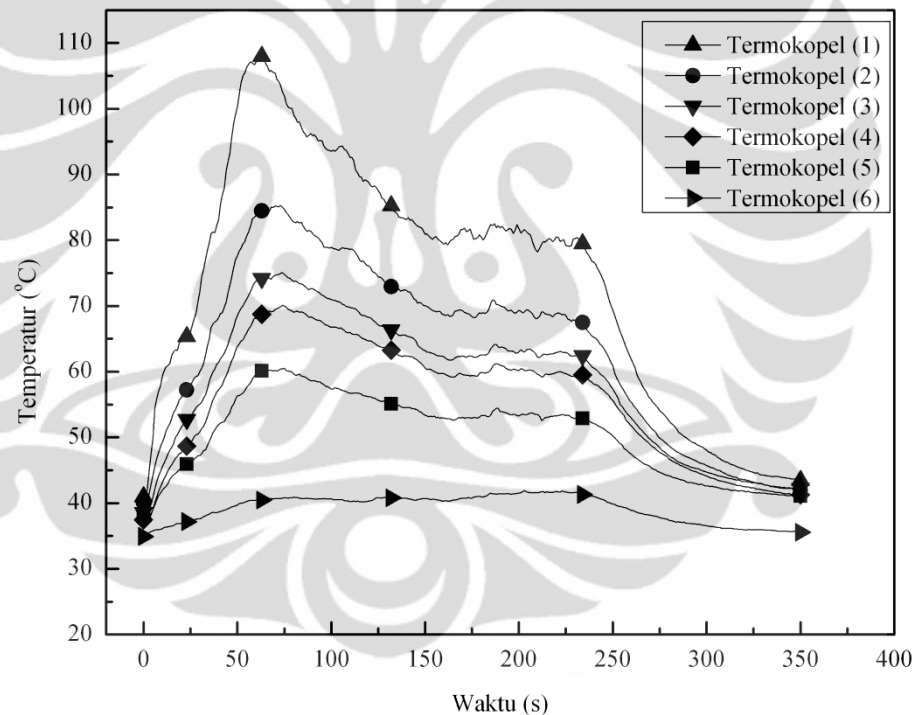
Dengan mengetahui laju pembakaran bahan bakar maka kita dapat menghitung besarnya laju pelepasan panas dari *pool fire*, di mana:

$$\dot{q} = \Delta h_c \times \dot{m}_\infty (1 - e^{-\kappa \beta D}) \times A$$

$$\dot{q} = 43700 \times 6.8157 \times 10^{-3} \times \left[\frac{(0.063)^2 \times 3.14}{4} \right]$$

$$\dot{q} = 0.928 \text{ kW}$$

Variasi pengambilan data distribusi temperatur dilakukan tanpa tirai kabut air dan dengan tirai kabut air. Dalam melakukan penelitian untuk mengetahui distribusi temperatur tanpa pengaktifan tirai kabut air ini digunakan enam titik pengukuran. Dari hasil penelitian di dapatkan grafik distribusi temperatur sebagai berikut:



Gambar 4.1 Distribusi temperatur tanpa tirai kabut air

Dari Gambar 4.1 terlihat grafik hasil pengambilan data temperatur tanpa tirai kabut air. Pengukuran temperatur dalam kompartemen dilakukan dengan menggunakan enam termokopel di mana lima termokopel diletakkan pada posisi 0.47 m dari lantai kompartemen dan satu termokopel diletakkan pada posisi 0.15 m dari lantai kompartemen. Temperatur pada termokopel 1 memiliki nilai paling besar di antara hasil pengukuran temperatur pada termokopel lain.

Hal tersebut disebabkan oleh posisi termokopel 1 yang diletakkan tepat di atas *pool fire* pada jarak 0.47 m dari lantai kompartemen. Sedangkan termokopel 6 memiliki nilai pengukuran temperatur paling kecil di antara hasil pengukuran temperatur pada termokopel lain.

Temperatur yang terukur pada termokopel merupakan suatu hasil dari panas yang dihasilkan dari radiasi dan konveksi api dan produk pembakaran. Posisi termokopel yang terletak pada jarak 0.47 m dari lantai kompartemen menyebabkan panas yang terukur di dominasi oleh panas konveksi dari aliran asap yang merupakan salah satu produk pembakaran. Untuk mengetahui besarnya konveksi yang disebabkan oleh asap dari suatu nyala api dapat digambarkan melalui persamaan:

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

Dari persamaan tersebut, dapat terlihat bahwa konveksi dipengaruhi oleh *properties* dari bahan bakar, laju dari asap, konsentrasi asap, dan perbedaan temperatur antara asap dengan lingkungan sekitar. Selain itu, perpindahan panas konveksi bergantung pada konsentrasi asap yang dipengaruhi oleh ventilasi dan laju asap pada bagian atap kompartemen. *Mass flow rate* (kg/s) dari lapisan asap pada ketinggian tertentu dari bagian bawah ruangan dapat diketahui dengan rumusan sebagai berikut[1]:

$$\dot{m} = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3} [1 + 0.026 \dot{Q}_c^{2/3} z^{-5/3}]$$

Dari persamaan tersebut, dapat terlihat bahwa *mass flow rate* dipengaruhi oleh *heat release rate* dari suatu pembakaran dan ketinggian atap suatu kompartemen. Besarnya *mass flow rate* pada suatu daerah dengan ketinggian tertentu dalam suatu kompartemen akan memengaruhi besarnya laju aliran *volumetric* dari asap yang dapat diperkirakan besarnya massa jenis udara, yaitu:

$$\dot{V}_s = \frac{\dot{m}}{\rho_{air}}$$

Dari persamaan tersebut, dapat terlihat bahwa laju aliran yang berpengaruh pada konsentrasi asap bergantung pada massa jenis udara atau kondisi lingkungan.

Selain itu, temperatur yang terukur pada termokopel dipengaruhi oleh panas radiasi dari suatu sumber api yang bergantung pada distribusi temperatur,

ukuran, distribusi, dan konsentrasi dari jelaga (*soot partikel*), serta pancaran dan penyerapan suatu konsentrasi gas. Besarnya *heat flux* yang dihasilkan oleh suatu nyala api dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$\bar{q}'' = (\bar{\epsilon}_g + \epsilon_g')\sigma(\bar{T} + T')^4$$

dengan besarnya emisivitas api

$$\epsilon_g = 1 - e^{-\kappa_g l}$$

Dari dua persamaan tersebut dapat terlihat bahwa *heat fluks* yang dijadikan suatu parameter besarnya radiasi yang dihasilkan oleh suatu nyala api dipengaruhi oleh besarnya api dan aliran dari api.

Dalam pengambilan data distribusi temperatur yang dilakukan, terjadi fluktuasi pengukuran temperatur yang di akibatkan momentum bahan bakar yang sangat rendah sesuai dengan karakteristik *pool fire*. Hal tersebut disebabkan oleh pembakaran pada permukaan bahan bakar yang tidak terjadi seluruh permukaan bahan bakar. Pembakaran hanya akan terjadi apabila material pada permukaan bahan bakar telah mampu bakar (*combustible*). Ketidakstabilan nyala api juga dapat disebabkan oleh aliran udara dalam kompartemen.

Pada pengambilan data tanpa tirai kabut air, api mati pada detik 249 detik setelah *pool fire* di nyalakan. Terdapat variasi durasi pembakaran dalam penelitian ini di mana durasi pembakaran berkisar antara 236 detik sampai 251 detik. Durasi pembakaran dari *pool fire* dapat dipengaruhi oleh [19]:

1. Volume bahan bakar
2. Diameter *pool fire*
3. *Regression rate*

Variasi durasi pembakaran dari *pool fire* yang terjadi pada saat pengambilan data temperatur kemungkinan disebabkan oleh pengurangan volume bahan bakar. Pengurangan volume bahan bakar dapat disebabkan oleh cukup tingginya temperatur dari wadah bahan bakar. Laju penguapan dari bensin premium (*gasoline*) yang cukup tinggi juga menjadi salah satu penyebab pengurangan volume bahan bakar. Selain itu, produk sisa pembakaran yang tertinggal dalam wadah bahan bakar juga menjadi penyebab terjadinya variasi durasi pembakaran dari *pool fire*. Produk sisa pembakaran yang belum sempurna

terbakar dapat menjadi sumber bahan bakar tambahan yang menyebabkan durasi pembakaran menjadi lebih lama. Untuk menghitung durasi pembakaran dari *pool fire* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

$$t_b = \frac{4V}{\pi D^2 v}$$

di mana v merupakan *regression rate* yang besarnya adalah

$$v = \frac{\dot{m}''}{\rho_{fuel}}$$

$$v = \frac{6.8157 \times 10^{-3}}{740}$$

$$v = 9.21 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$$

dengan mengetahui besarnya *regression rate* maka perhitungan durasi pembakaran dari *pool fire* dengan diameter 0.063 m dengan volume 8 ml adalah

$$t_b = \frac{4 \times 8 \times 10^{-6}}{3.14 \times (0.063)^2 \times 9.21 \times 10^{-6}}$$

$$t_b = 278.79 \approx 279 \text{ s}$$

Dalam suatu kebakaran dalam ruangan, terdapat lima fase yang bergantung pada banyaknya udara dan bahan bakar dalam ruangan tersebut. Lima fase tersebut adalah:

1. *Ignition*
2. *Growth*
3. *Flashover*
4. *Fully developed fire*
5. *Decay*

Fase *ignition*, *growth*, dan *decay* dipengaruhi oleh banyaknya bahan bakar dalam ruangan tersebut. Sedangkan fase *flashover* dan *fully developed fire* dipengaruhi oleh banyaknya udara (oksigen) dalam ruangan yang bergantung pada banyaknya ventilasi pada ruangan tersebut.

Dalam penelitian ini, fase yang terjadi hanya fase *ignition*, *growth*, dan *decay*. Hal tersebut dapat diketahui dari Gambar 4.1 di mana temperatur maksimum yang terukur pada termokopel 1 yaitu sekitar 107.962 °C. Dari Gambar 2.4 pada BAB 2 dapat diketahui bahwa suatu nyala api dalam ruangan akan padam pada fase *growth* karena habisnya bahan bakar. Dalam penelitian ini tidak terjadi fase *flashover* dan *fully developed fire* karena bahan bakar yang digunakan tidak cukup. Nyala api dari bahan bakar yang ditampung dalam wadah dengan diameter 0.063 m tidak mengalami perambatan ke dinding *compartment* sehingga nyala api hanya bergantung dari bahan bakar yang terdapat di dalam wadah. Selain itu, suplai udara yang cukup dari ventilasi *compartment* dengan luas 0.25 m² menjadi salah satu penyebab tidak terjadinya fase tersebut. Terdapat beberapa karakteristik dari fase *flashover* yaitu:

1. Temperatur ruangan mencapai 500 °C sampai 600 °C
2. Terjadinya transisi proses pembakaran dari *fuel control* menjadi *ventilation control*.

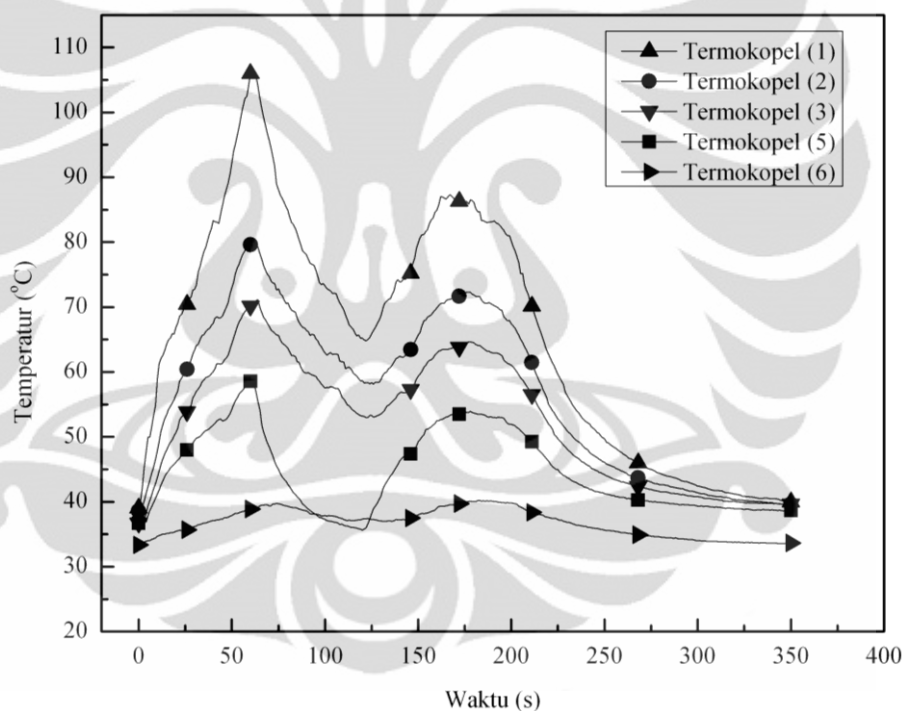
Kenaikan temperatur ruangan terjadi akibat kenaikan tekanan yang disebabkan oleh banyaknya asap yang memiliki temperatur yang cukup tinggi dalam ruangan. Akumulasi asap yang dihasilkan menyebabkan oksigen dalam ruangan tersebut menipis dan semakin tertekan ke bawah. Hal tersebut mengakibatkan api berusaha keluar dari ruangan untuk mendapatkan sumber oksigen baru untuk proses pembakaran.

Pada fase *flashover*, dapat terjadi suatu fenomena *boilover* ketika terdapat bahan bakar cair yang terbakar di dalam ruangan tersebut. Fenomena ini terjadi ketika air disemprotkan ke dalam suatu bahan bakar cair yang sedang terbakar dengan massa jenis bahan bakar yang lebih rendah dan boiling temperatur yang lebih tinggi. Air yang terdapat pada permukaan bahan bakar dapat menguap secara instan dengan pemuai yang sangat besar mengakibatkan loncatnya bahan bakar yang terdapat pada permukaan. Apabila air dapat masuk ke dalam bahan bakar maka dapat terjadi pendidihan air secara instan sehingga bahan bakar cair memiliki momentum yang sangat besar untuk dapat keluar dari wadahnya. Fenomena ini yang disebut sebagai *boilover*.

Sistem tirai kabut air dalam penelitian ini digunakan untuk membuat suatu bidang pembatas akibat tekanan dan laju penguapan *droplet* air. Penggunaan kabut air dalam penelitian ini tidak di semprotkan langsung ke dalam bahan bakar cair yang terbakar. Hal ini dapat menghindarkan *droplet* air masuk ke dalam bahan bakar yang dapat menyebabkan terjadinya fenomena *boilover*.

Ukuran droplet yang kecil dapat meningkatkan permukaan air sehingga laju penyerapan panas oleh penguapan *droplet* air akan meningkat. Peningkatan permukaan air ini menyebabkan peningkatan pemakaian air dalam suatu instalasi sistem pencegahan bahaya kebakaran

Dari hasil penelitian penggunaan sistem kabut air, di dapatkan grafik distribusi temperatur kebakaran kompartemen.

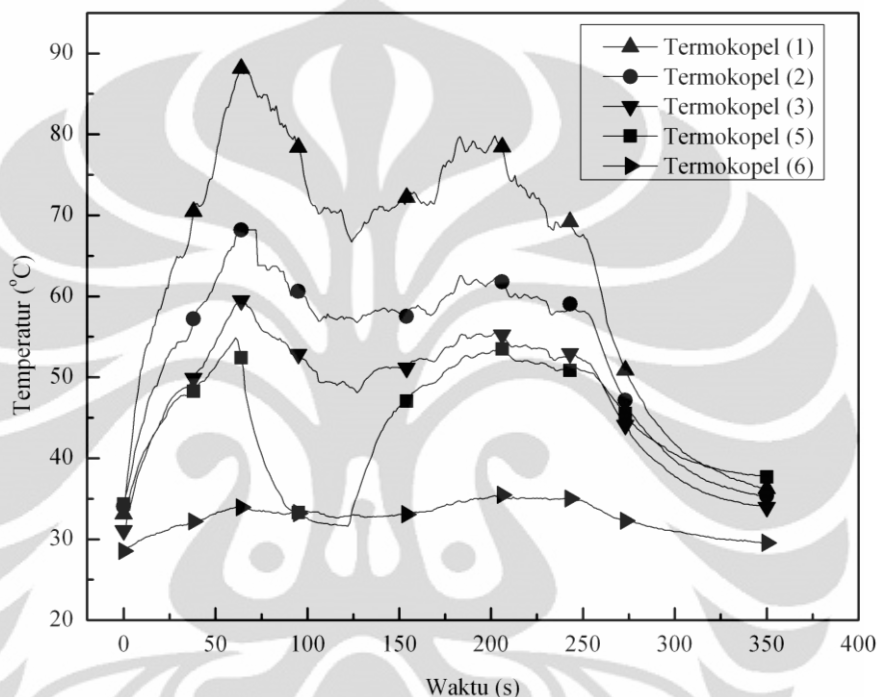


Gambar 4.2 Distribusi temperatur dengan tirai kabut air pada tekanan 150 psi

Gambar 4.2 merupakan hubungan antara temperatur dan waktu hasil pengukuran dengan menggunakan tirai kabut air pada tekanan kerja 150 psi di mana terjadi penurunan temperatur pada semua termokopel. Terlihat bahwa temperatur pada termokopel 5 mengalami penurunan yang paling besar di bandingkan dengan penurunan temperatur pada termokopel lain. Hal tersebut disebabkan karena pengaruh tirai kabut air yang di letakkan pada daerah sebelum

termokopel 5. Penurunan temperatur pada termokopel lain juga terjadi setelah pengaktifan tirai kabut air.

Dalam penelitian ini juga akan dilihat pengaruh tekanan kerja tirai kabut air dengan melakukan penambahan tekanan kerja tirai kabut air menjadi 200 psi. Dari hasil pengambilan data yang telah dilakukan maka di dapatkan grafik temperatur pada tekanan kerja 200 psi sebagai berikut:



Gambar 4.3 Distribusi temperatur dengan tirai kabut air pada tekanan 200 psi

Dari Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa pada tekanan kerja tirai kabut air 200 psi terjadi penurunan temperatur pada semua termokopel seperti pada tekanan kerja 150 psi. Penurunan temperatur akibat pengaktifan tirai kabut air paling besar terjadi pada termokopel 5. Penurunan temperatur juga terjadi pada termokopel 1, 2, dan 3 yang terletak sebelum tirai kabut air. Temperatur pada termokopel 1, 2, dan 3 yang terletak pada daerah sebelum pengaktifan tirai kabut air seharusnya mengalami kenaikan temperatur. Kenaikan temperatur ini merupakan akibat dari panas yang dihasilkan oleh *pool fire* terperangkap oleh tirai kabut air.

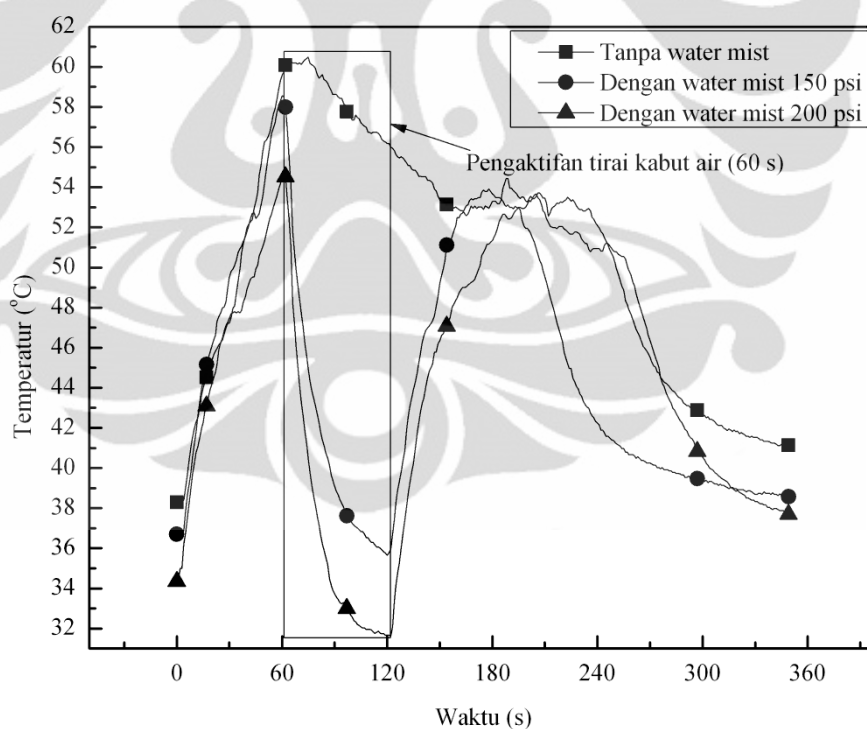
Panas yang terperangkap ini merupakan akibat dari momentum *droplet* air yang dihasilkan oleh *nozzle*. Selain itu, penguapan *droplet* air juga dapat menghasilkan perubahan tekanan akibat perubahan temperatur dipermukaan droplet air yang menguap. Momentum dan penguapan dari *droplet* air inilah yang

membuat suatu tirai yang dapat berfungsi sebagai penahan laju kalor dari *pool fire*. Sifat ini yang disebut sebagai *enclosure effect*.

Panas yang diserap oleh *droplet* air dari konveksi dan radiasi api sebanding dengan banyaknya *droplet* yang menguap[14]. Dengan formasi *droplet* yang dibentuk oleh tirai kabut air, permukaan *droplet* yang kecil sehingga meningkatkan penyerapan panas. Seperti yang ditunjukkan oleh Kanury[28] dan Herterich[29], laju evaporasi *droplet* bergantung pada:

1. Temperatur disekeliling *droplet*
2. Luas permukaan *droplet*
3. *Heat transfer coefficient*
4. Kecepatan relatif *droplet* terhadap gas yang terdapat di sekitarnya.

Untuk membandingkan pengaruh tekanan kerja tirai kabut air maka dilakukan suatu perbandingan temperatur dengan tirai kabut air setiap tekanan kerja dan tanpa pengaktifan tirai kabut air.

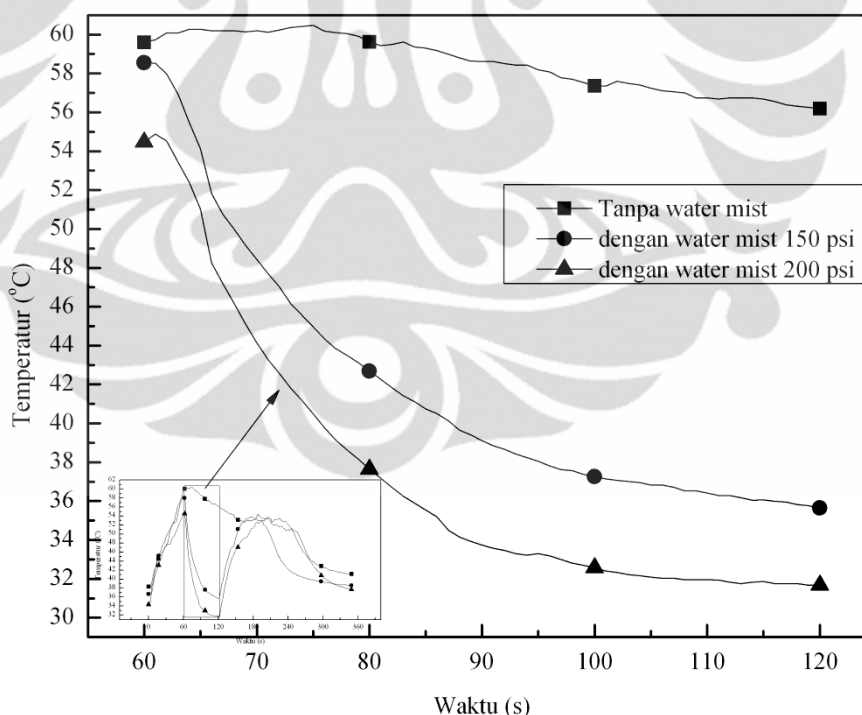


Gambar 4.4 Perbandingan temperatur untuk setiap skenario pada termokopel 5

Perbandingan temperatur termokopel 5 pada setiap skenario digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh tekanan kerja tirai kabut air pada penyerapan panas dari *pool fire*. Penggunaan temperatur pada termokopel 5

sebagai pembanding karena letak dari termokopel 5 berada setelah pengaktifan tirai kabut air.

