



DOSEN

Prof. Ahmad Indra Siswantara, Ph.d.

LAPORAN UJIAN AKHIR SEMESTER

PROYEK CFD

**Studi Komparasi Distribusi Temperatur Menggunakan
OpenFOAM & CFAST Pada Enclosure Hampir Tertutup
Untuk Mengevaluasi Paparan Termal
Pada Material Bangunan**

Ujian Akhir Semester

2025/2026 Term 2

CFD

DISUSUN OLEH:

Janter Edward Marpaung– 2506669251

PROGRAM STUDI

TEKNOLOGI KESELAMATAN KEBAKARAN DAN BANGUNAN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN - UNIVERSITAS INDONESIA

2026

DAFTAR ISI

JUDUL	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
Gambar 2.1 Paparan Termal terhadap Material Bangunan.....	11
Gambar 2.2 Hubungan Transport Equation dengan CFD.....	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3.2 Geometri Simulasi FireFoam.....	39
Gambar 3.3 Geometri Simulasi CFAST	40
Gambar 3.4 Mesh Keseluruhan.....	41
Gambar 3.5 Gambar Zoom Mesh	41
Gambar 3.6 Two-Zone Model CFAST	43
Gambar 4.1 (Kontur Temperatur 1 s)	47
Gambar 4.2 (Kontur Temperatur 2 s)	47
Gambar 4.3 (Kontur Temperatur 5 s)	48
Gambar 4.4 (Kontur Temperatur 20 s)	49
DAFTAR TABEL	iv
Tabel 2.1 Komparasi CFD dan Zone Model.....	37
Tabel 3.1 Dimensi Geometri Simulasi.....	40
Tabel 3.2 Hasil Pemeriksaan Kualitas Mesh	41
Tabel 3.3 Boundary Condition.....	42
Tabel 3.4 Parameter termofisika	42
Tabel 3.5 Parameter Simulasi FireFoam.....	43
Tabel 3.7 Parameter Simulasi CFAST	44
Tabel 3.8 Spesifikasi Perangkat Penelitian.....	44
Tabel 4.1 Temperatur Maksimum Hasil Simulasi : Hasil simulasi FireFOAM.	49
Tabel 4.1 Perbandingan Hasil FireFOAM dan CFAST.....	55
Tabel 4.2 Perbandingan Karakteristik FireFOAM dan CFAST	56
DAFTAR GRAFIK.....	v
Grafik 4.1 Perubahan temperatur maksimum terhadap waktu.....	50
Grafik 4.2 Profil Temperatur Plume	51
Grafik 4.3 Heat Release Rate (HRR).....	52

Grafik 4.4 Radiative Heat Flux	53
Grafik 4.5 FireFOAM	54
Grafik 4.6 CFAST.....	54
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kebakaran pada Ruang hampir tertutup	6
2.2 Distribusi Temperatur dan Akumulasi Panas	7
2.3 Perpindahan Panas pada Kebakaran	9
2.3.1 Konduksi.....	9
2.3.2 Konveksi	9
2.3.3 Radiasi.....	10
2.4 Paparan Termal terhadap Material Bangunan.....	10
2.5 Material Beton pada Kondisi Kebakaran	12
2.5.1 Karakteristik Beton pada Kondisi Kebakaran.....	12
2.5.2 Mekanisme Degradasi Beton Akibat Temperatur Tinggi.....	13
2.5.3 Rentang Temperatur Kritis Beton.....	14
2.5.4 Relevansi terhadap Penelitian	15
2.6 Material Kayu pada Kondisi Kebakaran.....	15
2.6.1 Karakteristik Kayu pada Kondisi Kebakaran	16
2.6.2 Mekanisme Degradasi Kayu Akibat Temperatur Tinggi.....	16
2.6.2 Mekanisme Degradasi Kayu Akibat Temperatur Tinggi.....	16
2.6.3 Rentang Temperatur Kritis Kayu.....	17
2.6.4 Relevansi terhadap Penelitian	18
2.7 Computational Fluid Dynamics (CFD).....	19
2.8. OpenFOAM sebagai Platform Computational Fluid Dynamics (CFD)	22
2.8.1 Validasi Dan Kemampuan FireFOAM dalam Simulasi Kebakaran	23
2.8.2 Pendekatan Large Eddy Simulation (LES).....	24