Pada Gambar 4.4 grafik temperatur termokopel 5 terlihat penurunan temperatur maksimum pada tekanan 200 psi mencapai 31.63 °C. Apabila mencermati nilai temperatur awal yang besarnya 34.356 °C maka nilai penurunan temperatur maksimum akan lebih kecil dari temperatur awal pengukuran. Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh permukaan termokopel yang tertutup oleh *droplet* air. Tertutupnya permukaan termokopel menyebabkan temperatur yang terukur adalah *wet bulb temperatur*. Sedangkan pengukuran temperatur awal merupakan *dry bulb temperatur*. Hal yang sama juga terjadi pada tekanan 150 psi di mana penurunan temperatur maksimum mencapai 35.954 °C dengan temperatur awal 36.695 °C. Semakin besar penggunaan tekanan kerja tirai kabut air maka akan semakin besar pula kemungkinan *droplet* air menutupi permukaan termokopel sehingga dapat mengganggu pembacaan temperatur ruangan.



Gambar 4.5 Pengaruh tirai kabut air terhadap temperatur termokopel 5 untuk setiap skenario

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa pada tekanan 200 psi terjadi penurunan temperatur lebih besar daripada tekanan 150 psi. Besarnya penurunan temperatur pada termokopel 5 disebabkan oleh sejumlah panas yang di serap oleh *droplet*

yang dihasilkan oleh tirai kabut air. Besarnya laju massa air yang menguap dengan besarnya nilai laju pelepasan kalor dari *pool fire* dalam penelitian ini 0.928 kW dengan laju penguapan air sebesar 2270 kJkg⁻¹[21] pada tekanan 1 atm adalah

$$q = \dot{m} \times L$$

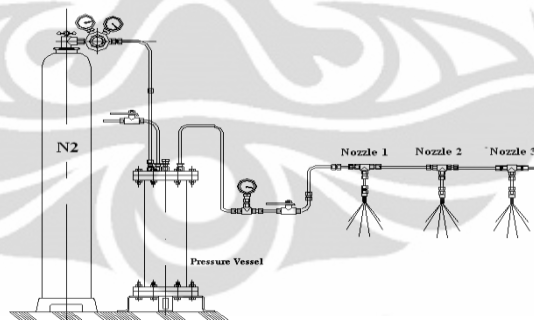
$$\dot{m} = \frac{q}{L}$$

$$\dot{m} = \frac{0.928}{2270}$$

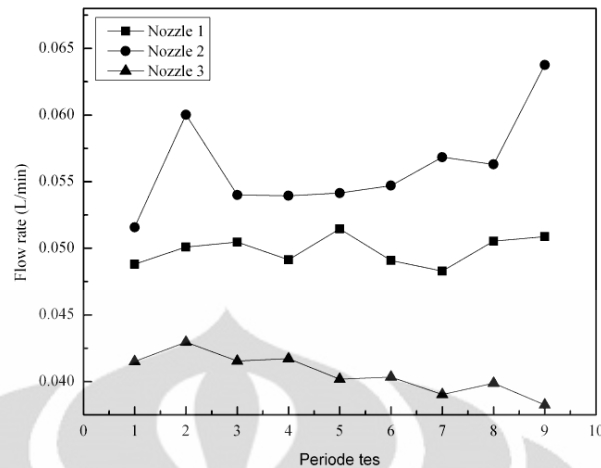
$$\dot{m} = 4.088 \times 10^{-4}$$

Dengan pengaktifan tirai kabut air selama 1 menit (60 detik), jumlah air yang menguap karena pengaruh laju pelepasan panas *pool fire* adalah 24.6 g.

Untuk mengetahui persentase besarnya penguapan air oleh panas akibat pembakaran *pool fire* maka perlu dilakukan pengambilan data tentang *flow rate* dari setiap nozzle yang digunakan dalam sistem tirai kabut air.



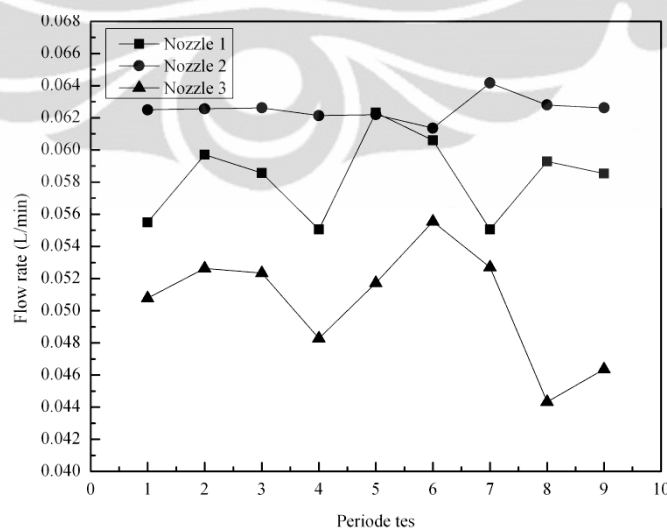
Gambar 4.6 Posisi *nozzle*



Gambar 4.7 Flow rate nozzle pada tekanan 150 psi untuk setiap pengujian

Pengambilan data dilakukan dengan menampung air yang keluar dari setiap *nozzle* dalam waktu 300 s. Pengambilan data dilakukan setelah *nozzle* aktif selama 30 s untuk memastikan bahwa *flow rate* yang dihasilkan oleh setiap *nozzle* telah stabil.

Dari sembilan tes yang dilakukan, di dapatkan grafik *flow rate* dari setiap *nozzle* yang pada Gambar 4.7 untuk tekanan 150 psi. dari grafik tersebut terlihat bahwa *flow rate* yang dihasilkan dalam setiap percobaan memiliki nilai yang berbeda untuk setiap *nozzle*. *Flow rate* pada *nozzle 2* memiliki nilai yang paling tinggi di antara *nozzle* lain, sedangkan *nozzle 1* memiliki *flow rate* yang paling rendah.



Gambar 4.8 Flow rate nozzle pada tekanan 200 psi untuk setiap pengujian

Pengambilan data dari setiap *nozzle* juga dilakukan pada tekanan 200 psi. Dari Gambar 4.8 terlihat bahwa pada tekanan 200 psi, *flow rate* yang dihasilkan

dalam setiap percobaan memiliki nilai yang berbeda untuk setiap *nozzle*. *Nozzle 2* memiliki *flow rate* yang paling besar dan *nozzle 3* memiliki *flow rate* yang paling kecil. *Flow rate* yang dihasilkan pada tekanan 150 psi lebih kecil dibandingkan pada tekanan 200 psi untuk setiap *nozzle*. Hal ini mungkin disebabkan oleh *nozzle* yang digunakan dalam penelitian ini tidak di peruntukkan bagi sistem keselamatan kebakaran berbasis kabut air.

Dari hasil pengambilan data *flow rate* di dapatkan nilai rata-rata massa air dari ketiga *nozzle* untuk sembilan periode tes pada tekanan 200 psi yaitu sebesar 171.4 g dan 146.6 g pada tekanan 150 psi dalam 60 s. Pengukuran air yang keluar dari sela-sela *flap* untuk tekanan 150 psi adalah 30.5 g dan tekanan 200 psi sebesar 31.1 g. Jumlah kabut air yang keluar *compartment* di estimasikan sebesar 15 % pada tekanan 150 psi dan 20 % pada tekanan 200 psi berdasarkan jarak semprotan air keluar *compartment*. Dari pengurangan tersebut maka dapat diketahui banyaknya air yang masuk ke dalam *compartment* adalah 106 g untuk tekanan 200 psi dan 94.2 g untuk tekanan 150 psi. Apabila dengan pengaktifan tirai kabut air selama 1 menit (60 detik), jumlah air yang menguap karena pengaruh laju pelepasan panas *pool fire* adalah 24.5 g maka jumlah air yang menguap pada tekanan 150 psi adalah 26 % dan 23% untuk tekanan 200 psi.

4.1.2 Pengaruh Tirai Kabut Air Terhadap Penyebaran Asap dalam Kebakaran Kompartemen

Penelitian mengenai pengaruh tirai kabut air terhadap penyebaran panas dalam kebakaran kompartemen ini menggunakan Alat Pengukur Opasitas DIN 50055 untuk mengetahui ketebalan asap yang dihasilkan oleh pembakaran *pool fire*. Pengukuran *optical density* asap dilakukan pada skenario:

1. Tanpa pengaktifan tirai kabut air pada jarak 0.28 m dan 0.85 m sumbu-x minimum (lihat Gambar 3.14)
2. Dengan pengaktifan tirai kabut air pada tekanan 150 psi pada jarak 0.28 m dan 0.85 m sumbu-x minimum (lihat Gambar 3.15)
3. Dengan pengaktifan tirai kabut air pada tekanan 200 psi pada jarak 0.28 m dan 0.85 m sumbu-x minimum (lihat Gambar 3.15)

Api yang dihasilkan dari pembakaran *pool fire* berbahan bakar bensin (gasoline) menimbulkan asap yang berada pada suatu kolom gas panas dengan densitas yang lebih rendah dari lingkungannya. Oleh karena itu, asap bergerak ke atas dan membentuk cendawan sampai bagian atap dan menyebar secara horizontal ke berbagai arah. Hal tersebut merupakan akibat dari fenomena *bouyant plume* yang berkaitan dengan konveksi alamiah dari asap. Struktur dari *buoyancy plume* dipengaruhi oleh gaya drag terutama viskositas yang diakibatkan oleh interaksi *plume* dengan fluida di lingkungan sekitar *plume*.

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 relative yang terjadi antara dua gaya yang merupakan rasio gaya apung dengan drag viskositas dinyatakan dalam bilangan Grashof [1], yaitu:

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_{\infty} - \rho)}{\rho\nu} = \frac{gl^3\beta\Delta T}{\nu^2}$$

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

Alat pengukur opasitas DIN 50055 melakukan pengukuran terhadap pengurangan 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[1].

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

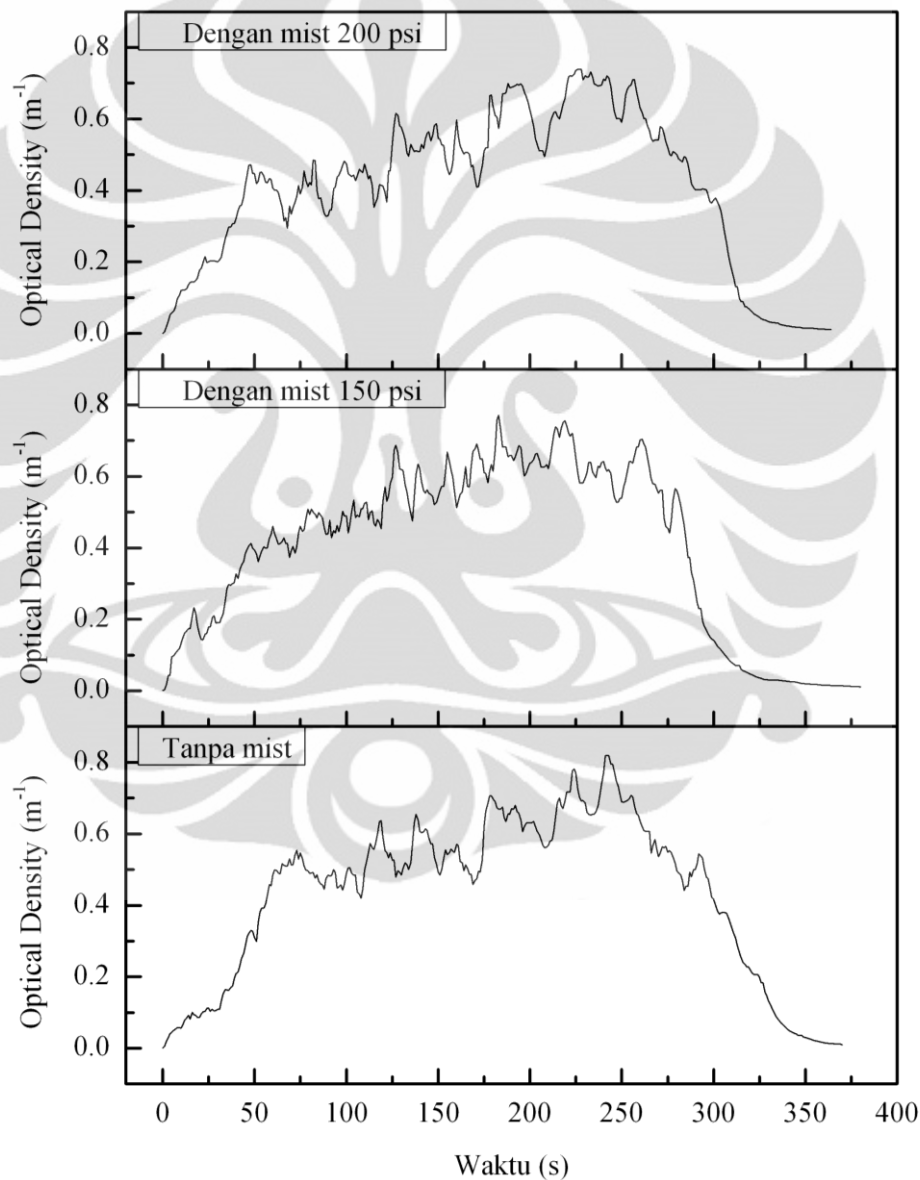
Untuk mengetahui besarnya nilai transmisi cahaya serta opasitas asap yang melewati cahaya dapat diketahui dengan persamaan:

$$T = \left(\frac{I_x}{I_0} \right) = \left(1 - \frac{N}{100} \right)$$

maka dari dua persamaan tersebut didapatkan nilai *optcal density* dari suatu asap yaitu:

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

Dari hasil penelitian di dapat data yang menghasilkan grafik *optical density* asap pada jarak 0.28 m dari arah sumbu-x minimum dari ketiga skenario yang di buat:

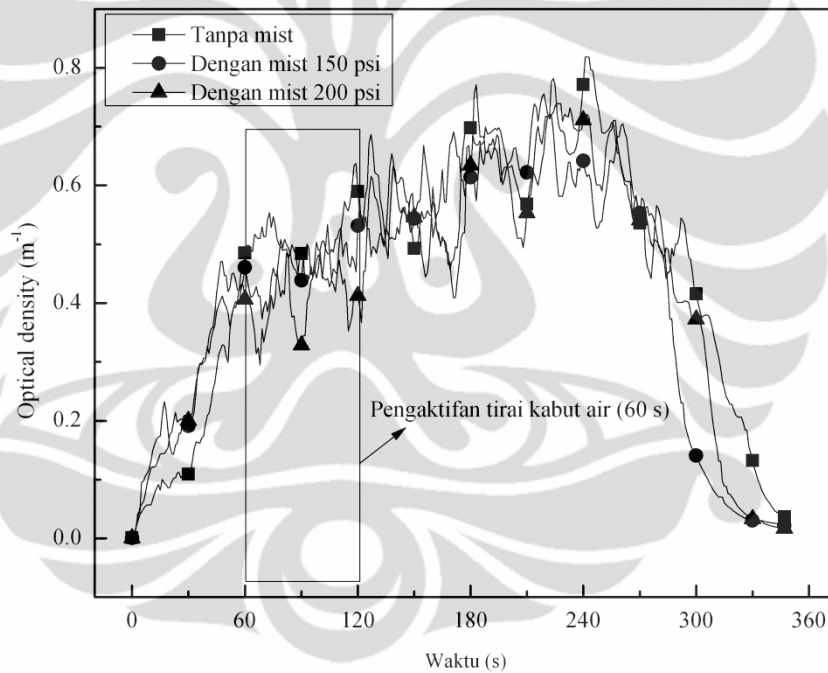


Gambar 4.9 *Optical density* asap untuk ketiga skenario pada jarak 0.28 m

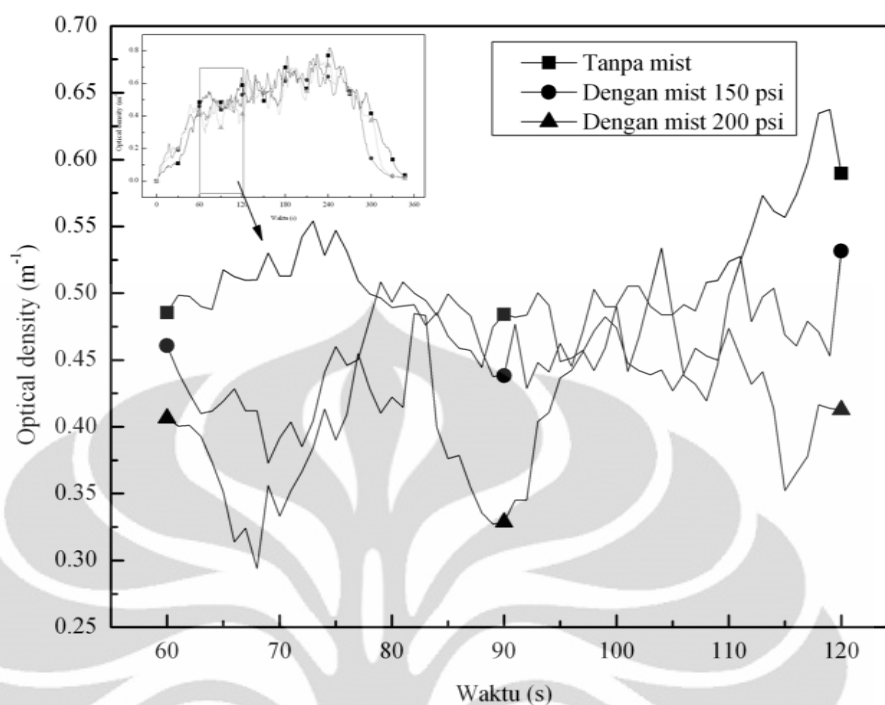
Pengaruh tirai kabut air tidak begitu terlihat pada hasil pengukuran nilai *optical density* pada jarak 0.28 m dari sumbu-x minimum. Hal tersebut

kemungkinan disebabkan oleh peletakan sistem tirai kabut air yang berada setelah sebelum tirai kabut air. Nilai dari *optical density* yang di dapat merupakan akibat dari penutupan sinar oleh asap hasil pembakaran bensin.

Emisi asap dari suatu pembakaran merupakan salah satu elemen dasar karakteristik lingkungan di sekitar api. Kondisi pembakaran di mana asap dihasilkan yaitu *flaming*, *pyrolysis*, dan *smoldering*. Asap yang berasal dari *flaming combustion* terdiri dari banyak partikel solid dan berbeda secara alamiah bergantung dari jenis bahan bakar yang terbakar. Asap dari bensin hasil pembakaran dalam fase gas merupakan hasil dari pembakaran tidak sempurna dengan temperatur reaksi pirolisis yang tinggi pada konsentrasi oksigen yang rendah.



Gambar 4.10 Perbandingan *Optical density* asap untuk setiap skenario pada jarak 0.28 m



Gambar 4.11 Pengaruh tirai kabut air terhadap *optical density* asap pada jarak 0.28 m untuk setiap skenario

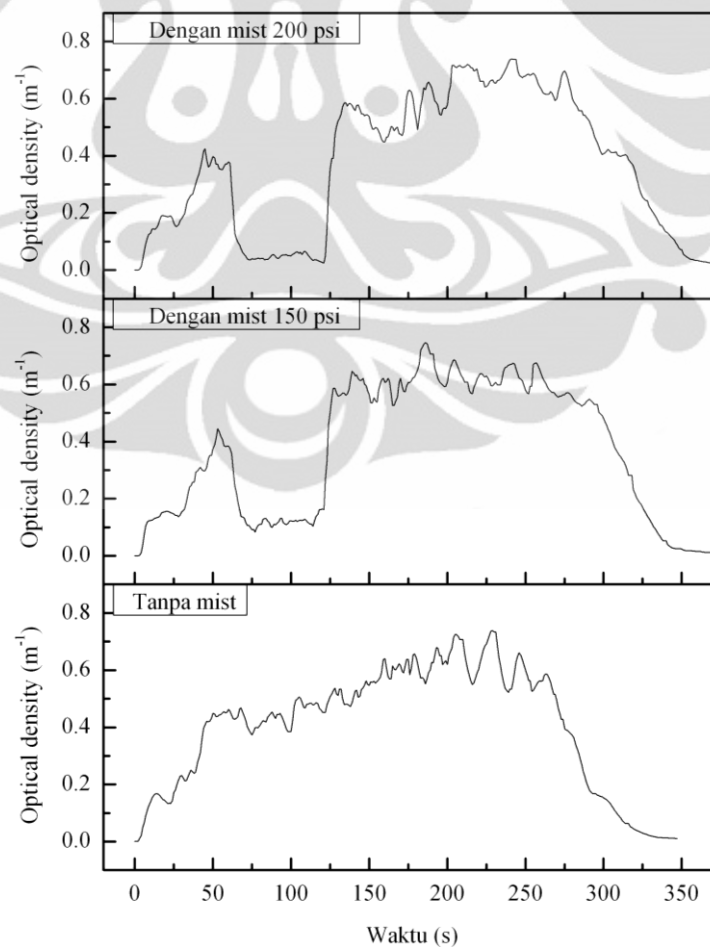
Pengaruh penggunaan tirai air sangat kecil pada jarak 0.28 m (Gambar 4.10) sebagai suatu sistem kontrol untuk menurunkan dampak penyebaran asap hasil pembakaran. Pada Gambar 4.11 terlihat adanya fluktuasi antara kondisi tanpa pengaktifan tirai kabut air dan pengaktifan tirai kabut air pada tekanan 150 psi dan 200 psi. Fluktuasi nilai *optical density* tersebut mengindikasikan bahwa pada saat tertentu setelah pengaktifan tirai kabut air, terjadi peningkatan nilai *optical density* asap pada daerah pengukuran.

Dari perhitungan persentase penggunaan tirai kabut air pada daerah pengukuran 0.28 m, di dapatkan nilai rata-rata penurunan sebesar 11 % pada tekanan 150 psi dan 6.89 % pada tekanan 200 psi. Nilai tersebut kemungkinan tidak dapat menjadi suatu acuan bahwa penggunaan tirai kabut air dapat mengurangi konsentrasi asap pada daerah pengukuran 0.28 m.

Pertentangan terjadi terkait penggunaan kabut air sebagai sistem pengendali asap. Dalam situs IWMA (*International Water Mist Association*) *section FAQ (Frequently Asked Questions)* disebutkan bahwa ketika sistem kabut air di aktifkan, asap hasil pembakaran akan bercampur dengan kabut air pada daerah sebelum pengaktifan kabut air yang dapat mengakibatkan pengurangan jarak pandang. Akan tetapi, dari beberapa tes yang telah dilakukan di terowongan

dan suatu koridor, suatu instalasi sistem kabut air dapat menyerap serta mengurangi penyebaran partikel jelaga (*soot*) dari asap. Efisiensi kinerja kabut air sangat bergantung pada *flux density* dan ukuran *droplet* air. Oleh karena itu kemampuan penyerapan asap oleh sistem kabut air tidak dapat di generalisasikan dan harus di evaluasi kasus per kasus. Hal tersebut juga penting untuk menyadari bahwa kabut air tidak dapat menyerap keluar gas-gas yang tidak larut dalam air seperti karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂). Untuk beberapa gas beracun seperti HCl akan larut kabut air pada tingkat tertentu[23].

Dalam penelitian ini juga dilakukan suatu perbedaan pada daerah pengambilan data nilai *optical density* pada *compartment fire*. Hal tersebut dilakukan untuk melihat seberapa besar pengaruh pengaktifan tirai kabut air pada penyebaran asap dalam suatu kebakaran kompartemen. Nilai *optical density* asap pada jarak 0.85 m dengan ketinggian 0.47 m dari lantai kompartemen menghasilkan suatu grafik yang terlihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Optical density* asap untuk ketiga skenario pada jarak 0.85 m

Grafik pada Gambar 4.12 menunjukkan seberapa besar pengaruh pengaktifan tirai kabut air pada jarak 0.85 m jika dibandingkan dengan kondisi sebelum pengaktifan tirai kabut air. Dari grafik tersebut diketahui bahwa nilai *optical density* mengalami penurunan akibat pengaktifan tirai kabut air. Penurunan nilai tersebut dapat disebabkan oleh penyerapan partikel asap oleh droplet air yang memiliki massa jenis lebih tinggi.

Penyerapan partikel asap oleh air tidak dapat terjadi hanya dengan sistem *spray* sederhana pada suatu sistem kabut air. Pada suatu sistem kabut air sebagai suatu sistem pemadaman, maka sistem tersebut sebenarnya tidak secara otomatis dapat meningkatkan jarak pandang karena penyerapan asap oleh *droplet* air. Untuk itu, desain dari suatu sistem kabut air harus berfokus pada[23]:

1. Optimasi penempatan *nozzle*
2. Optimasi ukuran *droplet*
3. Penggunaan ventilasi

Kombinasi yang sesuai dari ukuran dan kecepatan vektor *droplet* dibutuhkan dalam penyerapan asap. Dalam optimasi penempatan *nozzle* pada bagian atap ruangan, terdapat beberapa parameter yang dapat meningkatkan efektifitas dari kabut air, yaitu[30]:

1. Fluks *density*

Fluks *density* merupakan banyaknya kabut air dalam satuan volume (Lpm/m^3) atau dalam aplikasinya terhadap luas area (Lpm/m^2). Pada suatu penelitian model kebakaran kompartemen, peningkatan fluks *density* dapat mengurangi temperatur dalam kompartemen akan tetapi memiliki sedikit efek pada konsentrasi oksigen di dalam kompartemen. Fluks *density* dari satu *spray cone nozzle* tidak sama. Ketika *droplet* hasil dari *nozzle* saling tumpang tindih maka fluks *density* pada setiap titik penyemprotan *nozzle* berbeda.

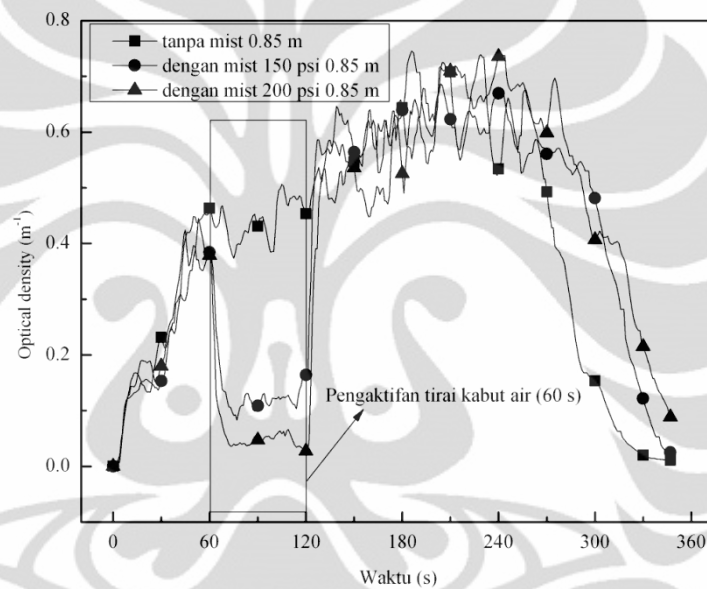
2. Spray momentum

Spray momentum sama dengan spray massa, kecepatan spray, dan arah relatif penyemprotan *nozzle*. Turbulansi yang terjadi akibat spray momentum yang di dukung oleh ukuran droplet yang tepat dapat menghambat masuknya oksigen ke bagian sebelum pengaktifan tirai kabut air dan meningkatkan

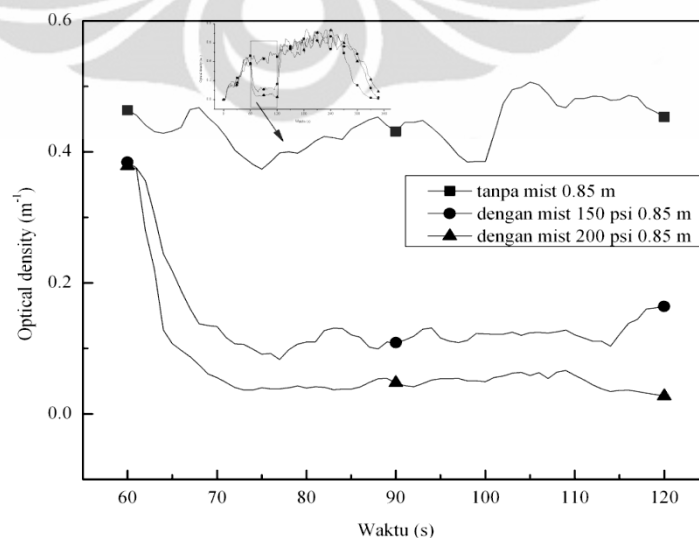
efisiensi dari penyerapan panas dan asap hasil pembakaran. Momentum dari spray *nozzle* dapat dituliskan dalam suatu rumusan sebagai berikut[30]:

$$M_w = (m_{wl} + m_{wv} + m_{wa}) V_w$$

di mana m_{wl} , m_{wv} , dan m_{wa} adalah massa air pada fase liquid, fase gas, dan udara yang ikut bersama droplet. Sedangkan V_w merupakan kecepatan vektor dari kabut air. Momentum kabut air dapat dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya adalah ukuran droplet, kecepatan droplet, tekanan dan sudut kerja dari nozzle, peletakkan nozzle, kondisi ventilasi, dan geometri kompartemen.



Gambar 4.13 Perbandingan *optical density* asap untuk setiap skenario pada jarak 0.85 m



Gambar 4.14 Pengaruh tirai kabut air terhadap *optical density* asap pada jarak 0.85 m untuk setiap skenario

Pengaruh pengaktifan tirai kabut air sangat terlihat pada jarak 0.85 m yang terlihat pada Gambar 4.13 sebagai suatu sistem kontrol untuk menurunkan dampak asap hasil pembakaran. Pada Gambar 4.14 terlihat adanya penurunan nilai *optical density* pada saat pengaktifan tirai kabut air. Penurunan nilai *optical density* pada tekanan 200 psi lebih besar jika dibandingkan dengan penurunan nilai *optical density* pada tekanan 150 psi. Dari perhitungan persentase perubahan nilai *optical density* asap (lihat Lampiran 2), diketahui bahwa terdapat rata-rata penurunan sebesar 64.65 % untuk pengaktifan tirai kabut air dengan tekanan kerja 150 psi dan 82.7 % untuk pengaktifan tirai kabut air dengan tekanan kerja 200 psi.

4.2 Analisis Hasil Simulasi FDS

Simulasi menggunakan *software* FDS dilakukan untuk mengetahui karakteristik penyebaran asap dan distribusi temperatur kebakaran kompartemen yang dihasilkan oleh suatu pembakaran bensin premium (*gasoline*). Pada simulasi ini digunakan bangunan dengan ukuran yang sesuai dengan eksperimen dengan skala 1:1. Bahan bakar yang digunakan dalam simulasi ini adalah *gasoline* di mana *properties* dari bahan bakar Tabel 3.6 pada BAB 3. Sedangkan data masukan simulasi FDS dapat dilihat pada Lampiran 4.

Laju pembakaran dari bahan bakar bensin premium (*gasoline*) sangat dipengaruhi oleh *properties* dari bensin. Besarnya nilai *heat combustion*, *heat vaporization*, *specific heat*, dan *conductivity thermal* sangat berpengaruh pada besarnya nyala api. Selain itu, besarnya nyala api juga dipengaruhi oleh luas penampang bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini.

Penampang bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini memiliki bentuk persegi dengan panjang sisi 0.0516 m. Pada keadaan sebenarnya di dalam eksperimen, wadah bahan bakar yang digunakan memiliki bentuk bulat dengan diameter 0.063 m. Pemakaian bentuk wadah bahan bakar persegi disebabkan oleh bentuk yang dapat dibuat dalam simulasi FDS hanya bentuk persegi atau persegi panjang.

Laju pembakaran bahan bakar dalam ruangan juga dipengaruhi oleh luas dari ventilasi yang merupakan media pertukaran udara. Letak dari ventilasi juga

sangat berpengaruh terhadap laju pembakaran bahan bakar. Aliran udara dalam suatu ruangan akan berbeda dengan penempatan ventilasi ruangan yang berbeda pula. Ketebalan dinding dan thermal properties dari material dinding juga sangat berpengaruh karena panas radiasi api dan panas konveksi dari hasil pembakaran akan diserap oleh dinding yang menyebabkan naiknya temperatur dinding. Dinding dapat mengakibatkan naiknya temperatur ruangan yang dapat berdampak pada meningkatnya laju penguapan bahan bakar.

Pada data hasil simulasi FDS, dihasilkan data yang tidak beraturan yang dikarenakan pengambilan data dalam satu detik dalam simulasi dilakukan tiga kali pengambilan data dengan respon yang tinggi. Data yang terlalu banyak dengan fluktuasi yang cukup tinggi mengakibatkan bentuk grafik yang dihasilkan sangat tidak beraturan. Untuk itu diperlukan suatu cara untuk mengatasi hal tersebut.

Dalam pengolahan data dengan menggunakan origin 8, terdapat fitur *smoothing* yang dapat dipergunakan untuk mengurangi ketidakaturan data. Terdapat tiga metode *smoothing* yang dapat dipergunakan, yaitu[26,27]:

1. *Adjacent-Averaging*

Metode ini pada dasarnya mengambil rata-rata dari beberapa data (sesuai dengan kebutuhan) dan merubah beberapa data tersebut menjadi data satu baru yang merupakan rata-rata dari range data yang telah ditentukan

2. *Savitzky-Golay*

Metode ini pada dasarnya berfungsi pada daerah polynomial regression. Metode ini sangat cocok untuk menghilangkan data yang memiliki fluktuasi tinggi tanpa berakibat pada bentuk dari keseluruhan grafik.

3. *Percentile Filter*

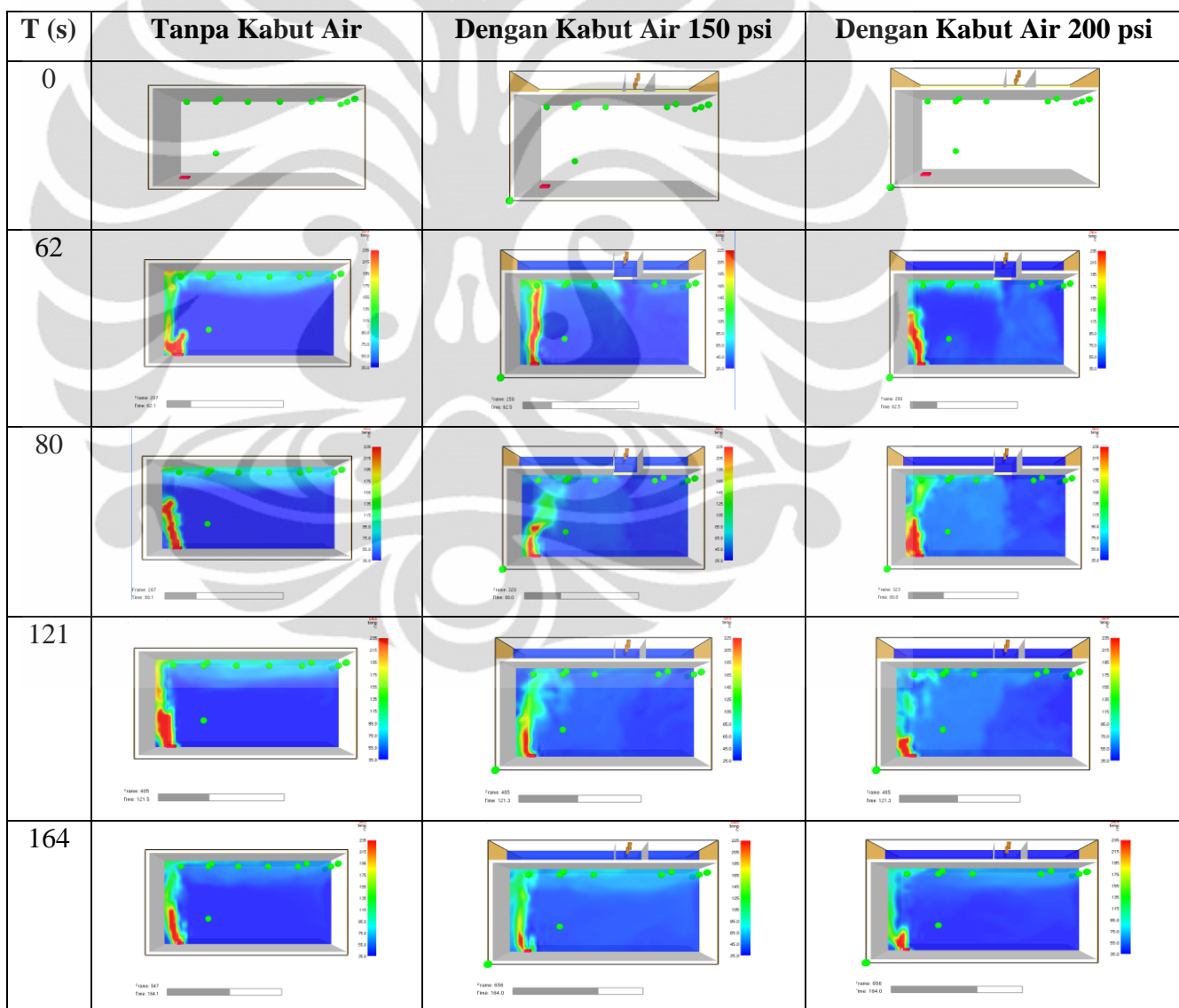
Metode ini pada dasarnya menentukan persentase tertentu dari poin data dalam data window dan merubahnya menjadi persentase data tersebut.

4. *FFT Filter*

Metode ini berbasis pada *FFT low-pass filter*. Metode ini biasanya digunakan ketika frekuensi ketidakaturan lebih besar daripada bentuk grafik yang sebenarnya. Frekuensi data yang kurang atau lebih besar dari bentuk grafik yang sesuai akan di hilangkan.

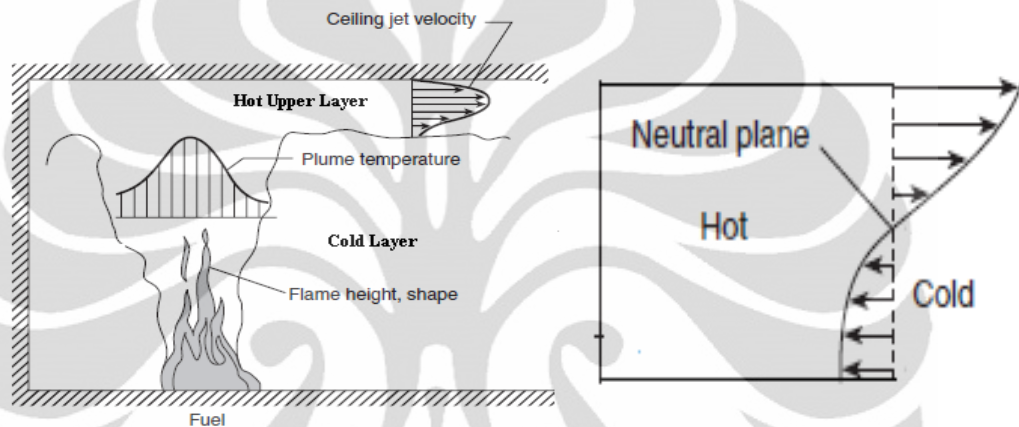
Dalam pengolahan data dalam simulasi ini, dipergunakan *smoothing* berjenis *Savitzky-Golay*. Metode ini di pilih dikarenakan data yang dihasilkan dari hasil *smoothing* akan memiliki karakteristik nilai maksimum dan nilai minimum yang sama dengan data awal. Nilai minimum dan nilai maksimum sangat penting dalam penelitian ini karena dibutuhkan untuk mengetahui nilai yang tertinggi hasil pengukuran temperatur dan nilai *optical density* asap.

Dalam simulasi ini, tirai kabut air digunakan untuk mengurangi distribusi temperatur yang dihasilkan oleh pembakaran bensin. Pada Gambar 4.15 terlihat pola distribusi temperatur pembakaran bahan bakar dalam kompartemen.



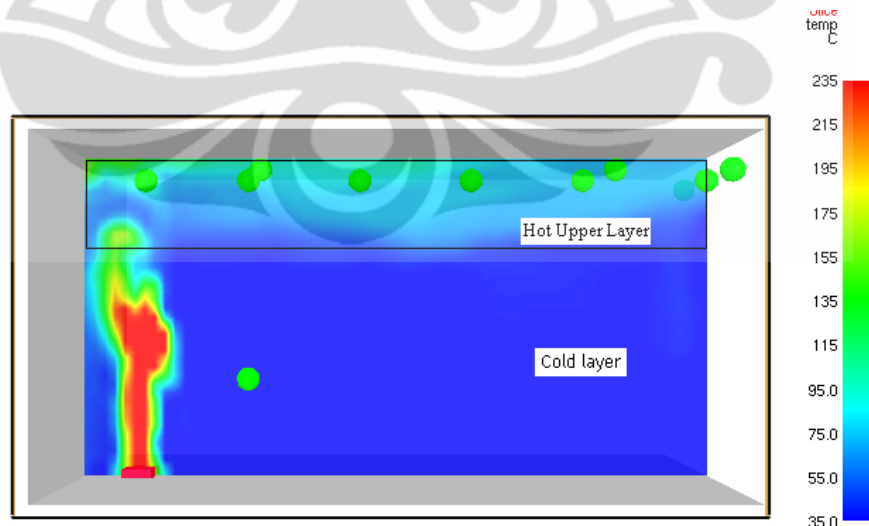
Gambar 4.15 Pola distribusi temperatur hasil simulasi pada daerah sumbu-y 0.25 m

Pola distribusi temperatur simulasi (Gambar 4.15) dalam kompartemen akibat pembakaran bahan bakar menghasilkan dua bagian yaitu *hot layer* dan *cold layer*. *Hot layer* disebabkan oleh panas yang naik ke atas karena adanya gaya *bouyancy* dari api sedangkan *cold layer* disebabkan oleh aliran udara dari ventilasi. Pada suatu kebakaran kompartemen, panas yang telah sampai pada atap ruangan akan di teruskan secara horizontal karena adanya hambatan panas oleh atap kompartemen. Penyebaran panas pada atap kompartemen menyebabkan suatu aliran *ceiling jet velocity*.



Gambar 4.16 Aliran udara pada kebakaran kompartemen

Pada hasil simulasi juga dapat dilihat bagian hot layer dan cold layer yang disebabkan oleh panas hasil pembakaran bensin.

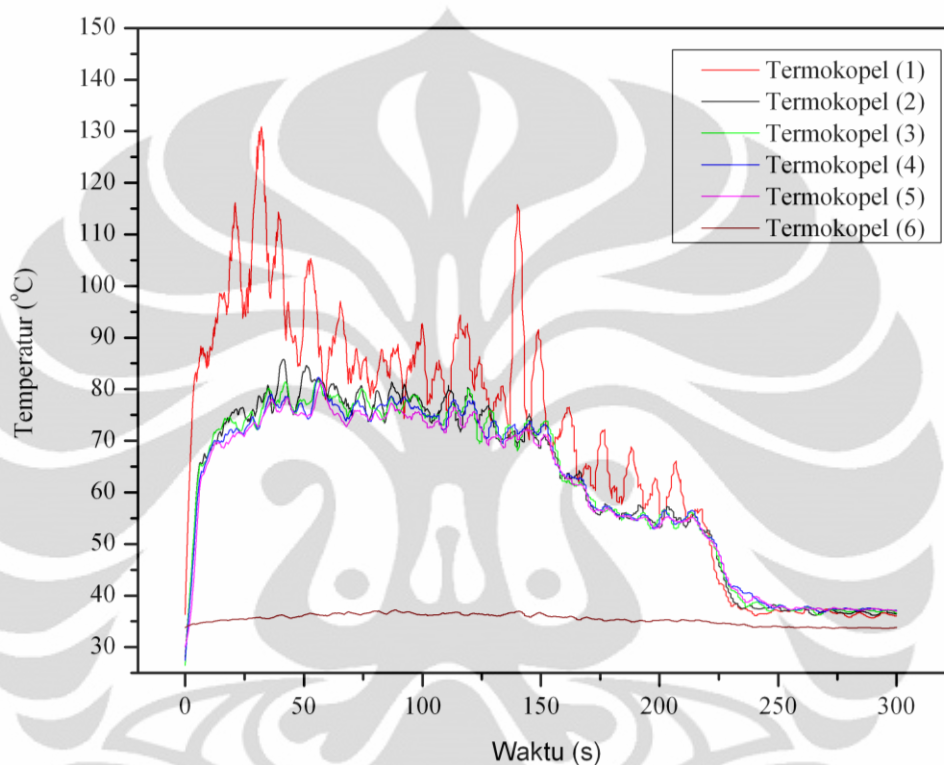


Gambar 4.17 Distribusi temperatur simulasi

Distribusi temperatur terjadi dengan nilai yang besar pada daerah dekat atap kompartemen. Hal inilah yang menyebabkan penempatan termokopel dalam

eksperimen dan simulasi pada posisi 0.47 m dari lantai kompartemen. Pengukuran ini dilakukan pada daerah dengan rata-rata temperatur yang tinggi sehingga dapat diketahui seberapa besar pengaruh dari tirai kabut air pada kondisi tersebut.

Hasil pengukuran temperatur simulasi tanpa pengaktifan tirai kabut air menghasilkan suatu grafik distribusi temperatur.



Gambar 4.18 Distribusi temperatur simulasi tanpa tirai kabut air

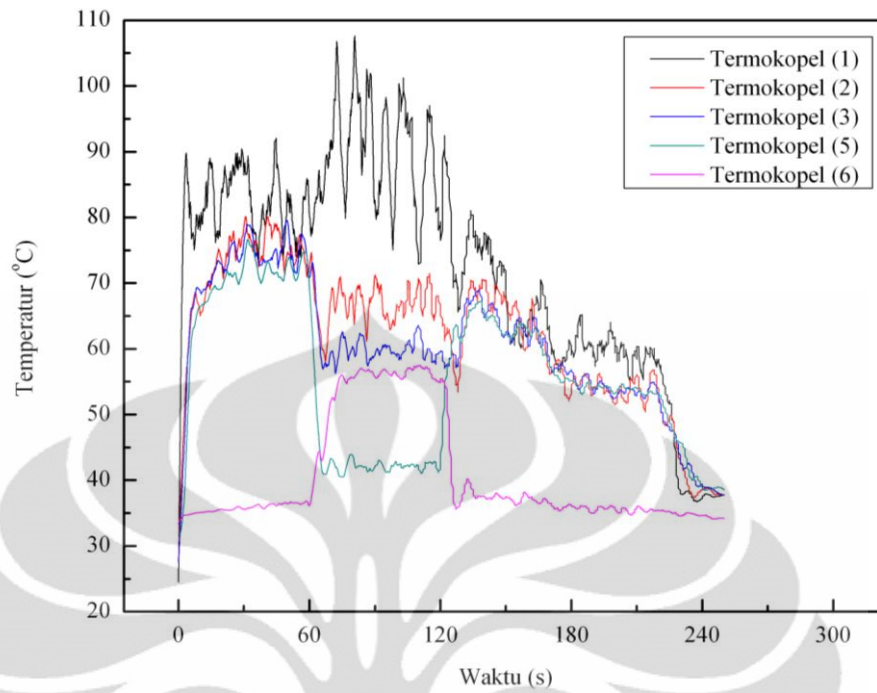
Dari Gambar 4.18, Temperatur pada termokopel 1 memiliki nilai yang paling besar. Sementara itu, temperatur pada termokopel 2, 3, 4, dan 5 memiliki nilai yang hampir sama. Hal ini mungkin disebabkan oleh pelepasan panas pada ruangan kompartmen simulasi sangat kecil. Pengesetan temperatur awal pada kompartmen juga dapat menyebabkan nilai temperatur menjadi sama. Nilai temperatur pada hasil eksperimen akan menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber api (lihat Gambar 4.1).

Temperatur yang terukur oleh *device* termokopel merupakan hasil dari panas radiasi dan konveksi api serta produk pembakaran. Perpindahan panas secara radiasi diselesaikan dengan menggunakan teknik yang sama dengan Finite Volume Method (FVM) untuk suatu perpindahan panas secara konveksi[3].

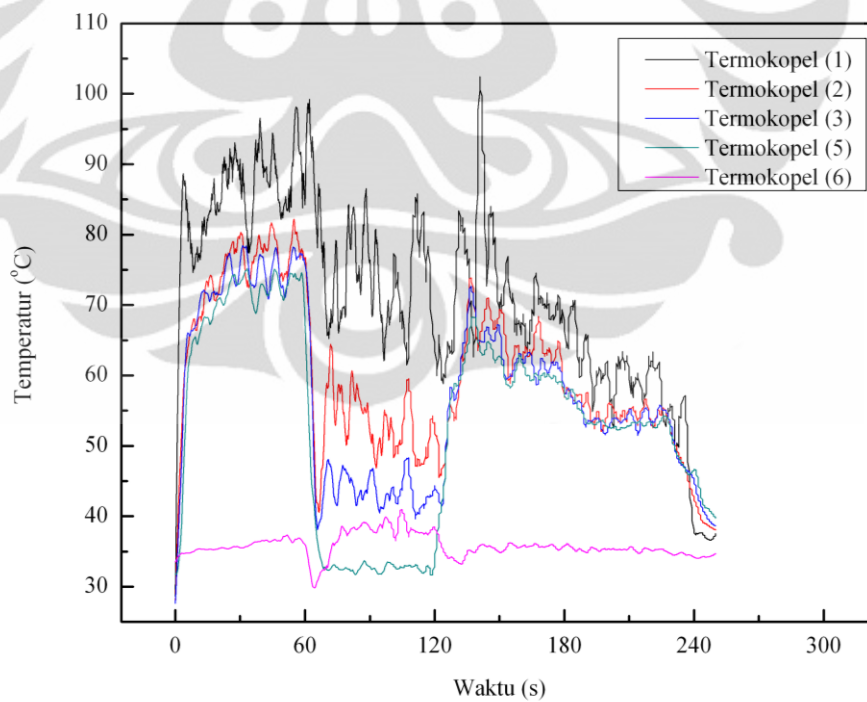
Terdapat beberapa keterbatasan dari model ini yaitu untuk nilai *absorption coefficient* untuk *smoke-laden* gas yang merupakan suatu fungsi yang kompleks dari komposisi dan temperatur suatu gas. Hal ini disebabkan oleh penyederhanaan model pembakaran, komposisi kimia dari komposisi asap hasil pembakaran, terutama pada *soot* (jelaga) asap yang berakibat pada penyerapan dan emisi panas radiasi. Selain itu, *properties* dari suatu material dan bahan bakar pada kondisi aktual sering kali sulit untuk dapat diketahui. Proses fisik dari pembakaran, perpindahan panas baik secara radiasi, konveksi dan konduksi lebih rumit representasi matematik yang terdapat dalam FDS yang sensitif terhadap parameter dalam bentuk numerik maupun fisik.

Keterbatasan dari model yang digunakan untuk suatu perpindahan panas dalam simulasi FDS yaitu perpindahan panas radiasi terbagi melalui sekitar 100 sudut solid. Untuk suatu target yang letaknya jauh dari sumber radiasi, seperti pada suatu nyala api, dapat mengakibatkan distribusi panas radiasi yang tidak seragam. Hal ini dapat terlihat pada suatu visualisasi suhu permukaan suatu benda dimana penyebaran panas akan dipengaruhi oleh banyaknya sudut pada suatu permukaan benda. Permasalahan ini dapat dikurangi dengan menambah jumlah grid pada suatu benda agar lebih solid akan tetapi hal tersebut akan menambah waktu komputasi dari suatu simulasi.

Pada simulasi ini juga dilakukan pada kondisi pengaktifan tirai kabut air. terlihat pada Gambar 4.15 pola distribusi temperatur pada saat pengaktifan sistem tirai kabut air. Pada detik ke 62 dan 80 terlihat adanya *enclosure effect* dari tirai kabut air terhadap panas yang dihasilkan oleh produk pembakaran. *Enclosure effect* ini yang kemudian menyebabkan penurunan distribusi temperatur pada daerah setelah tirai kabut air.



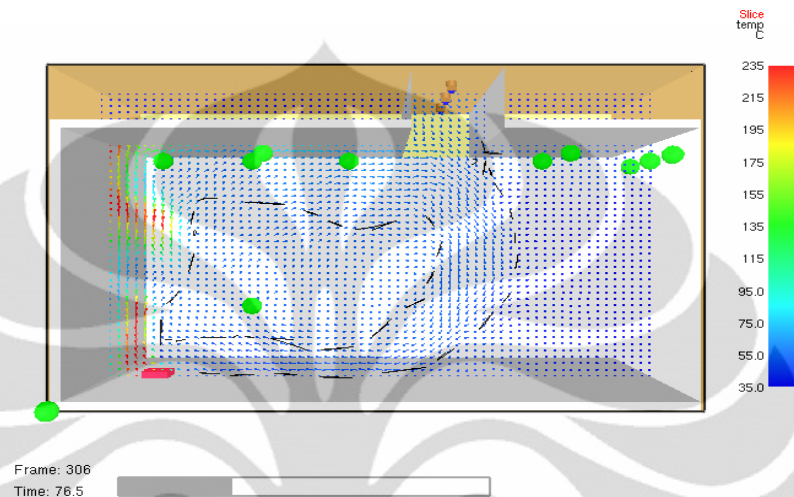
Gambar 4.19 Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air 150 psi



Gambar 4.20 Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air 200 psi

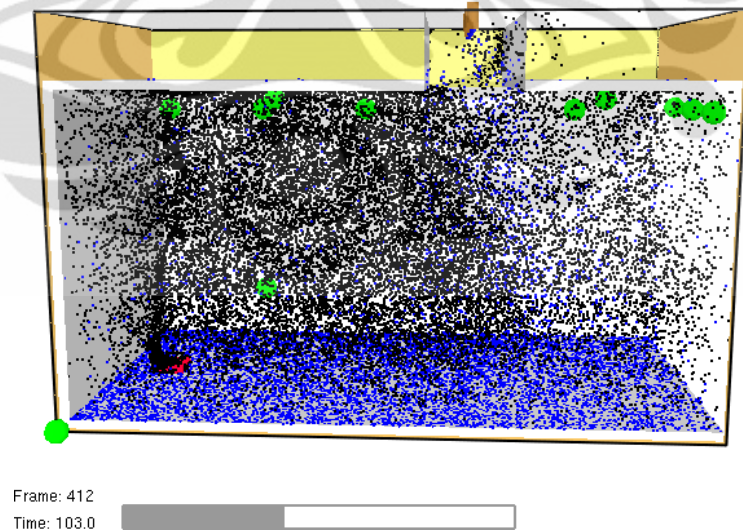
Terlihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20, terjadi penurunan temperatur pada termokopel 2, 3, dan 5 setelah pengaktifan tirai kabut air. Penurunan

temperatur paling besar terjadi pada termokopel 5 yang terletak setelah tirai kabut air. Temperatur pada termokopel 1 meningkat akibat pengaktifan tirai kabut air. Peningkatan ini terjadi akibat panas yang terperangkap pada daerah sebelum tirai kabut air. Penyebab peningkatan temperatur termokopel 1 dapat diketahui dengan melihat vektor temperatur pada Gambar 4.21.

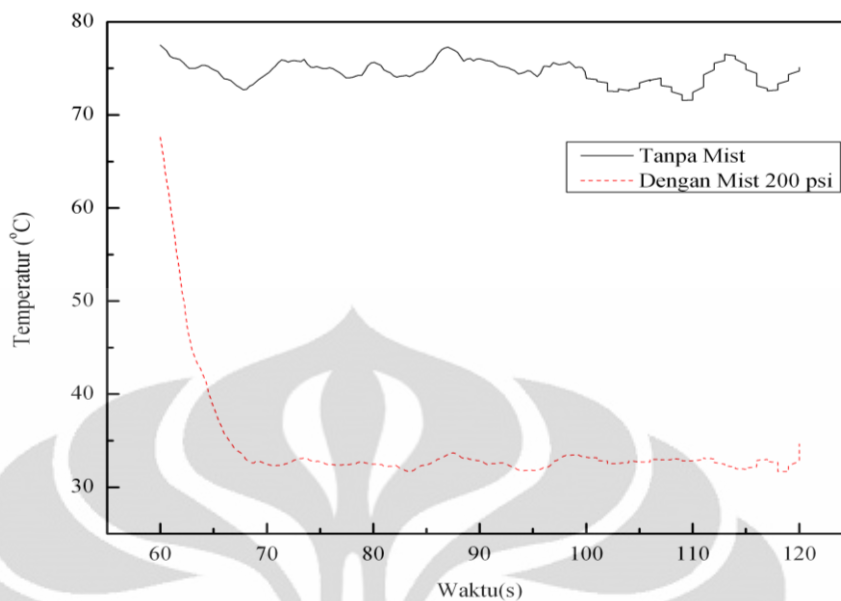


Gambar 4.21 Vektor kecepatan temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air

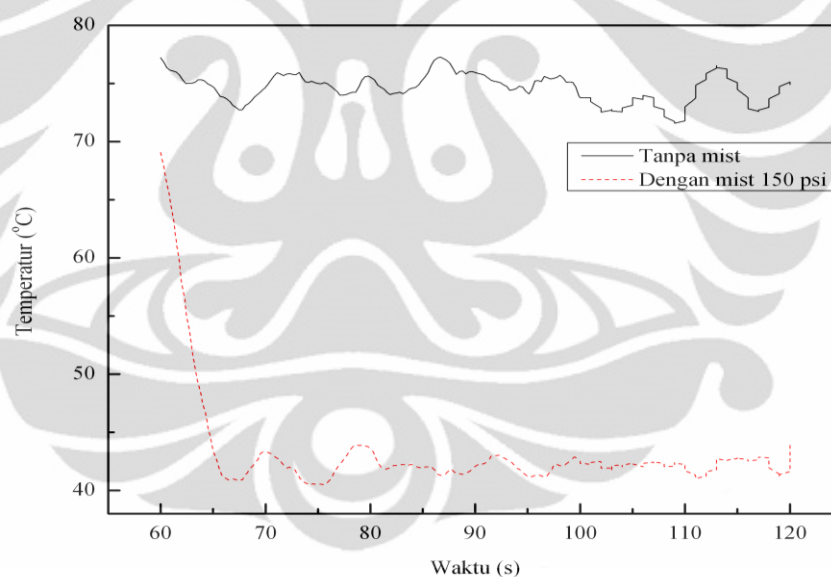
Penurunan temperatur pada termokopel 2 dan 3 dapat disebabkan oleh *droplet* air yang menempel pada permukaan termokopel.



Gambar 4.22 Partikel asap dan *droplet* air

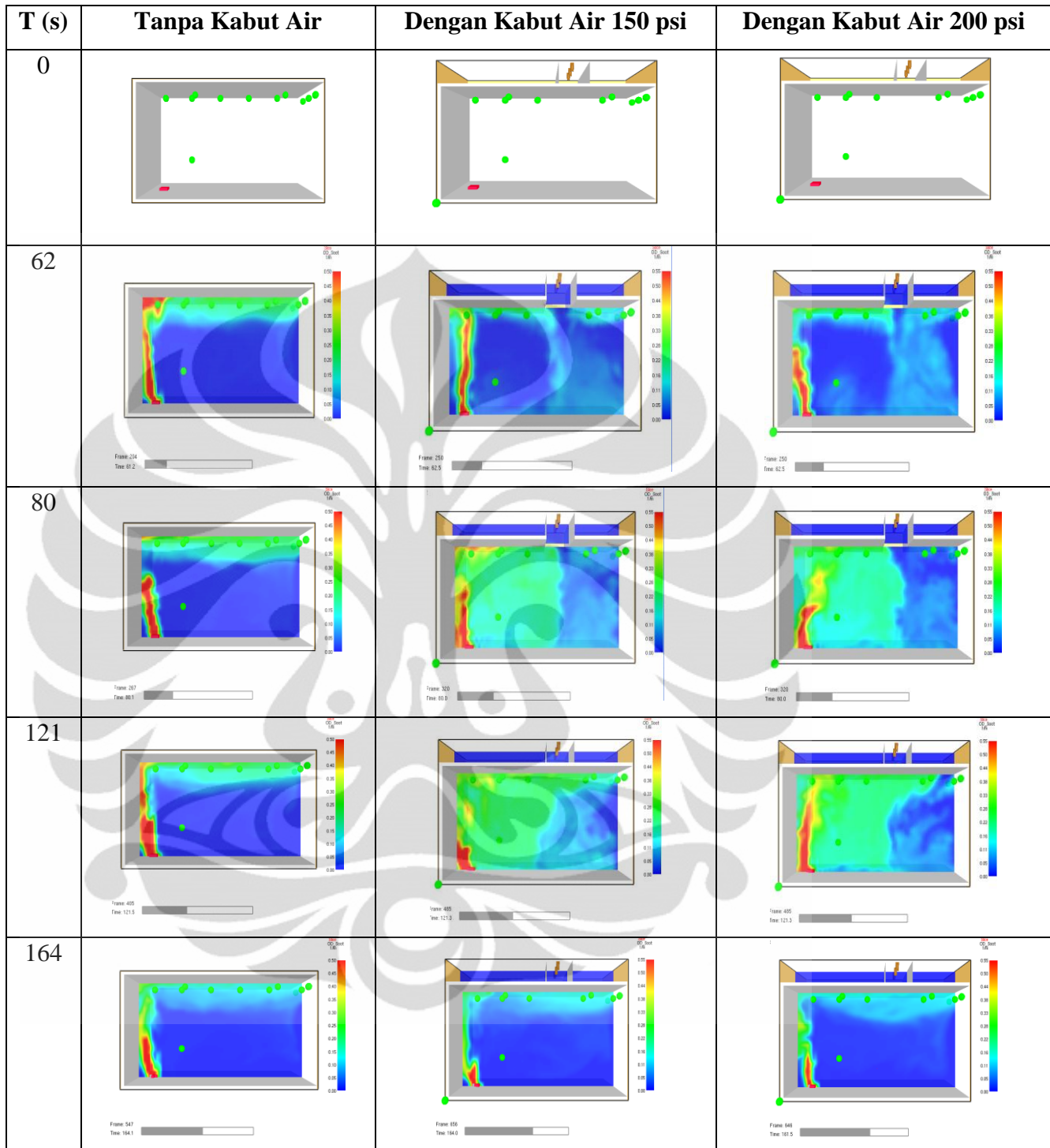


Gambar 4.23 Perbandingan temperatur termokopel 5 simulasi tanpa dan dengan tirai kabut air tekanan 200 psi



Gambar 4.24 Perbandingan temperatur termokopel 5 simulasi tanpa dan dengan tirai kabut air tekanan 150 psi

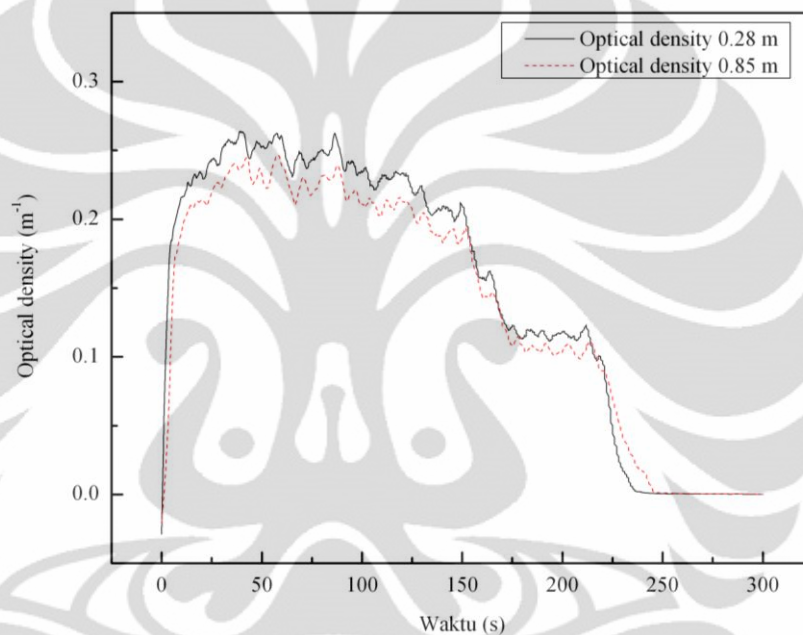
Pengaruh tekanan juga terlihat dari hasil simulasi yang dilakukan di mana penurunan temperatur pada termokopel 5 lebih besar terjadi karena pengaruh tirai kabut air pada tekanan 200 psi dibandingkan dengan tekanan 150 psi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24 yang menunjukkan perbandingan temperatur pada termokopel 5 untuk setiap tekanan di bandingkan dengan kondisi tanpa pengaktifan tirai kabut air.



Gambar 4.25 Pola penyebaran asap hasil simulasi pada daerah sumbu-y 0.25 m

Pada simulasi ini, kemunculan asap dan penyebaran asap dalam kompartemen di simulasikan dalam FDS. Untuk setiap satuan pengambilan data, fraksi campuran pada setiap *grid cell* merupakan konsentrasi asap yang berada

dalam suatu aliran dengan produk pembakaran lainnya. Besarnya konsentrasi asap dipengaruhi oleh nilai *soot yield* dan *mass burning rate*. Dalam simulasi ini digunakan nilai *soot yield* sebesar 0.027 gg^{-1} yang di dapat melalui percobaan dengan perhitungan besarnya *soot yield* dapat dilihat pada Lampiran 1. Nilai *soot yield* yang di dapat dari hasil percobaan lebih kecil dibandingkan dengan nilai *soot yield* dari literatur yaitu sebesar 0.038 gg^{-1} [5]. Hasil percobaan yang lebih kecil dari literatur kemungkinan disebabkan oleh asap yang keluar dari penampung sehingga tidak terhitung pada saat pengujian berlangsung.

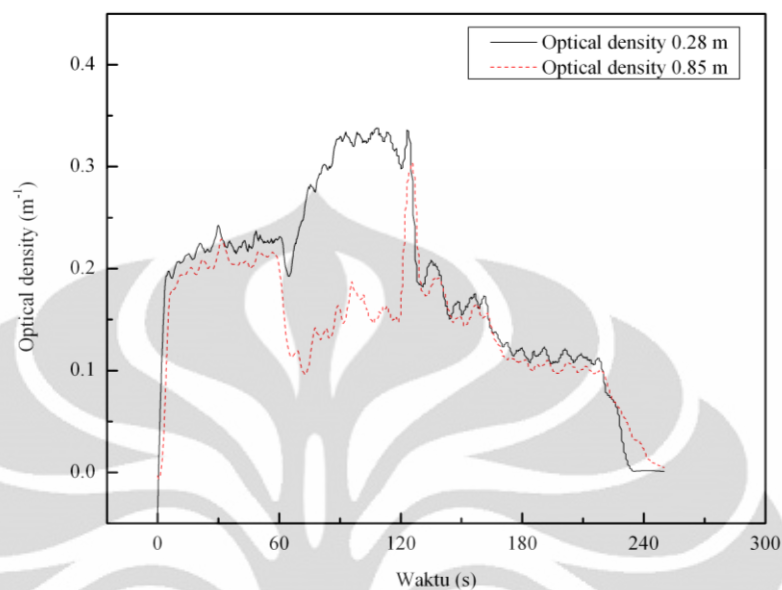


Gambar 4.26 *Optical density* simulasi tanpa pengaktifan tirai kabut air

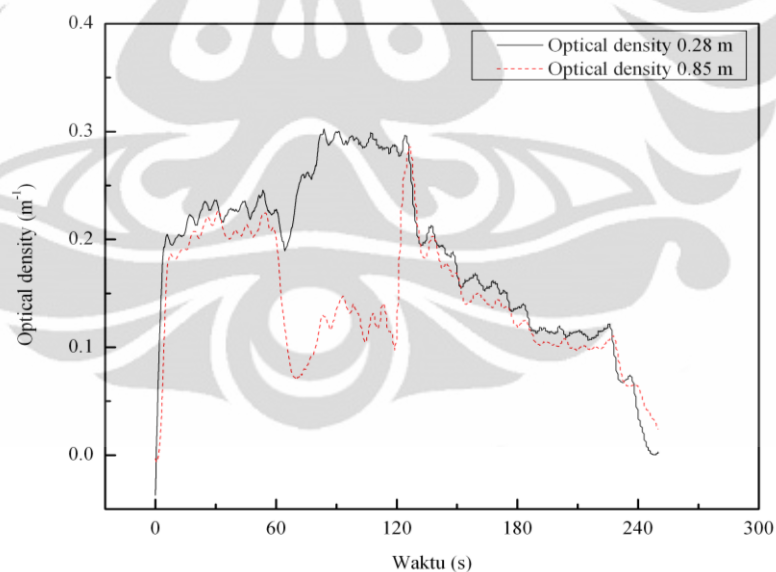
Dari Gambar 4.26 terlihat grafik yang merupakan nilai *optical density* hasil simulasi FDS. Dari bentuk grafik tersebut, terlihat bahwa produksi asap pada simulasi berkaitan dengan fungsi pelepasan panas bahan bakar yang mengakibatkan perubahan temperatur. Semakin tinggi laju pelepasan bahan bakar dari material, maka akan semakin banyak asap yang dihasilkan.

Pada simulasi ini, pengaruh tirai kabut air terhadap penyebaran asap pembakaran bensin dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pengaruh tirai kabut air pada asap hasil pembakaran bensin dapat menjadi suatu pengontrol asap hanya pada daerah setelah tirai kabut air. Pada daerah tersebut terlihat bahwa konsentrasi asap berkurang karena pengaruh tirai kabut air. Akan tetapi, pengaruh tirai kabut air

pada daerah sebelum tirai kabut air mengakibatkan meningkatnya konsentrasi asap.

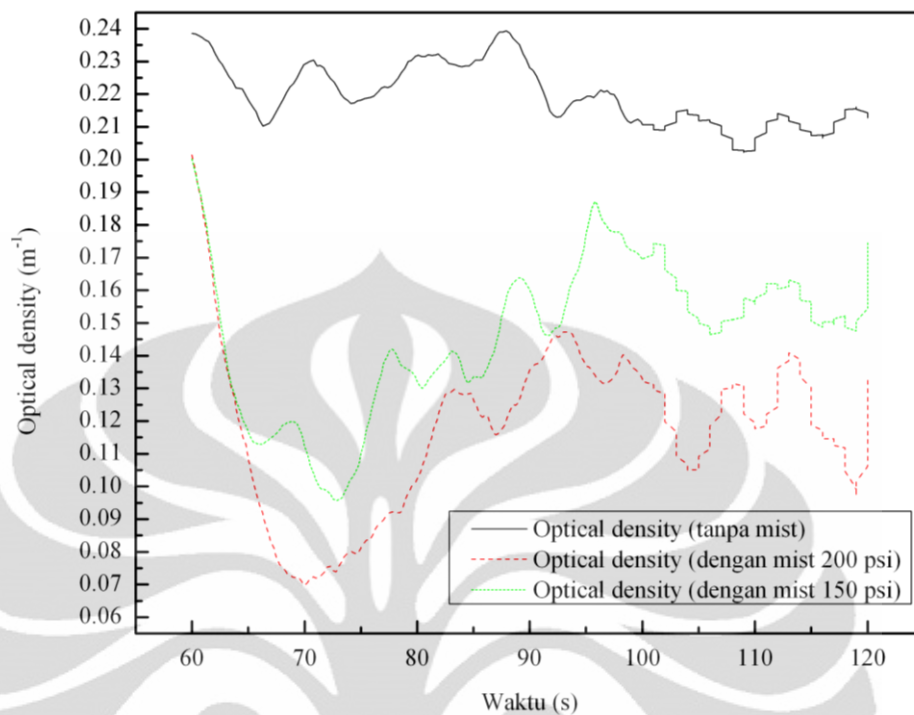


Gambar 4.27 *Optical density* simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 150 psi



Gambar 4.28 *Optical density* simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 200 psi

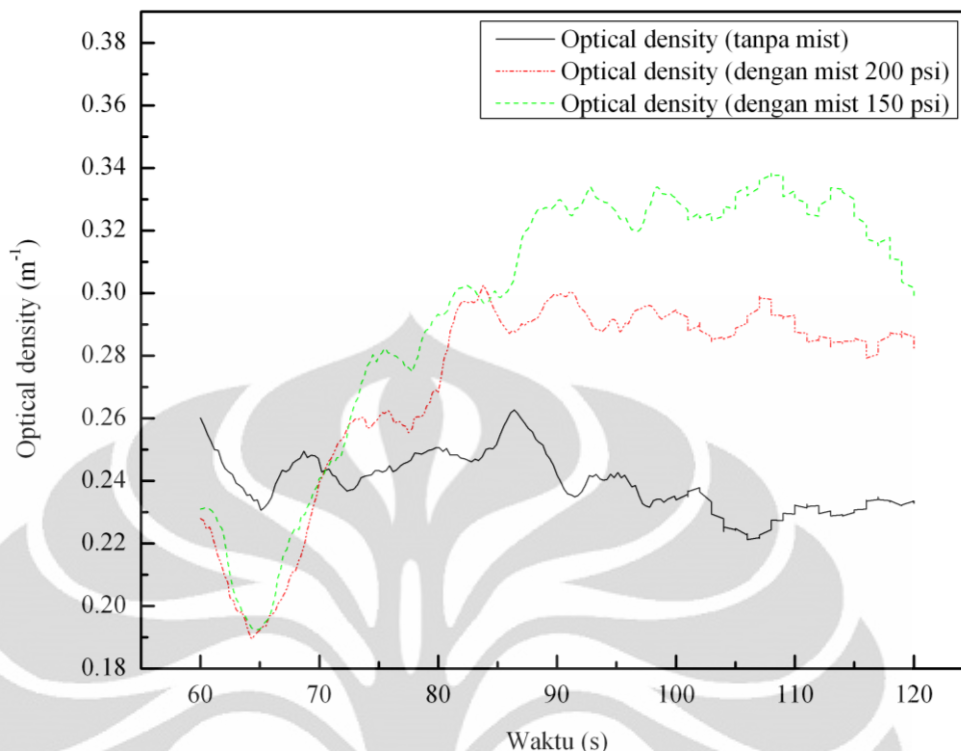
Pada Gambar 4.29 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai *optical density* asap pada daerah pengukuran 0.85 m setelah pengaktifan tirai kabut air. Hasil simulasi ini memiliki hasil yang sama dengan eksperimen yang telah dilakukan di mana terjadi penurunan nilai *optical density* asap pada daerah pengukuran 0.85 m.



Gambar 4.29 Pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi pada jarak 0.85 m

Perbandingan pengaruh tirai kabut air pada setiap kondisi simulasi pada jarak 0.85 m dapat di lihat pada Gambar 4.29. Pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap pada daerah pengukuran 0.85 m akan meningkat sesuai dengan besarnya *flow rate* kabut air yang dihasilkan. Pada simulasi ini, nilai *flowrate* pada *nozzle* 1, 2, dan 3 adalah 0.04986, 0.056142, dan 0.040598 untuk tekanan 150 psi dan 0.0583, 0.0626, 0.0505.

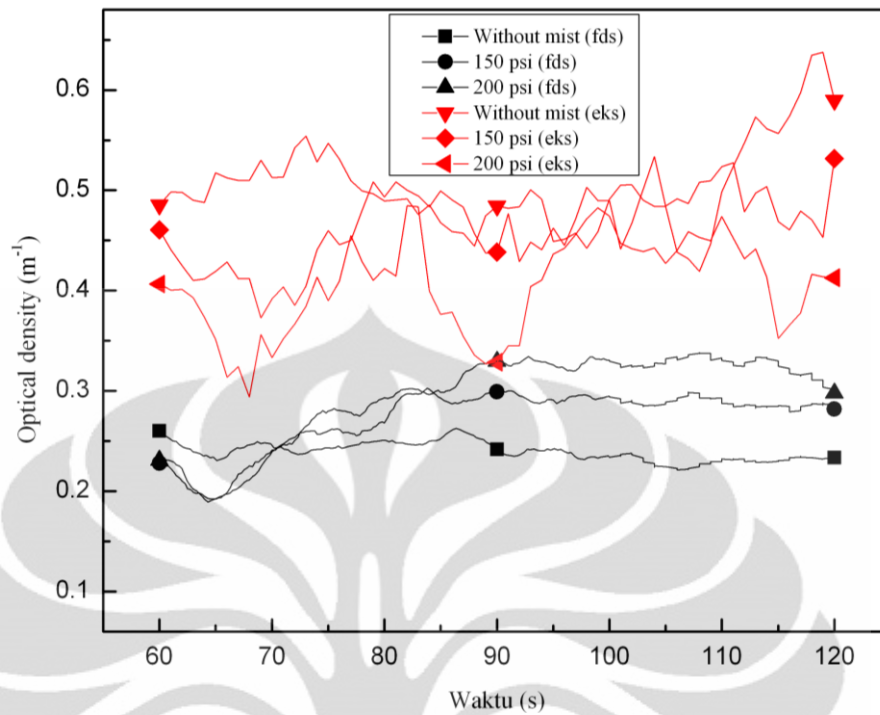
Pengaruh penurunan nilai *optical density* asap pada kompartemen juga dipengaruhi oleh *smoke scrubbing* yang dipengaruhi oleh *fluks density* dan ukuran dari *droplet*. *Smoke scrubbing* terjadi di mana partikel dari asap terserap oleh *droplet* air yang menyebabkan asap yang seharusnya melintasi daerah kabut air akan menyatu dengan *droplet* dan ikut jatuh bersama air. Ukuran *droplet* yang sesuai berpengaruh pada efektifitas *smoke scrubbing*. Hal ini berkaitan dengan kelarutan produk hasil pembakaran dalam air. Apabila nilai kelarutan dari produk pembakaran sangat kecil, maka produk pembakaran tersebut lebih sulit untuk menyatu dengan *droplet* air[25].



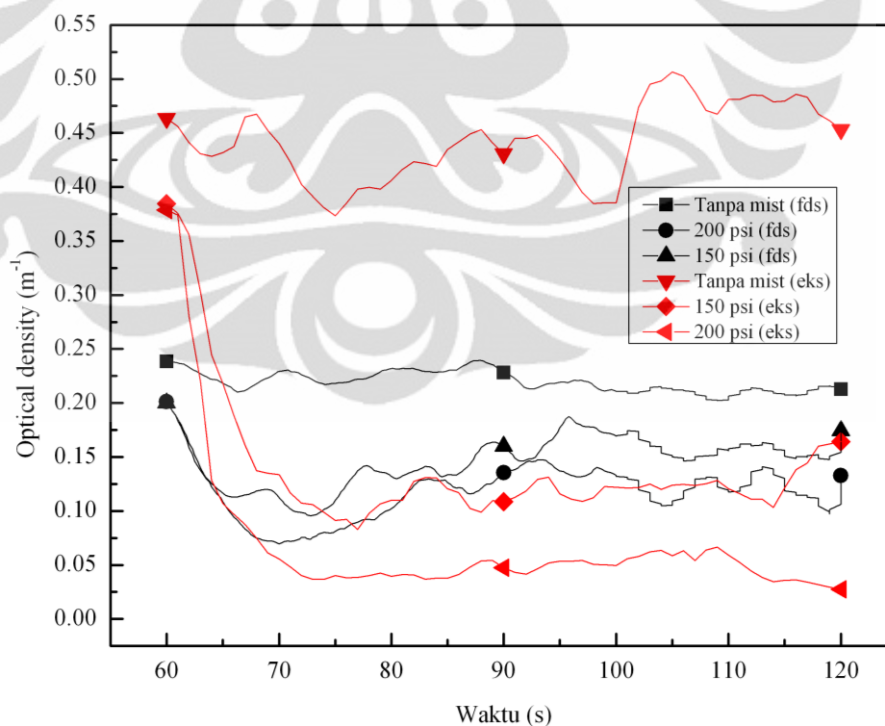
Gambar 4.30 Pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi pada jarak 0.28 m

Perbandingan nilai *optical density* simulasi juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap daerah sebelum tirai kabut air. Dari Gambar 4.30 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai *optical density* setelah pengaktifan tirai kabut air. Peningkatan ini terjadi disebabkan oleh terkumpulnya asap hasil pembakaran pada daerah sebelum tirai kabut air. Asap yang seharusnya keluar melalui ventilasi yang terdapat pada sumbu-x maksimum akan tertahan dan membentuk suatu aliran yang disebabkan oleh laju aliran tirai kabut air. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.25 pada detik ke-80.

Dari gambar tersebut terlihat peningkatan nilai *optical density* asap pada daerah sebelum tirai kabut air apabila kita membandingkan antara detik ke-62 dan detik ke-80. Terlihat pada Gambar 4.25, pada lima detik awal pengaktifan tirai kabut air, nilai *optical density* menurun dan kemudian meningkat dengan penambahan waktu pengaktifan tirai kabut air.



Gambar 4.31 Perbandingan pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi dan hasil eksperimen pada jarak 0.28 m

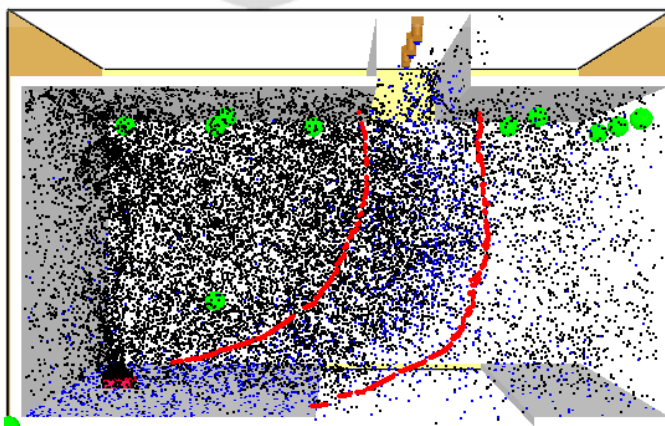


Gambar 4.32 Perbandingan pengaruh tirai kabut air pada penyebaran asap hasil simulasi dan hasil eksperimen pada jarak 0.85 m

Perbandingan hasil eksperimen dengan hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.32. Penurunan nilai *optical density* terjadi pada daerah pengukuran 0.85 m. penurunan nilai *optical density* ini terjadi baik pada hasil eksperimen dan hasil simulasi FDS. Sedangkan kenaikan nilai *optical density* sangat terlihat pada hasil simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen pada daerah 0.28 m sebelum tirai kabut air. Fluktuasi nilai hasil eksperimen pada daerah tersebut tidak dapat menentukan pengaruh tirai kabut air pada daerah sebelum kabut air walaupun sebagian besar data menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai *optical density* pada daerah sebelum tirai kabut air.

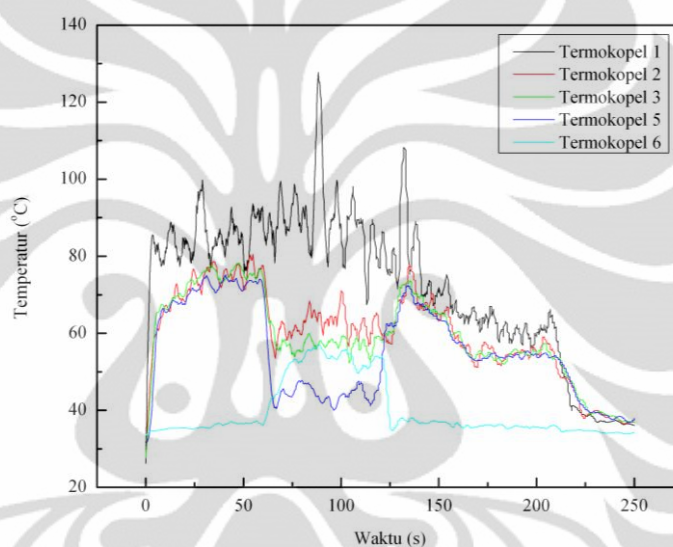
Nilai *optical density* dari eksperimen lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal ini terkait dengan data masukan *soot yield* yang mungkin lebih kecil daripada nilai *optical density* untuk bahan bakar premium yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, *thermal properties* dari material juga berpengaruh pada laju pembakaran bahan bakar yang dapat memengaruhi laju produksi dari asap yang di hasilkan.

Terlihat pada hasil simulasi yang telah dilakukan, penyebaran partikel kabut air yang dihasilkan oleh *nozzle* mempengaruhi hasil penelitian. Hal tersebut diakibatkan oleh partikel kabut air yang menempel pada permukaan termokopel dan partikel kabut air yang melewati daerah pengukuran *optical density* asap. Penyebaran partikel kabut air ini kemungkinan disebabkan oleh tumbukan partikel kabut air dengan lantai kompartemen. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu simulasi dengan kondisi lantai kompartemen yang dilubangi sehingga diharapkan terjadi pengurangan penyebaran partikel kabut air.

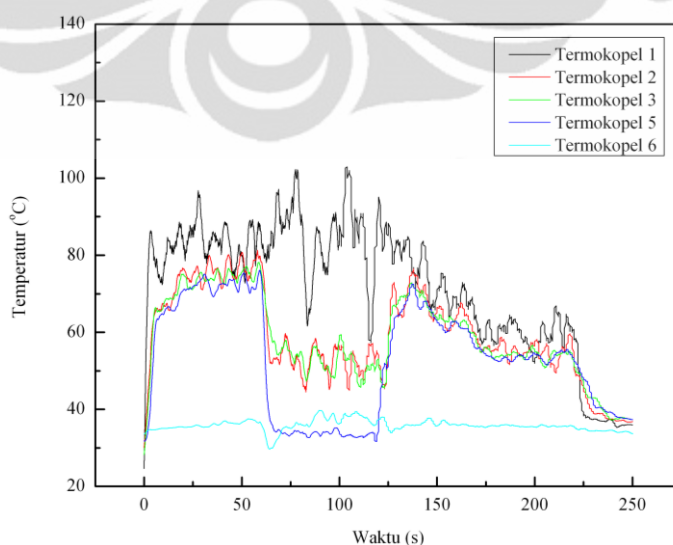


Gambar 4.33 Pola aliran partikel hasil pembakaran dan partikel kabut air pada kondisi dengan pelubangan pada bagian lantai kompartemen

Gambar kompartemen untuk kondisi dengan pelubangan pada bagian lantai, dapat dilihat pada lampiran 5. Dari simulasi yang telah dilakukan, dapat dilihat pada Gambar 4.33 yang merupakan pola aliran partikel hasil pembakaran. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa aliran udara dalam kompartemen dan aliran produk hasil pembakaran menyebabkan kabut air tidak mengalir secara vertikal dan keluar melalui lubang pada lantai. Kabut air membentuk suatu aliran menuju bagian sumber api sehingga pelubangan pada bagian lantai kompartemen tidak banyak mempengaruhi penutupan pada daerah pengukuran *optical density* asap dan pengukuran temperatur dengan termokopel.

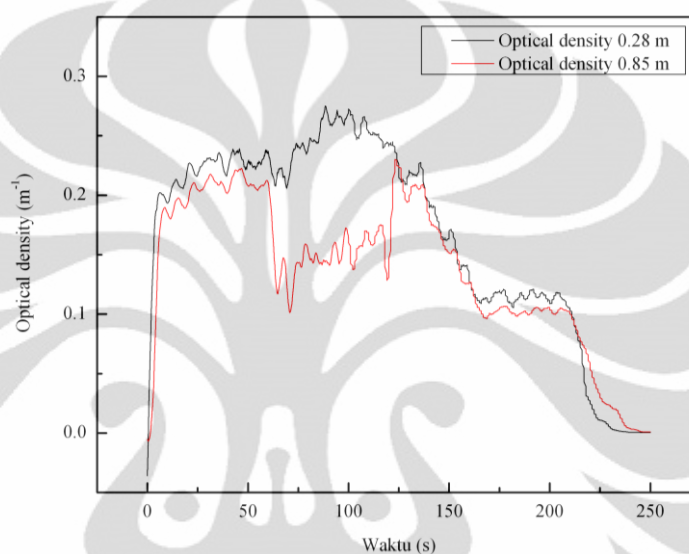


Gambar 4.34 Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 150 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen

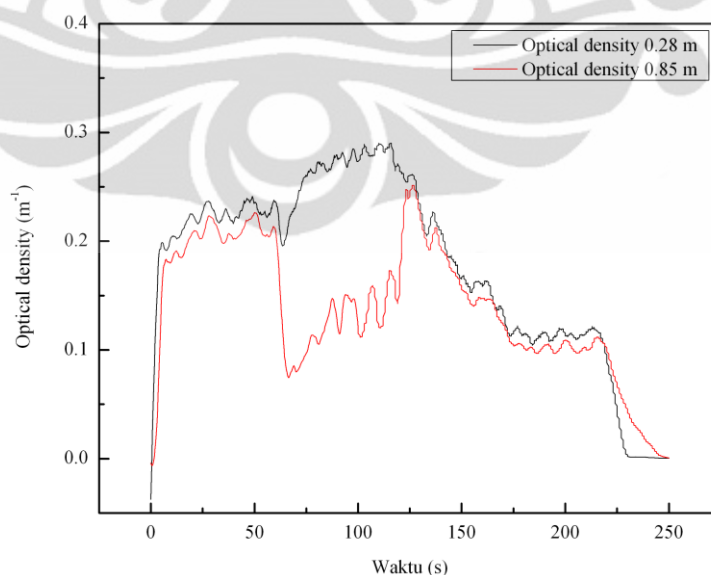


Gambar 4.35 Distribusi temperatur simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 200 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen

Hasil pengukuran temperatur dengan pengaktifan tirai kabut air pada tekanan 150 psi dan 200 psi pada kondisi dengan pelubangan pada bagian kompartemen dapat terlihat pada Gambar 4.34 dan Gambar 4.35. Dari gambar tersebut pelubangan pada bagian lantai kompartemen hanya menyebabkan pengaruh yang kecil terhadap pengukuran temperatur yang dilakukan pada simulasi. Selain itu, dari hasil simulasi tersebut juga dihasilkan nilai *optical density* asap yang dapat dilihat pada Gambar 4.36 dan Gambar 4.37.

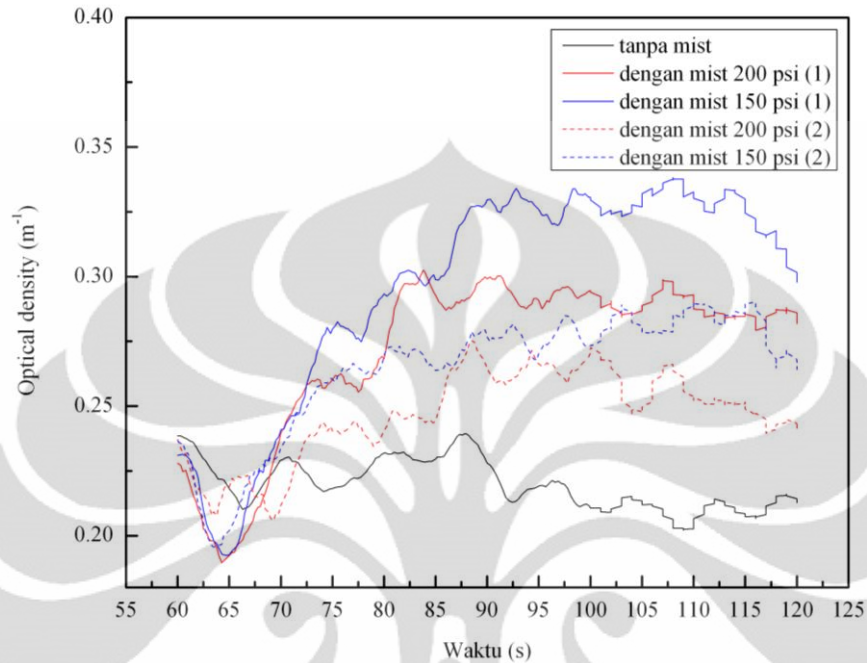


Gambar 4.36 *Optical density* simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 150 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen

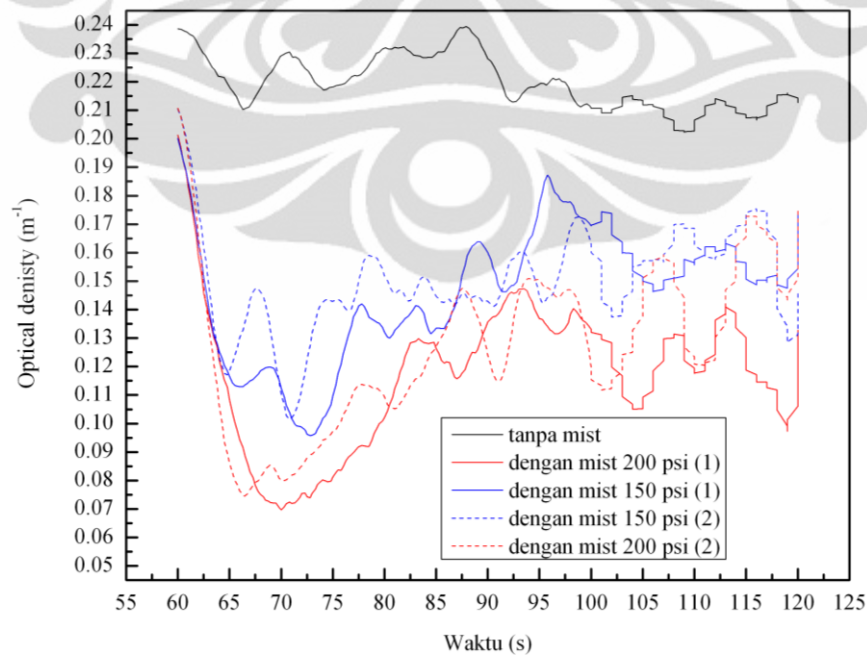


Gambar 4.37 *Optical density* simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air tekanan 200 psi pada kondisi dengan pelubangan pada lantai kompartemen

Perbedaan hasil pengukuran nilai *optical density* asap pada kondisi dengan dan tanpa pelubangan pada bagian lantai kompartemen dapat dilihat pada Gambar 4.38 dan Gambar 4.39.



Gambar 4.38 Perbandingan nilai *optical density* simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air jarak 0.28 m pada kondisi: (1) Tanpa pelubangan lantai (2). Dengan pelubangan lantai



Gambar 4.38 Perbandingan nilai *optical density* simulasi dengan pengaktifan tirai kabut air jarak 0.85 m pada kondisi: (1) Tanpa pelubangan lantai (2). Dengan pelubangan lantai

Terlihat pada Gambar 4.38 terjadi penurunan nilai *optical density* asap pada kondisi dengan pelubangan pada bagian lantai dibandingkan dengan kondisi tanpa pelubangan lantai kompartemen. Akan tetapi apabila kita melihat aliran dari partikel kabut air dan produk hasil pembakaran pada Gambar 4.33 maka dapat disimpulkan bahwa masih terjadi gangguan oleh kabut air terhadap hasil pengukuran. Partikel kabut air yang melewati daerah pengukuran akan mengganggu pengukuran nilai *optical density* asap karena partikel kabut air juga memiliki nilai *optical density* sehingga hasil pengukuran tidak murni nilai *optical density* asap akan tetapi juga merupakan nilai *optical density* kabut air. Sedangkan perbandingan nilai *optical density* pada jarak 0.85 m dapat di lihat pada Gambar 4.39 dimana dari gambar tersebut terlihat bahwa tidak terjadi perbedaan yang cukup besar dari nilai *optical density* asap yang disebabkan oleh sebagian aliran kabut air menuju daerah sebelum pengaktifan tirai kabut air dan hanya sebagian kecil yang menuju daerah setelah pengaktifan tirai kabut air.

4.3 Perhitungan Skala Aktual terhadap Pemodelan yang dilakukan dalam Eksperimen

Dalam penelitian ini, dipergunakan suatu model bangunan dalam skala laboratorium yang memiliki ukuran panjang 1 m, lebar 0.5 m, dan tinggi 0.5 m. Skala yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 : 6 di mana untuk skala aktual ruangan memiliki dimensi panjang 6 m, lebar 3 m, dan tinggi 3 m. Penskalaan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai pendekatan untuk memperkirakan hubungan antara besaran-besaran yang di dapat dari hasil penelitian. Beberapa persamaan yang digunakan untuk mengetahui besaran-besaran tersebut dapat di lihat pada Tabel 2.6 pada BAB 2.

Untuk memperkirakan besarnya *heat release rate* pada skala aktual, dapat dipergunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_S (l_F/l_S)^{5/2}$$

dengan mengetahui *heat release rate* yang di dapat dari hasil penelitian sebesar 0.928 kW maka diperkirakan besarnya *heat release rate* pada skala aktual, yaitu:

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_S (6/1)^{5/2}$$

$$\dot{Q}_F = 0.928 (88.1816)$$

$$\dot{Q}_F = 81.8325 \text{ kW} \approx 81.8 \text{ kW}$$

Dari perhitungan yang telah dilakukan maka di ketahui bahwa *heat release rate* pada skala aktual adalah 81.8 kW. Dengan mengetahui besarnya *heat release rate* pada skala aktual yaitu sebesar 81.8 kW maka besarnya api yang dalam skala aktual dapat diperkirakan besarnya. Untuk luas penampang pada skala aktual sebesar 0.0187 m² maka besarnya *mass burning rate* pada skala aktual adalah

$$\dot{q} = \Delta h_c \times \dot{m}'' \times A$$

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}}{\Delta h_c \times A}$$

$$\dot{m}'' = \frac{81.8325}{43700 \times 0.0187}$$

$$\dot{m}'' = 0.1 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Pada skala aktual, nyala api dari suatu bahan bakar bensin premium dengan luas permukaan 0.0187 m² di perkirakan memiliki mass burning rate sebesar 0.1 kgm⁻²s⁻¹.

Pada perhitungan waktu nyala *pool fire* dalam pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini mendapatkan nilai sebesar 279 s. Untuk mengetahui waktu nyala api pada skala aktual, dapat dipergunakan persamaan sebagai berikut:

$$t_F = t_S (l_F/l_S)^{1/2}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut maka waktu nyala api pada skala aktual dapat diperkirakan yaitu:

$$t_F = t_S (6/1)^{1/2}$$

$$t_F = 279 (2.4495)$$

$$t_F = 683.41 \text{ s} \approx 683 \text{ s}$$

Dari perhitungan tersebut maka dapat diperkirakan waktu nyala api pada skala aktual adalah 683 s.

Dalam penelitian ini, digunakan suatu sistem tirai kabut air pada tekanan 150 psi dan 200 psi. Untuk memperkirakan besarnya *flow rate* pada skala aktual, dapat dipergunakan persamaan sebagai berikut:

$$q_F = q_S (l_F/l_S)^{1/2}$$

dengan besarnya *flow rate* yang di dapatkan dari hasil eksperimen, maka besarnya *flow rate* pada skala aktual dapat diketahui pada Tabel 4.1, yaitu:

Tabel 4.1 Perhitungan *flow rate nozzle* untuk skala aktual

Tekanan (psi)	Nozzle	<i>Flow rate</i> _S (L/min)	<i>Flow rate</i> _F (L/min)
150	1	0.04986	0.122
	2	0.056142	0.1375
	3	0.040598	0.09944
200	1	0.0583	0.1428
	2	0.0626	0.1533
	3	0.0505	0.1237

Model bangunan dalam penelitian ini menggunakan dinding dengan material kalsium silikat dengan massa jenis 720 (kgm⁻³) dan konduktivitas termal 0.12 Wm⁻¹K⁻¹. Untuk mengetahui *properties* material pada skala aktual, dapat dipergunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_F \approx \rho_F = k_S \approx \rho_S (l_F/l_S)^{1/4}$$

maka *properties* material dinding pada skala aktual adalah:

1. Untuk besarnya konduktivitas termal:

$$k_F = k_S (6/1)^{1/4}$$

$$k_F = 0.12 (1.565)$$

$$k_F = 0.1878 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

2. Untuk besarnya massa jenis:

$$\rho_F = \rho_S (6/1)^{1/4}$$

$$\rho_F = 720 (1.565)$$

$$\rho_F = 1126.8 \text{ kg m}^{-3}$$

Dari perhitungan tersebut maka massa jenis dan konduktivitas termal dinding untuk skala aktual adalah 1126.8 kgm^{-3} dan $0.1878 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Tebal dinding yang digunakan dalam penelitian adalah 0.013 m. Untuk mengetahui *properties* material pada skala aktual, dapat dipergunakan persamaan sebagai berikut:

$$\delta_F = \delta_S (l_F/l_S)^{1/4}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut maka tebal dinding kompartemen pada skala aktual dapat diperkirakan yaitu:

$$\delta_F = 0.013 (6/1)^{1/4}$$

$$\delta_F = 0.013 (1.565)$$

$$\delta_F = 0.02 \text{ m}$$

Dari perhitungan tersebut maka tebal dinding kompartemen dapat di perkirakan untuk skala aktual adalah 0.02 m.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

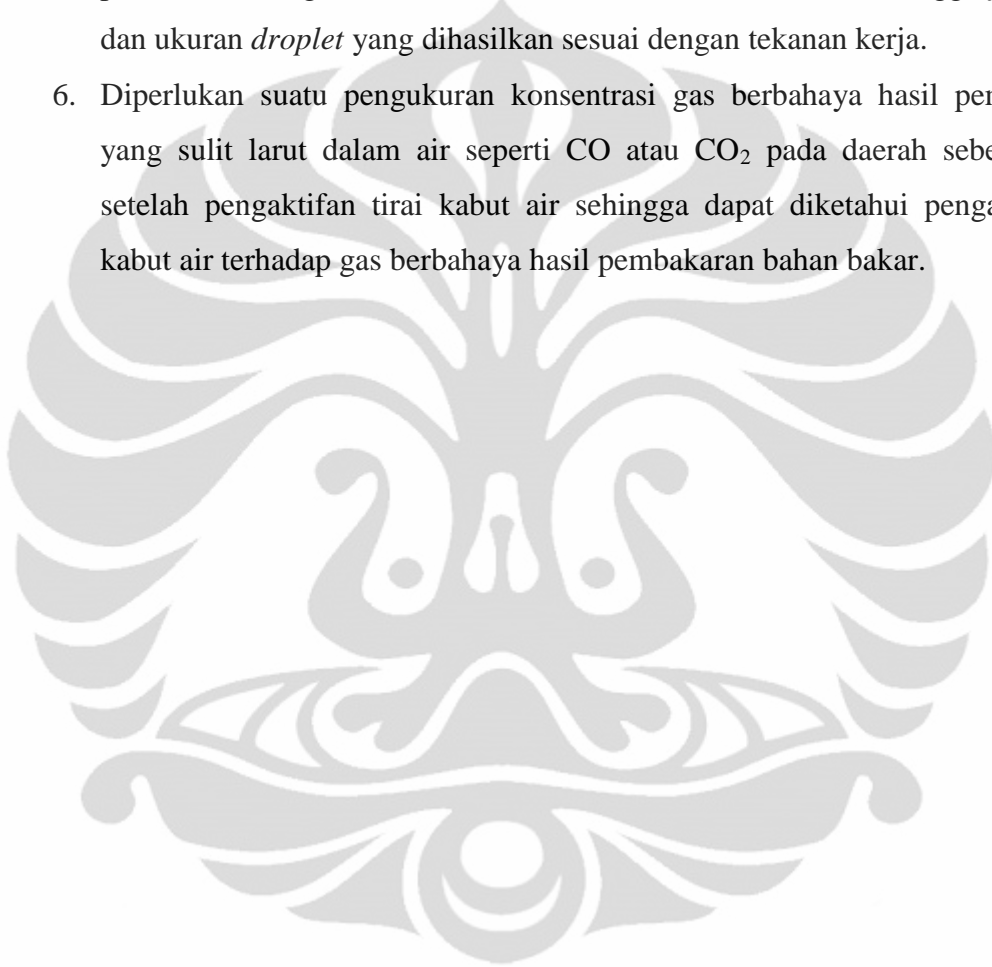
1. Pada penelitian ini digunakan suatu pemodelan kebakaran kompartemen dimana nyala api pada skala aktual yang berasal dari suatu *pool fire* berbahan bakar bensin premium dengan luas permukaan 0.0187 m^2 menghasilkan *heat release rate* dan *mass burning rate* sebesar 81.8 kW dan $0.1 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ dengan perkiraan waktu nyala api selama 683 s (11.4 menit).
2. Pengukuran temperatur dengan menggunakan termokopel tipe K menghasilkan suatu nilai yang besarnya di pengaruhi oleh laju panas radiasi dan konveksi dari api serta produk pembakaran.
3. Pengaktifan tirai kabut air menyebabkan penurunan distribusi temperatur pada kebakaran kompartemen terutama pada termokopel 5 (daerah setelah kabut air) baik dalam eksperimen maupun simulasi.
4. Penurunan temperatur pada termokopel 1, 2, 3, dan 6 pada hasil eksperimen kemungkinan disebabkan oleh menempelnya *droplet* air pada permukaan termokopel sehingga mengganggu hasil pengukuran temperatur.
5. Hasil pengukuran nilai *optical density* yang dilakukan tidak hanya merupakan nilai *optical density* asap karena hasil pengukuran juga dipengaruhi oleh aliran kabut air yang melewati daerah pengukuran *optical density*.
6. Fluktuasi nilai *optical density* dari hasil eksperimen pada daerah sebelum tirai kabut air (0.28 m) mengindikasikan bahwa tirai kabut air tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap penyebaran asap akan tetapi berpotensi untuk dapat meningkatkan konsentrasi asap pada daerah tersebut.
7. Pengaktifan tirai kabut air menyebabkan penurunan nilai *optical density* sekitar 83% pada tekanan 200 psi dan 65% pada tekanan 150 psi pada daerah pengukuran $0,85 \text{ m}$.
8. Tekanan kerja pada pressure vessel memberikan pengaruh terhadap kinerja tirai kabut air.

9. Dari hasil simulasi FDS, pengaktifan tirai kabut air menyebabkan peningkatan nilai *optical density* pada daerah sebelum tirai kabut air (0.28 m).
10. Dari hasil simulasi FDS, dapat diketahui bahwa terjadi penurunan temperatur terutama pada termokopel 5 setelah pengaktifan tirai kabut air. Penurunan temperatur juga terjadi pada termokopel 2 dan 3 yang diakibatkan pengaktifan tirai kabut air.
11. Kenaikan temperatur terjadi pada termokopel 1 dan 6 pada simulasi FDS yang disebabkan oleh *enclosure effect* dari pengaktifan tirai kabut air. Efek ini menyebabkan panas yang pada awalnya hanya terdapat pada bagian *upper layer* akan turun ke bawah sehingga pembacaan temperatur pada termokopel 6 meningkat. Selain itu, akibat dari efek kinetik *droplet* air menyebabkan panas dari nyala api akan terdorong ke atas lebih cepat sehingga terjadi penumpukan konsentrasi produk pembakaran pada wilayah sekitar termokopel 1 yang menyebabkan peningkatan temperatur pada bagian tersebut.
12. Penurunan nilai *optical density* asap setelah pengaktifan tirai kabut air terjadi pada daerah pengukuran 0.85 m. Akan tetapi terjadi kenaikan nilai *optical density* asap pada daerah sebelum tirai kabut air yang disebabkan oleh terjadinya akumulasi asap hasil pembakaran pada daerah tersebut karena berkurangnya asap hasil pembakaran.

5.2 Saran

1. Diperlukan suatu rancangan baru dudukan *light receiver* dan *light source* pada alat pengukur opasitas DIN 50055. Dudukan yang ada sekarang terlalu berat dan sulit dalam pengkalibrasian alat sebelum pengambilan data. Rancangan baru tentunya harus disesuaikan dengan standard yang telah ada sehingga tidak merubah hasil pengukuran alat opasitas DIN 50055.
2. Diperlukan suatu rancangan tambahan terhadap *pressure vessel* dengan penambahan katup yang berfungsi sebagai tempat pengisian air untuk sistem tirai kabut air.
3. Untuk penelitian selanjutnya, diperlukan pengambilan nilai *optical density* asap pada banyak daerah pada ketinggian tertentu sehingga dapat diketahui pengaruh tirai kabut air pada bagian bawah dan tengah kompartemen.

4. Pada laboratorium keselamatan kebakaran di luar gedung DTM FTUI diperlukan adanya *exhaust system* yang dapat mengurangi terhisapnya asap hasil pembakaran yang berbahaya bagi kesehatan.
5. Pemakaian *nozzle* dalam penelitian pengaruh tirai kabut air terhadap asap hasil kebakaran selanjutnya sebaiknya menggunakan *nozzle* yang memang di peruntukkan bagi sistem instalasi keselamatan kebakaran sehingga *flow rate* dan ukuran *droplet* yang dihasilkan sesuai dengan tekanan kerja.
6. Diperlukan suatu pengukuran konsentrasi gas berbahaya hasil pembakaran yang sulit larut dalam air seperti CO atau CO₂ pada daerah sebelum dan setelah pengaktifan tirai kabut air sehingga dapat diketahui pengaruh tirai kabut air terhadap gas berbahaya hasil pembakaran bahan bakar.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] 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.
- [3] McGrattan, K., et al., Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology, USA, 2007.
- [4] SNI 03 – 1736 – 2000, “Tata Cara Perencanaan dan Sistem Proteksi Pasif untuk Pencegahan Bahaya Kebakaran pada Bangunan Gedung”.
- [5] Quintiere, J. G., Fundamentals of Fire Phenomena, Jhon Wiley & Sons, 2006.
- [6] Suprpto, 1992, Sistem Proteksi Kebakaran pada Bangunan Gedung, Lembaga Pengabdian pada Masyarakat, Institut Teknologi Bandung-PT.Jaya Teknik Indonesia, Jakarta, hlm.30.
- [7] Walton, W., D., and Thomas, P.,H., “Estimating Temperatures in Compartment Fires”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 6, 3rd Edition, 2002.
- [8] Wood, P., G., *Fire Research Note 953*, Building Research Establishment, Borehamwood, UK (1972).
- [9] NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Suppression System, NFPA, Quincy, MA, 2000 edition.
- [10] Mawhinney, J., R., and Back, G., G., “Water Mist Fire Suppression Systems”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 4/Chapter 14, 3rd Edition, 2002.
- [11] NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation
- [12] Wang M, et all, “Scale Modeling of Compartment Fires for Structural Fire Testing”, *Jurnal of Fire Protection Engineering*, Sage Publication, 2008.

- [13] Chen, L., et al., "Experimental Study of Water Mist Fire Suppression in Tunnels Under Longitudinal Ventilation", *Jurnal of Building and Environment*, Sage Publication, 2008.
- [14] Li, Y., F., and Chow, W., K., "Study of Water Droplet Behavior in Hot Air Layer in Fire Extinguishment", *Jurnal of Fire Protection Engineering*, Sage Publication, 2007.
- [15] Andrew Hart, R., "Numerical Modelling of Tunnel Fires and Water Mist Suppression", The University of Nottingham, December 2005
- [16] Harper, C., A., "Handbook of Building Materials for Fire Protection", McGraw-Hill, New York (2004).
- [17] Fire Testing Technology, *Smoke Density Photometric System (DIN 50055) Users Manual*, West Sussex, UK.
- [18] Babrauskas, V., "Heat Release Rate", *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002
- [19] Gottuk, D., T., and White, D., A., "Liquid pool fire", *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 2/Chapter 15, 3rd Edition, 2002
- [20] Doolan, Con., "The Effect of Water Mist and Water Spray on Radiative Heat Transfer for Stored Ordnance", *DSTO Systems Sciences Laboratory*, Weapons Systems Division Defence Science and Technology Organisation, Edinburgh South Australia, July 2003.
- [21] "Resource, Tool, and Basic Information for Engineering and Design of Technical Application" <http://www.engineeringtoolbox.com> (di akses pada 19 Mei 2011)
- [22] "Measurement System-Sampling, Blending, and Multiphase Solution" <http://www.jiskoot.com> (di akses pada 19 Mei 2011)
- [23] International Water Mist Association. <http://www.iwma.net> (di akses pada 8 Juni 2011)
- [24] Spraying System Co. "Spray Nozzle Maintenance and Control for Improved Production Efficiency" <http://www.sprayconsultans.com> (di akses pada 19 Mei 2011)

- [25] Peter E. Liley, Ph.D., D.I.C., "Physical and Chemical Data", Mc-Graw-Hill (1999).
- [26] *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 1992. pp. 650-655
- [27] Savitzky, A. and Golay, M.J.E. " Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures" *Analytical Chemistry* 36(8):1627-1639, July 1964.
- [28] Kanury, A.M., "Introduction to Combustion Phenomena," Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
- [29] Herterich, A.O., "Library of the Science of Fire Protection and Related Areas: Section 3: the Diffuse Jet – Spray Jet," The Dr. Alfred Huthig Publishing Co., Heidelberg, 1960.
- [30] Liu, Z.; Kim, A.K., "A Review of water mist fire suppression systems – fundamental studies", A version of this document is published in / Une version de ce document se trouve dans : *Journal of Fire Protection Engineering*, v. 10, no. 3, 2000, pp. 32-50

LAMPIRAN

1. Perhitungan Nilai Soot Yield untuk Bensin Premium (*Gasoline*)

No.	Massa Terbakar (g)	Waktu Api Mati (s)	Transmisi (%)	Opasitas (m^{-1})	K (m^{-1})	Visibility (m)	Mass Concentration (g/m ³)	Massa Asap (g)	Soot Yield (g/g)
1	0.05	15	47	0.327902	1.929	1.555342081	0.221705302	0.00121	0.02427
2	0.05	15	49	0.309804	1.822	1.64620254	0.209468506	0.00115	0.02293
3	0.05	14	48	0.318759	1.875	1.599956016	0.215523166	0.00118	0.0236
4	0.05	15	49	0.309804	1.822	1.64620254	0.209468506	0.00115	0.02293
5	0.05	16	40	0.39794	2.341	1.281600213	0.269060182	0.00147	0.02946
6	0.06	17	37	0.431798	2.54	1.181107078	0.291952857	0.0016	0.02664
7	0.06	16	38	0.420216	2.472	1.21366038	0.284121977	0.00156	0.02592
8	0.06	18	35	0.455932	2.682	1.118587968	0.308270423	0.00169	0.02812
9	0.06	18	36	0.443697	2.61	1.149431766	0.299998309	0.00164	0.02737
10	0.06	16	39	0.408935	2.406	1.247140768	0.276494519	0.00151	0.02523
11	0.07	18	31	0.508638	2.992	1.002677136	0.343906901	0.00188	0.02689
12	0.07	15	32	0.49485	2.911	1.030615293	0.334584193	0.00183	0.02616
13	0.07	23	28	0.552842	3.252	0.92250594	0.373794435	0.00205	0.02923
14	0.07	21	32	0.49485	2.911	1.030615293	0.334584193	0.00183	0.02616
15	0.07	19	30	0.522879	3.076	0.975369538	0.353535325	0.00194	0.02765
16	0.08	22	26	0.585027	3.441	0.871755155	0.395555546	0.00217	0.02707
17	0.08	20	27	0.568636	3.345	0.896882696	0.384473452	0.0021	0.02631
18	0.08	23	23	0.638272	3.755	0.799032182	0.431556568	0.00236	0.02953
19	0.08	24	26	0.585027	3.441	0.871755155	0.395555546	0.00217	0.02707
20	0.08	20	26	0.585027	3.441	0.871755155	0.395555546	0.00217	0.02707
21	0.09	26	21	0.677781	3.987	0.752455766	0.458269578	0.00251	0.02787
22	0.09	24	19	0.721246	4.243	0.70710925	0.487658147	0.00267	0.02966
23	0.09	23	20	0.69897	4.112	0.729645045	0.472596352	0.00259	0.02874
24	0.09	23	19	0.721246	4.243	0.70710925	0.487658147	0.00267	0.02966
25	0.09	23	22	0.657577	3.868	0.775574195	0.444609411	0.00243	0.02704
Average					3.021	1.063363536	0.347198283	0.0019	0.0269

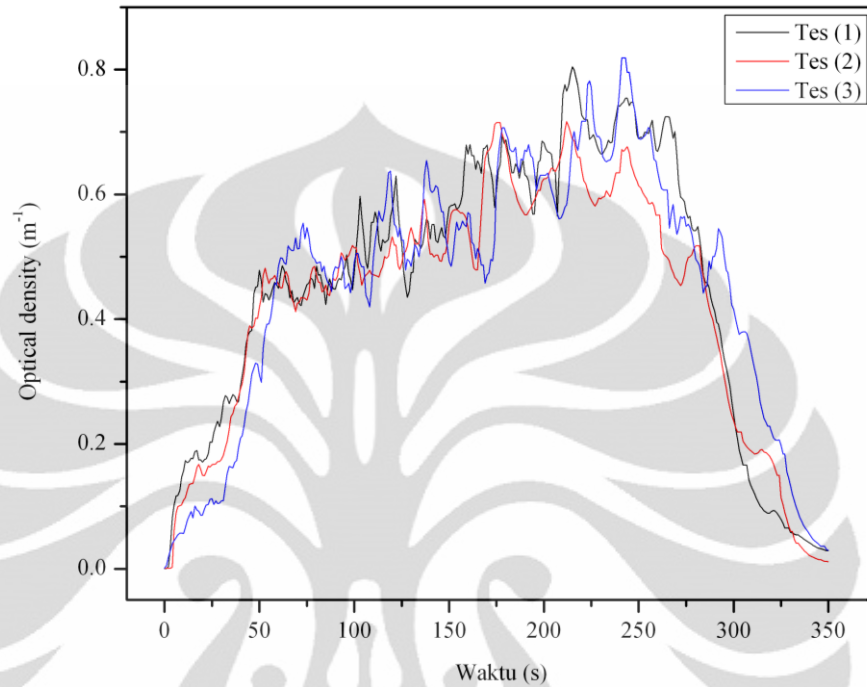
2. Perhitungan Persentase Pengurangan Nilai *Optical Density* Asap karena Pengaktifan Tirai Kabut Air

Detik ke	0.28 m		0.85 m	
	Persentase pengurangan optical density 150 psi	Persentase pengurangan optical density 200 psi	Persentase pengurangan optical density 150 psi	Persentase pengurangan optical density 200 psi
60	0.045079376	0.050784116	0.054433684	0.068833451
61	0.084697972	0.115774257	0.062259233	0.066627374
62	0.114080541	0.146467818	0.11230619	0.300459334
63	0.121398482	0.163606226	0.228196797	0.439660062
64	0.121605887	0.156034137	0.345848473	0.656767898
65	0.165696202	0.1900593	0.378567058	0.694634376
66	0.146529325	0.163980647	0.399943161	0.690752362
67	0.088383924	0.191650511	0.503402633	0.729681026
68	0.083154537	0.191873216	0.532762252	0.745827969
69	0.146566932	0.296572949	0.621179564	0.828126453
70	0.1416534	0.23626971	0.599234975	0.833826292
71	0.175057432	0.213215579	0.668207919	0.862931597
72	0.257906753	0.289636901	0.707809381	0.890365209
73	0.293862181	0.26996024	0.724033856	0.904435373
74	0.279547395	0.165784741	0.761242981	0.911149926
75	0.317440239	0.158945923	0.766148648	0.897229086
76	0.275244112	0.160415092	0.774550286	0.906483727
77	0.218502293	0.116473493	0.817465003	0.915490035
78	0.19960275	0.039198889	0.771881872	0.906609377
79	0.198479987	-0.023921364	0.740243777	0.895971644
80	0.170177183	-0.008253735	0.739905102	0.90636517
81	0.150762591	-0.036631566	0.735121322	0.900273446
82	0.138211436	-0.017433106	0.737611538	0.915610892
83	0.114536443	-0.038761261	0.729154163	0.923632801
84	0.136261647	0.003821874	0.673316208	0.905348278
85	0.070577567	-0.067551532	0.679039529	0.899504652
86	0.03736703	-0.068873821	0.69099144	0.891286053
87	0.017529798	-0.056927319	0.711902188	0.864265466
88	-0.019221039	-0.028135354	0.705110089	0.839964965
89	0.071633217	0.078171764	0.664456369	0.834778243
90	0.110268172	0.094653875	0.669458479	0.85561886
91	0.076732932	0.010598547	0.673162048	0.875197463
92	0.080008778	0.113642049	0.656075589	0.879914031
93	0.104681847	0.10443832	0.680136451	0.884844081
94	0.109144577	0.10209373	0.680238852	0.873888031
95	0.052148723	-0.030390046	0.73446777	0.877250912
96	0.090542558	0.013506403	0.74893366	0.878809288
97	0.137135276	-0.030704907	0.761251721	0.881043484

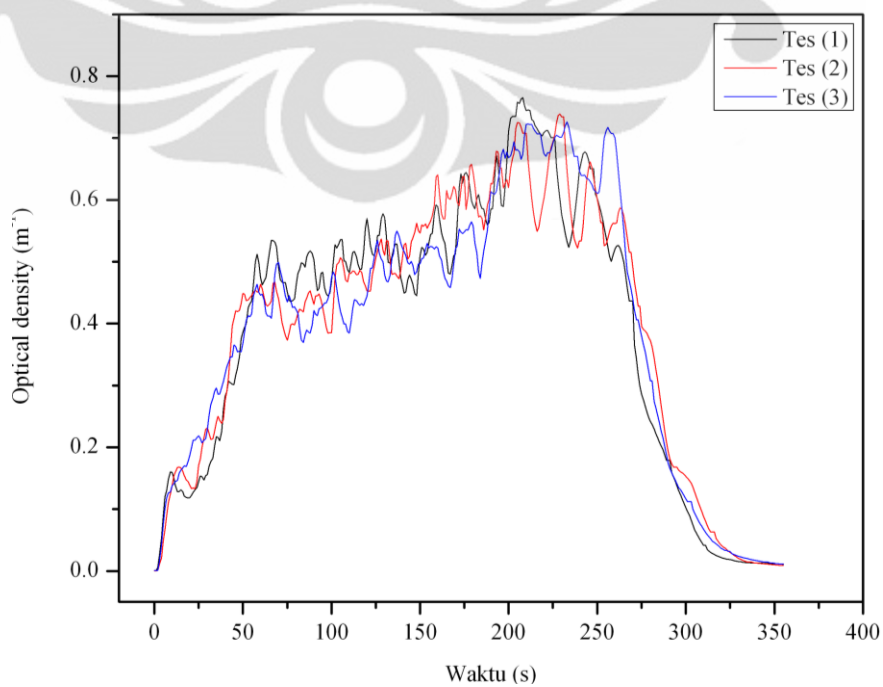
98	0.130178287	-0.137828314	0.762055672	0.892890858
99	0.160162168	-0.067703376	0.745560193	0.895695591
100	0.21556831	0.002735609	0.742843391	0.895734443
101	0.151922726	0.126417874	0.728640462	0.875484748
102	0.06259649	0.07579662	0.724779828	0.869249077
103	-0.010192947	-0.022468921	0.715413144	0.858020187
104	-0.029185782	-0.1027532	0.728579366	0.856298677
105	-0.046299731	-0.000547143	0.709579253	0.862562798
106	-0.146508405	-0.121303934	0.717083722	0.856503846
107	-0.1298109	-0.12703112	0.730705152	0.881785895
108	-0.122572303	-0.211720914	0.723407857	0.859065522
109	-0.046792442	-0.141100343	0.715058135	0.852271651
110	0.034185901	-0.050871217	0.745057102	0.875292296
111	0.081448557	-0.006953363	0.743690112	0.884550717
112	0.113474786	0.125030992	0.743054985	0.897293962
113	0.15441917	0.132359642	0.748582448	0.912923553
114	0.147109465	0.103006353	0.750507838	0.916850563
115	0.138702015	0.157992706	0.656186434	0.898156558
116	0.153064109	0.197174004	0.62167493	0.900801296
117	0.190921394	0.197528253	0.618360386	0.909133661
118	0.263229214	0.258392063	0.615462322	0.92353654
119	0.276411075	0.28948761	0.60889759	0.928369879
120	0.231493413	0.098730191	0.60216584	0.933678993
Average	0.116336279	0.068924858	0.646514695	0.827370656

3. Grafik *Optical Density* dari Hasil beberapa Pengujian

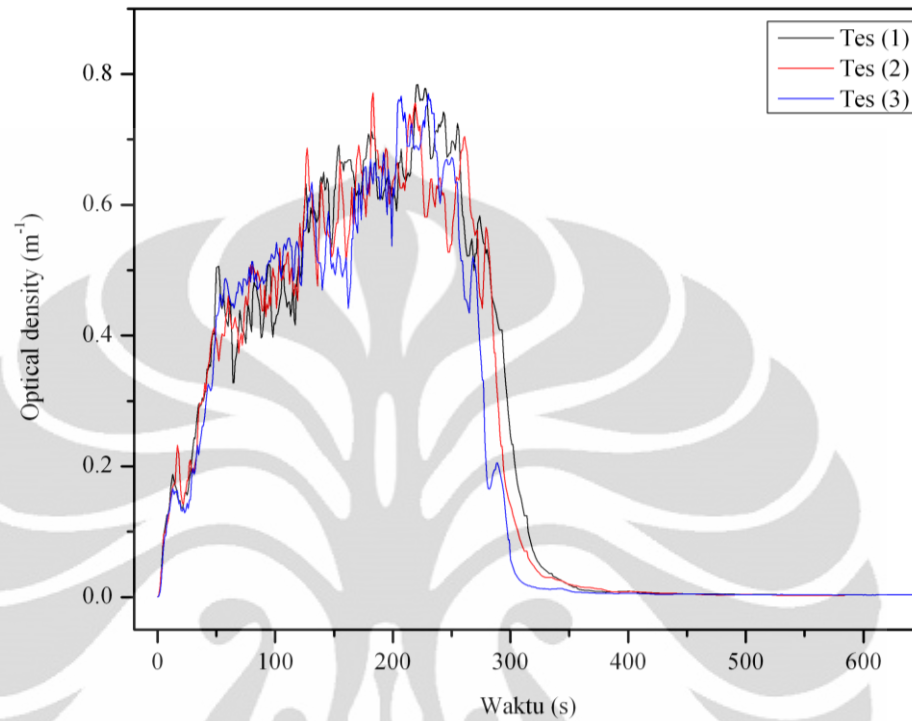
a. Grafik *Optical Density* Tanpa Pengaktifan Tirai Kabut Air pada Jarak 0.28 m



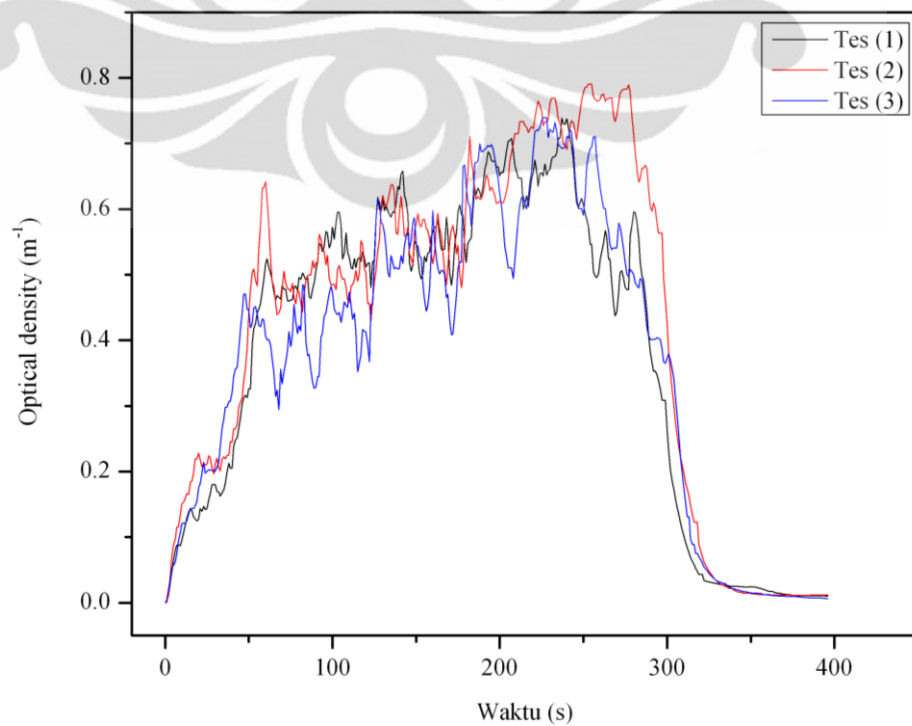
b. Grafik *Optical Density* Tanpa Pengaktifan Tirai Kabut Air pada Jarak 0.85 m



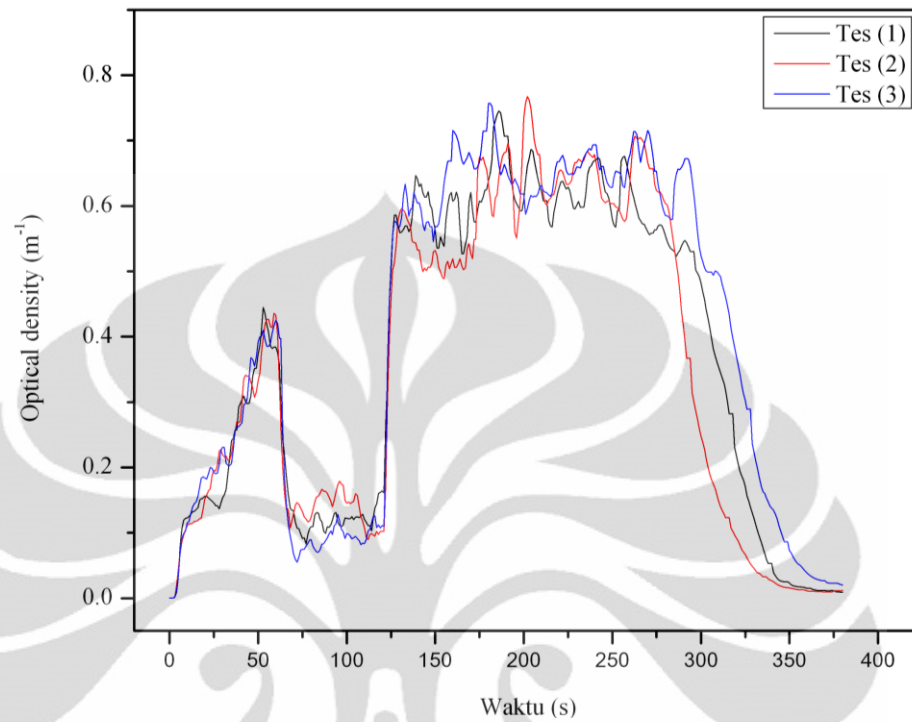
c. Grafik *Optical Density* Dengan Pengaktifan Tirai Kabut Air Tekanan 150 psi pada Jarak 0.28 m



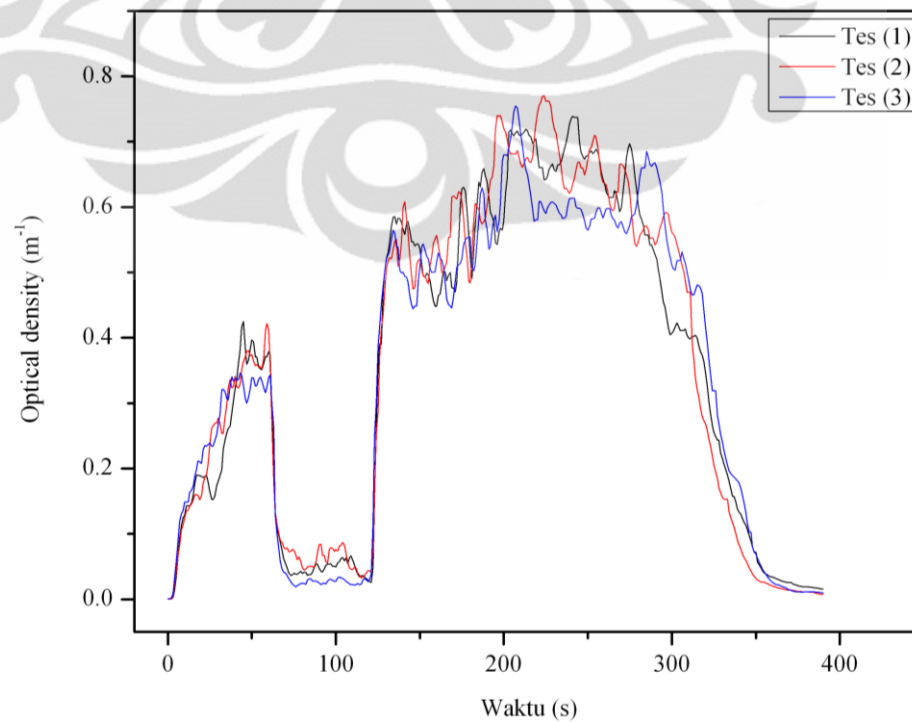
d. Grafik *Optical Density* Dengan Pengaktifan Tirai Kabut Air Tekanan 200 psi pada Jarak 0.28 m



e. Grafik *Optical Density* Dengan Pengaktifan Tirai Kabut Air Tekanan 150 psi pada Jarak 0.85 m



f. Grafik *Optical Density* Dengan Pengaktifan Tirai Kabut Air Tekanan 200 psi pada Jarak 0.85 m



4. Data Masukan pada Simulasi FDS

a. Simulasi pada Kondisi Tanpa Pengaktifan Tirai Kabut Air

&HEAD TITLE='Simulasi FDS 5 compartment fire tanpa pengaktifan sistem tirai kabut air/'

&TIME T_END=300.00/

&DUMP DT_RESTART=300.00/

&MISC HUMIDITY=60.00, TMPA=33.00/

&MESH ID='MESH', IJK=63,40,40, XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.52, 0.0200,0.52/

&PART ID='Tracer',
 MASSLESS=.TRUE.,
 COLOR='BLACK',
 AGE=60.00/

&REAC ID='REAC',
 FYI=(1). www.jiskoot.com (2). Babrauskas, V., "Heat Release Rate", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002',

C=8.00,

H=18.00,

O=0.00,

N=0.00,

HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004,

SOOT_YIELD=0.027,

MAXIMUM_VISIBILITY=1.06/

&DEVC ID='convection hf solid phase 1', QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, IOR=-1/

&DEVC ID='convection hf solid phase 102', QUANTITY='CONVECTIVE
 HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, IOR=-1/
 &DEVC ID='convection hf solid phase 103', QUANTITY='CONVECTIVE
 HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, IOR=-1/
 &DEVC ID='heat flux 0.125', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX
 GAS', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
 &DEVC ID='heat flux 0.25', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
 XYZ=1.00,0.2500,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
 &DEVC ID='heat flux 0.375', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX
 GAS', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
 &DEVC ID='radiative hf gas phase 1', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
 FLUX GAS', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
 &DEVC ID='radiative hf gas phase 102', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
 FLUX GAS', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
 &DEVC ID='radiative hf gas phase 103', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
 FLUX GAS', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
 &DEVC ID='radiative hf solid phase 1', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
 FLUX', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, IOR=-1/
 &DEVC ID='radiative hf solid phase 102', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
 FLUX', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, IOR=-1/
 &DEVC ID='radiative hf solid phase 103', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
 FLUX', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, IOR=-1/
 &DEVC ID='temperatur 1', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
 XYZ=0.0950,0.2500,0.4700/
 &DEVC ID='temperatur 2', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
 XYZ=0.2600,0.2500,0.4700/
 &DEVC ID='temperatur 3', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
 XYZ=0.4400,0.2500,0.4700/
 &DEVC ID='temperatur 4', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
 XYZ=0.62,0.2500,0.4700/
 &DEVC ID='temperatur 5', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
 XYZ=0.80,0.2500,0.4700/

&DEVC ID='temperatur 6', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.2600,0.2500,0.1500/

&MATL ID='gasoline',

FYI='(1). Babrauskas, V., "Heat Release Rate", The SFPE Handbook of
Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy,
MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002

(2). www.engineeringtoolbox.com',

SPECIFIC_HEAT=2.22,

CONDUCTIVITY=0.1500,

DENSITY=740.00,

ABSORPTION_COEFFICIENT=40.00,

EMISSIVITY=1.00,

HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004,

N_REACTIONS=1,

HEAT_OF_REACTION=330.00,

NU_FUEL=1.00,

N_S=1.00,

REFERENCE_TEMPERATURE=50.00/

&MATL ID='CALCIUM SILICATE',

FYI='NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation',

SPECIFIC_HEAT_RAMP='CALCIUM
SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP',

CONDUCTIVITY=0.1200,

DENSITY=720.00,

EMISSIVITY=0.83/

&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.00,
F=1.25/

&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=200.00,
F=1.25/

&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=300.00,
F=1.33/

&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=600.00,
F=1.55/

&SURF ID='gasoline pool',

RGB=255,102,204,

BURN_AWAY=.TRUE.,

MATL_ID(1,1)='gasoline',

MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,

THICKNESS(1)=3.0000000E-003,

PART_ID='Tracer'/

&SURF ID='wall',

RGB=146,202,166,

MATL_ID(1,1)='CALCIUM SILICATE',

MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,

THICKNESS(1)=0.0130/

&OBST XB=0.0642,0.1158,0.2242,0.2758,0.00,3.0000000E-003,

RGB=255,0,51, SURF_ID='gasoline pool'/ gasoline pool

&OBST XB=-0.0200,1.00,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',

SURF_ID='wall'/ atap compartment

&OBST XB=-0.0200,0.00,0.00,0.50,0.00,0.50, COLOR='GRAY 80',

SURF_ID='wall'/ dinding bagian belakang compartment

&OBST XB=-0.0200,1.00,0.50,0.52,0.00,0.50, COLOR='GRAY 80',

SURF_ID='wall'/ dinding samping compartment sumbu-y maksimum

&OBST XB=1.00,1.00,0.1150,0.1350,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/

Obstruction hf 1

&OBST XB=1.00,1.00,0.3650,0.3850,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/

Obstruction hf 3

&OBST XB=-0.0200,1.00,0.00,0.52,-0.0200,0.00, COLOR='GRAY 80',

SURF_ID='wall'/ lantai compartment

&OBST XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.00,-0.0200,0.52, COLOR='INVISIBLE',

SURF_ID='wall'/ dinding samping compartment sumbu-y minimum

&OBST XB=1.00,1.00,0.2400,0.2600,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
Obstruction hf 2

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.00,1.00,0.00,0.50,0.00,0.50,
COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max X for MESH

&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=0.2750/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=1.00/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=1.00/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0950/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', VECTOR=.TRUE.,
PBY=0.2500/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.2500/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBY=0.2500/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBY=0.0950/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=0.4700/

&DEVC ID='Optical Density 0.28 m_MEAN', QUANTITY='OPTICAL
DENSITY', STATISTICS='MEAN',
XB=0.2676,0.2926,0.00,0.50,0.4750,0.50/
&DEVC ID='Optical Density 0.85 m_MEAN', QUANTITY='OPTICAL
DENSITY', STATISTICS='MEAN', XB=0.84,0.865,0.00,0.50,0.4750,0.50/

b. Simulasi Dengan Pengaktifan Tirai Kabut Air pada Tekanan 150 psi

&HEAD TITLE='dengan kabut air 150 psi'/
&TIME T_END=250.00/
&DUMP DT_RESTART=250.00/
&MISC HUMIDITY=60.00, TMPA=33.00/

&MESH ID='MESH', IJK=63,40,45, XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.52,-
0.0200,0.62/


```

&PART ID='Tracer',
  MASSLESS=.TRUE.,
  COLOR='BLACK',
  AGE=60.00/
&PART ID='Water',
  WATER=.TRUE.,
  AGE=60.00,
  DIAMETER=50.00,
  MINIMUM_DIAMETER=10.00,
  SPECIFIC_HEAT=4.18,
  MELTING_TEMPERATURE=0.00,
  VAPORIZATION_TEMPERATURE=100.00,
  HEAT_OF_VAPORIZATION=2.2590000E003/

&REAC ID='REAC',
  FYI='(1). www.jiskoot.com (2). Babrauskas, V., "Heat Release Rate", The
  SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection
  Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002',
  C=8.00,
  H=18.00,
  O=0.00,
  N=0.00,
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004,
  SOOT_YIELD=0.0270,
  MAXIMUM_VISIBILITY=1.06/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=-0.2500, F=-1.00/
&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=0.2500, F=1.00/
&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=59.75, F=1.00/
&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=60.25, F=-1.00/
&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=119.75, F=-1.00/

```

```

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=120.25, F=1.00/
&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=-0.2500, F=1.00/
&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=0.2500, F=-1.00/
&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=59.75, F=-1.00/
&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=60.25, F=1.00/
&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=119.75, F=1.00/
&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=120.25, F=-1.00/
&PROP ID='Water Spray nozzle 1',
  PART_ID='Water',
  FLOW_RATE=4.9860000E-002,
  ORIFICE_DIAMETER=1.0000000E-004,
  SPRAY_ANGLE=65.00,0.00/
&PROP ID='water spray nozzle 2',
  PART_ID='Water',
  FLOW_RATE=5.6142000E-002,
  ORIFICE_DIAMETER=1.0000000E-004,
  SPRAY_ANGLE=65.00,0.00/
&PROP ID='water spray nozzle 3',
  PART_ID='Water',
  FLOW_RATE=4.0598000E-002,
  ORIFICE_DIAMETER=1.0000000E-004,
  SPRAY_ANGLE=65.00,0.00/
&DEVC ID='convection hf solid phase 1', QUANTITY='CONVECTIVE
HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='convection hf solid phase 102', QUANTITY='CONVECTIVE
HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='convection hf solid phase 103', QUANTITY='CONVECTIVE
HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='heat flux 0.125', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX
GAS', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='heat flux 0.25', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=1.00,0.2500,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/

```

```

&DEVC ID='heat flux 0.375', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX
GAS', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf gas phase 1', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX GAS', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf gas phase 102', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX GAS', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf gas phase 103', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX GAS', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf solid phase 1', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='radiative hf solid phase 102', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='radiative hf solid phase 103', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='temperatur 1', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.0950,0.2500,0.4700/
&DEVC ID='temperatur 2', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.2600,0.2500,0.4700/
&DEVC ID='temperatur 3', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.4400,0.2500,0.4700/
&DEVC ID='temperatur 5', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.80,0.2500,0.4700/
&DEVC ID='temperatur 6', QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.2600,0.2500,0.1500/
&DEVC ID='TIME', QUANTITY='TIME', XYZ=-0.0200,-0.0200,-0.0200/
&CTRL ID='control obs nozzle', FUNCTION_TYPE='CUSTOM',
RAMP_ID='control obs nozzle_RAMP', LATCH=.FALSE.,
INPUT_ID='TIME'/
&CTRL ID='control nozzle', FUNCTION_TYPE='CUSTOM',
RAMP_ID='control nozzle_RAMP', LATCH=.FALSE., INPUT_ID='TIME'/

```

&DEVC ID='NOZZLE 1', PROP_ID='Water Spray nozzle 1',
 XYZ=0.62,0.3750,0.60, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL',
 CTRL_ID='control nozzle'/

&DEVC ID='NOZZLE 2', PROP_ID='water spray nozzle 2',
 XYZ=0.62,0.2500,0.60, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL',
 CTRL_ID='control nozzle'/

&DEVC ID='NOZZLE 3', PROP_ID='water spray nozzle 3',
 XYZ=0.62,0.1250,0.60, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL',
 CTRL_ID='control nozzle'/

&MATL ID='gasoline',

FYI='(1). www.engineeringtoolbox.com (2). Babrauskas, V., "Heat Release Rate", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002',

SPECIFIC_HEAT=2.22,
 CONDUCTIVITY=0.1500,
 DENSITY=740.00,
 ABSORPTION_COEFFICIENT=40.00,
 EMISSIVITY=1.00,
 HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004,
 N_REACTIONS=1,
 HEAT_OF_REACTION=330.00,
 NU_FUEL=1.00,
 N_S=1.00,
 REFERENCE_TEMPERATURE=50.00/

&MATL ID='CALCIUM SILICATE',

FYI='NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation',
 SPECIFIC_HEAT_RAMP='CALCIUM
 SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
 CONDUCTIVITY=0.1200,
 DENSITY=720.00,

```

EMISSIVITY=0.83/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.00,
F=1.25/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=200.00,
F=1.25/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=300.00,
F=1.33/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=600.00,
F=1.55/

&SURF ID='gasoline pool',
  RGB=255,102,204,
  BURN_AWAY=.TRUE.,
  MATL_ID(1,1)='gasoline',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
  THICKNESS(1)=3.0000000E-003,
  PART_ID='Tracer'/
&SURF ID='wall',
  RGB=146,202,166,
  MATL_ID(1,1)='CALCIUM SILICATE',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
  THICKNESS(1)=0.0130/

&OBST XB=0.0642,0.1158,0.2242,0.2758,0.00,3.0000000E-003,
  RGB=255,0,51, SURF_ID='gasoline pool'/ gasoline pool
&OBST XB=-0.0200,0.54,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Atap 1
&OBST XB=-0.0200,0.00,0.00,0.50,0.00,0.50, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Dinding belakang (sb-x minimum)
&OBST XB=-0.0200,1.00,0.50,0.52,0.00,0.50, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Dinding samping (sb-y maksimum)

```

```

&OBST XB=0.999,1.00,0.1150,0.1350,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
Hf 3
&OBST XB=0.70,1.00,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',
SURF_ID='wall'/ Atap 2
&OBST XB=-0.0200,1.00,0.00,0.52,-0.0200,0.00, COLOR='GRAY 80',
SURF_ID='wall'/ lantai
&OBST XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.00,-0.0200,0.52, COLOR='INVISIBLE',
SURF_ID='wall'/ Dinding samping (sb-y minimum)
&OBST XB=0.999,1.00,0.2400,0.2600,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
Hf 2
&OBST XB=0.54,0.545,0.00,0.52,0.50,0.62, COLOR='GRAY 80',
SURF_ID='wall'/ Flap 1
&OBST XB=0.545,0.695,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',
SURF_ID='wall', CTRL_ID='control obs nozzle'/ Obstruction nozzle
&OBST XB=0.695,0.70,0.00,0.52,0.50,0.62, COLOR='GRAY 80',
SURF_ID='wall'/ Flap 2
&OBST XB=0.999,1.00,0.3650,0.3850,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
Hf 1

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.52,0.62,0.62,
COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Z for MESH
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.00,1.00,0.00,0.50,0.00,0.50,
COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max X for MESH

&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=0.2750/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=0.85/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=1.00/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=1.00/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0950/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', VECTOR=.TRUE.,
PBY=0.2500/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.2500/

```

```
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBY=0.2500/
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBY=0.0950/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=0.4700/
```

```
&DEVC ID='Optical Density 0.28 m_MEAN', QUANTITY='OPTICAL
DENSITY', STATISTICS='MEAN',
XB=0.2676,0.2926,0.00,0.50,0.4750,0.50/
&DEVC ID='Optical Density 0.85 m_MEAN', QUANTITY='OPTICAL
DENSITY', STATISTICS='MEAN', XB=0.84,0.865,0.00,0.50,0.4750,0.50/
```

c. Simulasi dengan Pengaktifan Tirai Kabut Air pada Tekanan 200 psi

```
&HEAD TITLE='dengan mist 200 psi'/

&TIME T_END=250.00/
&DUMP DT_RESTART=250.00/
&MISC HUMIDITY=60.00, TMPA=33.00/

&MESH ID='MESH', IJK=63,40,45, XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.52,-
0.0200,0.62/

&PART ID='Tracer',
  MASSLESS=.TRUE.,
  COLOR='BLACK',
  AGE=60.00/

&PART ID='Water',
  WATER=.TRUE.,
  AGE=60.00,
  DIAMETER=50.00,
  MINIMUM_DIAMETER=10.00,
  SPECIFIC_HEAT=4.18,
  MELTING_TEMPERATURE=0.00,
  VAPORIZATION_TEMPERATURE=100.00,
```

HEAT_OF_VAPORIZATION=2.2590000E003/

&REAC ID='REAC',

FYI='1. Quintiere, J., G., "fundamental of fire phenomena" 2.
www.jiskoot.com 3. Babrauskas, V., "Heat Release Rate", The SFPE
Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection
Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002',

C=8.00,

H=18.00,

O=0.00,

N=0.00,

HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004,

SOOT_YIELD=0.0270,

MAXIMUM_VISIBILITY=1.06/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=-0.2500, F=-1.00/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=0.2500, F=1.00/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=59.75, F=1.00/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=60.25, F=-1.00/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=119.75, F=-1.00/

&RAMP ID='control obs nozzle_RAMP', T=120.25, F=1.00/

&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=-0.2500, F=1.00/

&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=0.2500, F=-1.00/

&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=59.75, F=-1.00/

&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=60.25, F=1.00/

&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=119.75, F=1.00/

&RAMP ID='control nozzle_RAMP', T=120.25, F=-1.00/

&PROP ID='Water Spray nozzle 1',

PART_ID='Water',

FLOW_RATE=0.0583,

ORIFICE_DIAMETER=1.0000000E-004,

SPRAY_ANGLE=65.00,0.00/


```

&PROP ID='water spray nozzle 2',
  PART_ID='Water',
  FLOW_RATE=0.0626,
  ORIFICE_DIAMETER=1.0000000E-004,
  SPRAY_ANGLE=65.00,0.00/
&PROP ID='water spray nozzle 3',
  PART_ID='Water',
  FLOW_RATE=0.0505,
  ORIFICE_DIAMETER=1.0000000E-004,
  SPRAY_ANGLE=65.00,0.00/
&DEVC ID='convection hf solid phase 1', QUANTITY='CONVECTIVE
HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='convection hf solid phase 102', QUANTITY='CONVECTIVE
HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='convection hf solid phase 103', QUANTITY='CONVECTIVE
HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='heat flux 0.125', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX
GAS', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='heat flux 0.25', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=1.00,0.2500,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='heat flux 0.375', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX
GAS', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf gas phase 1', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX GAS', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf gas phase 102', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX GAS', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf gas phase 103', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX GAS', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, ORIENTATION=-1.00,0.00,0.00/
&DEVC ID='radiative hf solid phase 1', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX', XYZ=1.00,0.1250,0.4700, IOR=-1/
&DEVC ID='radiative hf solid phase 102', QUANTITY='RADIATIVE HEAT
FLUX', XYZ=1.00,0.2500,0.4700, IOR=-1/

```

&DEVC ID='radiative hf solid phase 103', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', XYZ=1.00,0.3750,0.4700, IOR=-1/

&DEVC ID='temperatur 1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.0950,0.2500,0.4700/

&DEVC ID='temperatur 2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.2600,0.2500,0.4700/

&DEVC ID='temperatur 3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.4400,0.2500,0.4700/

&DEVC ID='temperatur 5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.80,0.2500,0.4700/

&DEVC ID='temperatur 6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.2600,0.2500,0.1500/

&DEVC ID='TIME', QUANTITY='TIME', XYZ=-0.0200,-0.0200,-0.0200/

&CTRL ID='control obs nozzle', FUNCTION_TYPE='CUSTOM', RAMP_ID='control obs nozzle_RAMP', LATCH=.FALSE., INPUT_ID='TIME'/

&CTRL ID='control nozzle', FUNCTION_TYPE='CUSTOM', RAMP_ID='control nozzle_RAMP', LATCH=.FALSE., INPUT_ID='TIME'/

&DEVC ID='NOZZLE 1', PROP_ID='Water Spray nozzle 1', XYZ=0.62,0.3750,0.60, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL', CTRL_ID='control nozzle'/

&DEVC ID='NOZZLE 2', PROP_ID='water spray nozzle 2', XYZ=0.62,0.2500,0.60, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL', CTRL_ID='control nozzle'/

&DEVC ID='NOZZLE 3', PROP_ID='water spray nozzle 3', XYZ=0.62,0.1250,0.60, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL', CTRL_ID='control nozzle'/

&MATL ID='gasoline',

FYI=(1). www.engineeringtoolbox.com (2). Babrauskas, V., "Heat Release Rate", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National

Fire Protection Association, Quincy, MA, Section 3/Chapter 1, 3rd Edition, 2002',

```

SPECIFIC_HEAT=2.22,
CONDUCTIVITY=0.1500,
DENSITY=740.00,
ABSORPTION_COEFFICIENT=40.00,
EMISSIVITY=1.00,
HEAT_OF_COMBUSTION=4.3700000E004,
N_REACTIONS=1,
HEAT_OF_REACTION=330.00,
NU_FUEL=1.00,
N_S=1.00,
REFERENCE_TEMPERATURE=50.00/
&MATL ID='CALCIUM SILICATE',
FYI='NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation',
SPECIFIC_HEAT_RAMP='CALCIUM
SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
CONDUCTIVITY=0.1200,
DENSITY=720.00,
EMISSIVITY=0.83/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.00,
F=1.25/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=200.00,
F=1.25/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=300.00,
F=1.33/
&RAMP ID='CALCIUM SILICATE_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=600.00,
F=1.55/

&SURF ID='gasoline pool',
RGB=255,102,204,
BURN_AWAY=.TRUE.,

```

```

MATL_ID(1,1)='gasoline',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=3.0000000E-003,
PART_ID='Tracer'/
&SURF ID='wall',
  RGB=146,202,166,
  MATL_ID(1,1)='CALCIUM SILICATE',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
  THICKNESS(1)=0.0130/
&OBST XB=0.0642,0.1158,0.2242,0.2758,0.00,3.0000000E-003,
  RGB=255,0,51, SURF_ID='gasoline pool'/ gasoline pool
&OBST XB=-0.0200,0.54,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Atap 1
&OBST XB=-0.0200,0.00,0.00,0.50,0.00,0.50, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Dinding belakang (sb-x minimum)
&OBST XB=-0.0200,1.00,0.50,0.52,0.00,0.50, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Dinding samping (sb-y maksimum)
&OBST XB=0.999,1.00,0.1150,0.1350,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
  Hf 3
&OBST XB=0.70,1.00,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Atap 2
&OBST XB=-0.0200,1.00,0.00,0.52,-0.0200,0.00, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Lantai
&OBST XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.00,-0.0200,0.52, COLOR='INVISIBLE',
  SURF_ID='wall'/ Dinding samping (sb-y minimum)
&OBST XB=0.999,1.00,0.2400,0.2600,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
  Hf 2
&OBST XB=0.54,0.545,0.00,0.52,0.50,0.62, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall'/ Flap 1
&OBST XB=0.545,0.695,0.00,0.52,0.50,0.52, COLOR='GRAY 80',
  SURF_ID='wall', CTRL_ID='control obs nozzle'/ Obstruction nozzle

```

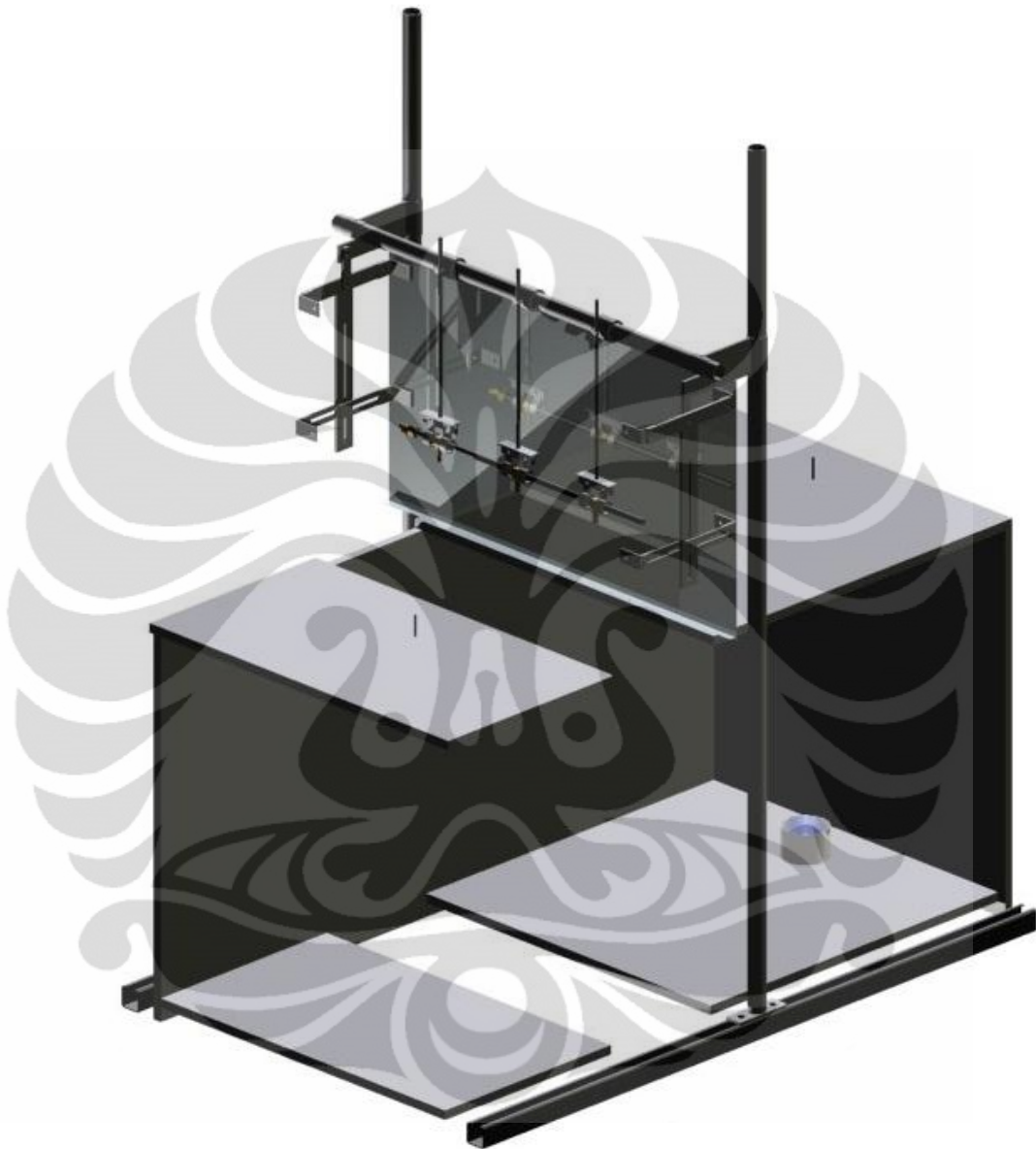
&OBST XB=0.695,0.70,0.00,0.52,0.50,0.62, COLOR='GRAY 80',
 SURF_ID='wall'/ Flap 2
 &OBST XB=0.999,1.00,0.3650,0.3850,0.4600,0.4800, SURF_ID='INERT'/
 Hf 1

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.0200,1.00,-0.0200,0.52,0.62,0.62,
 COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Z for MESH
 &VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.00,1.00,0.00,0.50,0.00,0.50,
 COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max X for MESH

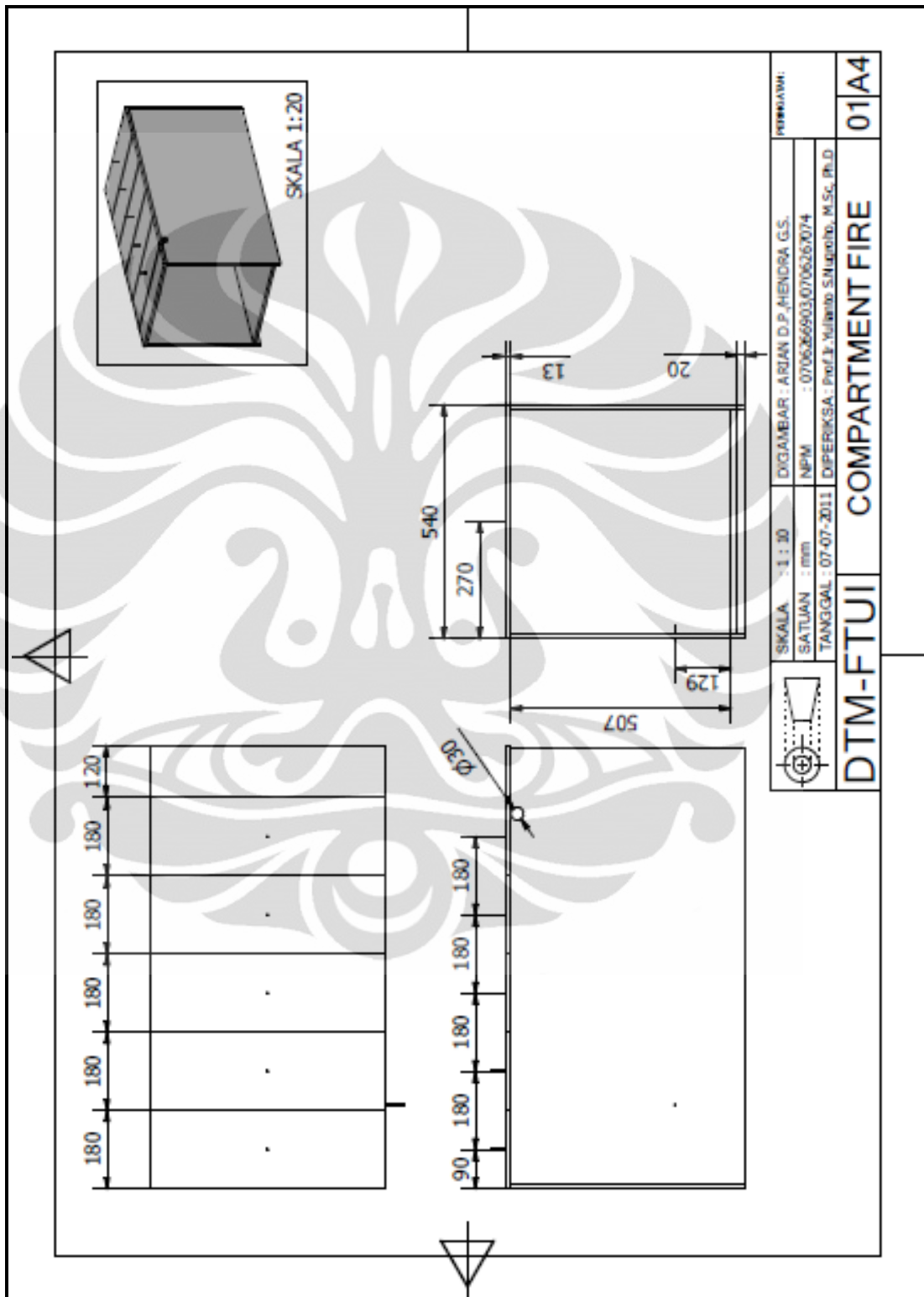
&SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=0.2750/
 &SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=0.85/
 &SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBX=1.00/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=1.00/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.0950/
 &SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', VECTOR=.TRUE.,
 PBY=0.2500/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.2500/
 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBY=0.2500/
 &SLCF QUANTITY='OPTICAL DENSITY', PBY=0.0950/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=0.4700/

&DEVC ID='Optical Density 0.28 m_MEAN', QUANTITY='OPTICAL
 DENSITY', STATISTICS='MEAN',
 XB=0.2676,0.2926,0.00,0.50,0.4750,0.50/
 &DEVC ID='Optical Density 0.85 m_MEAN', QUANTITY='OPTICAL
 DENSITY', STATISTICS='MEAN', XB=0.84,0.865,0.00,0.50,0.4750,0.50/

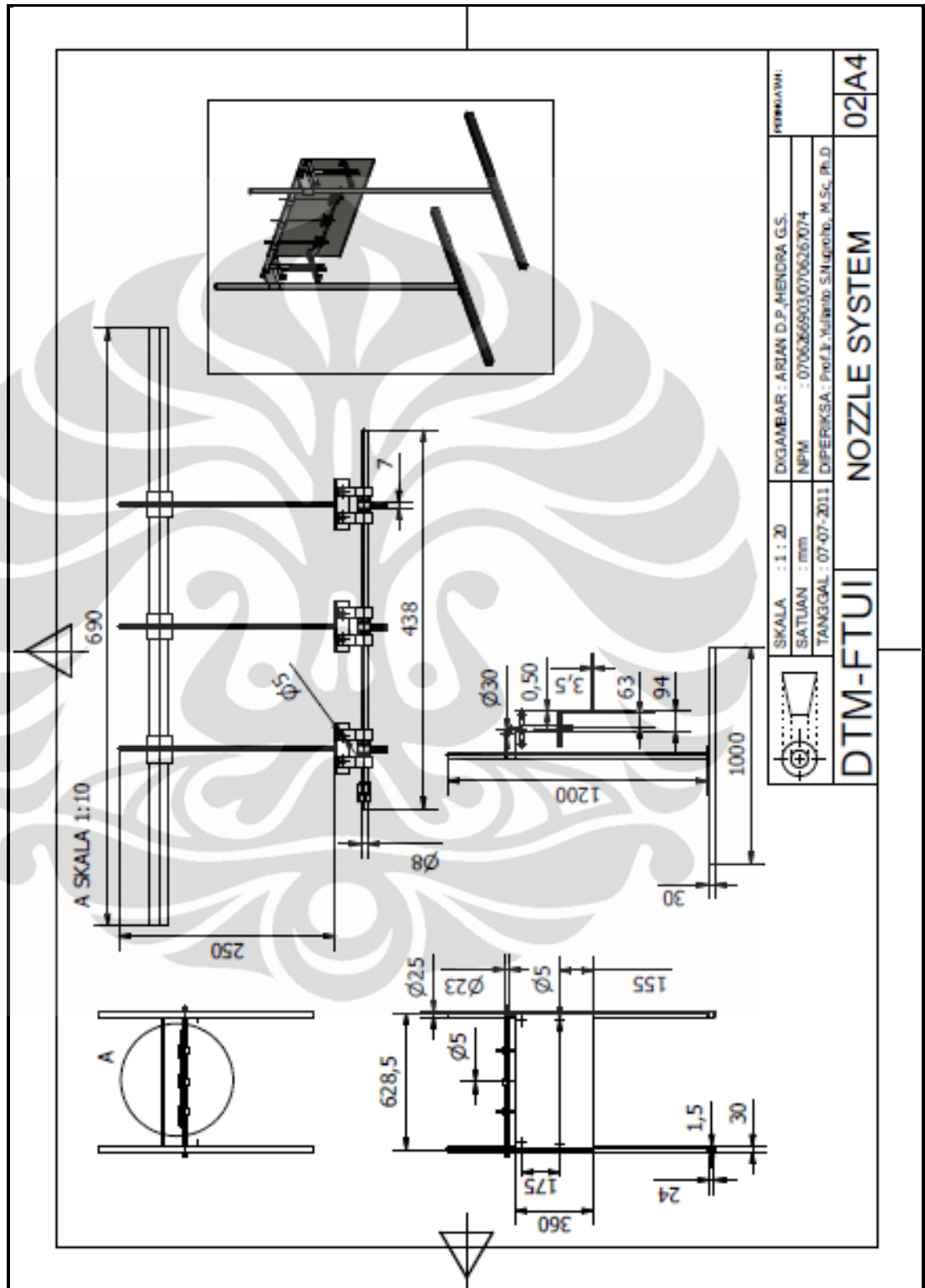
5. Gambar Kompartemen Dengan melakukan Pelubangan pada Bagian Lantai Kompartemen



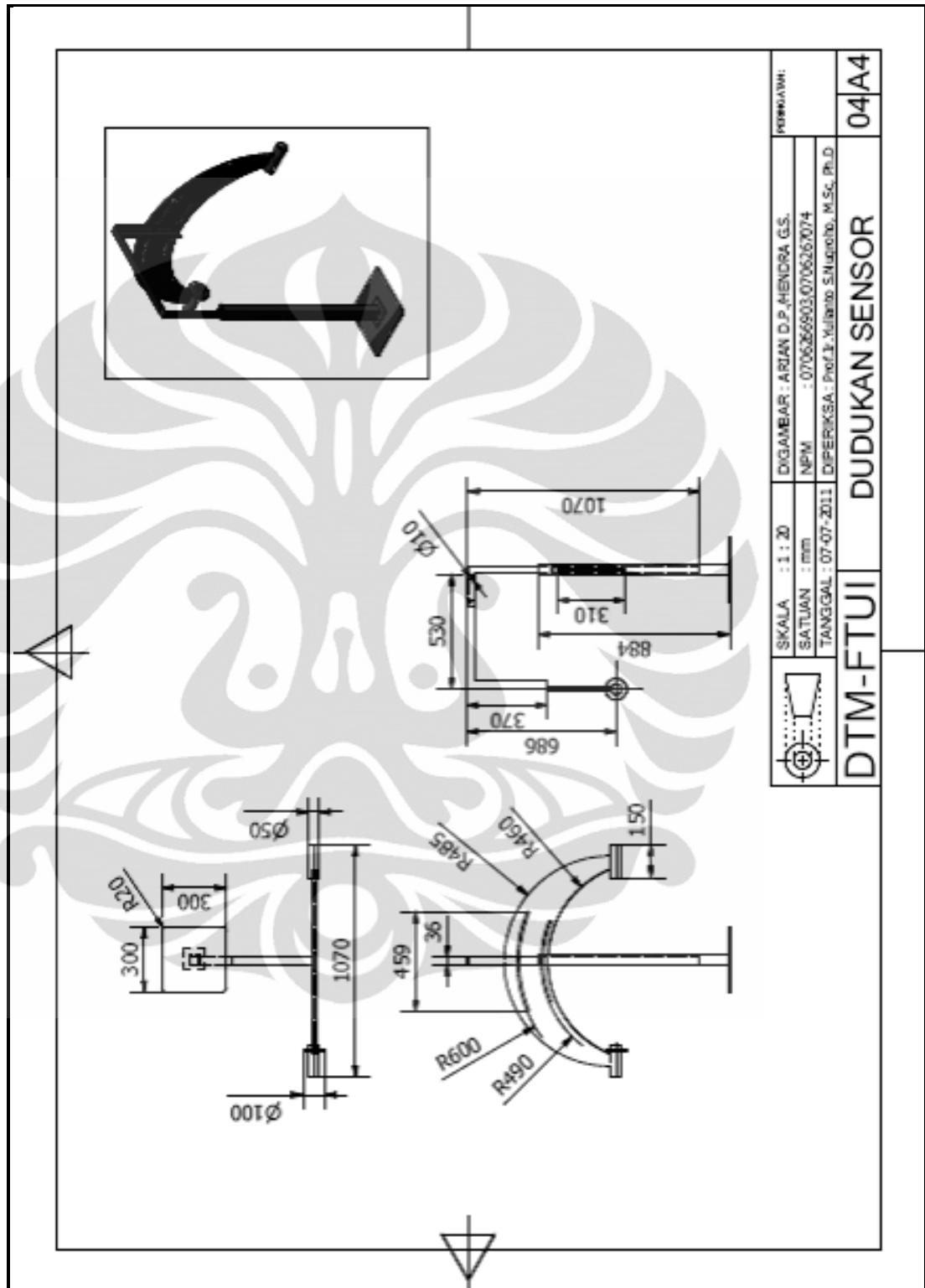
6. Gambar Teknik Desain Eksperimen
 a. Compartment Fire



b. Sistem Nozzle



c. Dudukan Sensor



7. Dokumentasi Penelitian

a. Dokumentasi Penelitian (a) *Set Up* Eksperimen, (b) Proses Pengambilan Data



(a)



(b)

b. Dokumentasi Penelitian (a) Proses Penyalaan *Pool Fire*, (b) Pengambilan Data *Flow Rate*



c. Kondisi di dalam Kompartemen