2.8.3	Persamaan Dasar yang Diselesaikan FireFOAM.....	25
2.8.4	Pemodelan Pembakaran pada FireFOAM	26
2.8.5	Relevansi FireFOAM terhadap Penelitian	27
2.9	Zone Model dan CFAST	29
2.9.1	Konsep Two-Zone Model	30
2.9.2	Prediksi Temperatur dan Akumulasi Panas	30
2.9.3	Perpindahan Panas pada CFAST	31
2.9.4	Hubungan CFAST dan Simulasi CFD	31
2.9.5	Relevansi CFAST terhadap Penelitian.....	32
2.10	Plume Panas dan Upper Hot Layer	32
2.10.1	Fire Plume dan Transport Panas	33
2.10.2	Thermal Stratification dan Upper Hot Layer	33
2.10.3	Akumulasi Panas dan Distribusi Temperatur	34
2.10.4	Hubungan Plume dan Upper Hot Layer dengan FireFOAM dan CFAST	34
2.10.5	Relevansi terhadap Beton dan Kayu	35
2.11	Komparasi CFD dan Zone Model.....	35
2.11.1	Perbedaan Pendekatan Matematis.....	36
2.11.2	Sintesis Literatur CFD dan Zone Model.....	36
2.11.3	Sumber Perbedaan Prediksi Temperatur.....	36
2.11.4	Komparasi CFD dan Zone Model.....	37
	BAB III METODE PENELITIAN.....	38
3.2	Diagram Alir Penelitian	38
3.3	Geometri Simulasi	39
3.4	Diskretisasi Mesh.....	40
3.5	Kondisi Batas (<i>Boundary Condition</i>).....	42
3.6	Model Fisik dan Numerik	42
3.6.1	Model Turbulensi.....	42
3.6.2	Model Pembakaran	42
3.6.3	Sifat Termofisika	42
3.6.4	Reaksi Pembakaran.....	43
3.7	Parameter Simulasi FireFoam.....	43
3.8	Parameter Simulasi CFAST	43
3.9	Variabel Penelitian.....	44

3.10 Perangkat Keras dan Lunak	44
3.11 Post-Processing dan Validasi	45
BAB IV HASIL & PEMBAHASAN	
4.1 Umum	46
4.2 Distribusi Temperatur	46
4.2.1 Kontur Temperatur $t = 1$ s.....	46
4.2.2 Kontur Temperatur $t = 2$ s.....	48
4.2.3 Kontur Temperatur $t = 5$ s.....	48
4.2.4 Kontur Temperatur $t = 20$ s.....	48
4.3 Analisis Temperatur Maksimum terhadap Waktu	49
4.4 Analisis Profil Temperatur Plume	50
4.5 Pembahasan Perkembangan Plume dan Fenomena Entrainment	51
4.6 Analisis Kondisi Quasi-Steady State	52
4.7 Analisis Heat Release Rate (HRR)	52
4.8 Analisis Radiative Heat Flux	53
4.9 Validasi Model Menggunakan CFAST	53
4.10 Analisis Turbulensi Menggunakan Large Eddy Simulation (LES).....	54
4.11 Analisis Plume Berdasarkan Teori Heskestad	54
4.12 Analisis Pembentukan Upper Hot Layer dan Lower Cool Layer	55
4.13 Analisis Error Validasi terhadap CFAST	55
4.14 Perbandingan Karakteristik FireFOAM dan CFAST	56
4.15 Sintesis Hasil Simulasi.....	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....57	
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	57

ABSTRAK

Kebakaran pada ruang hampir tertutup merupakan fenomena kompleks yang melibatkan proses pembakaran, perpindahan panas, pembentukan plume, serta akumulasi energi termal yang menyebabkan distribusi temperatur berkembang secara tidak seragam di dalam enclosure. Distribusi temperatur dan akumulasi panas merupakan parameter penting dalam keselamatan kebakaran karena menentukan tingkat paparan termal yang diterima elemen bangunan selama kejadian kebakaran. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perkembangan temperatur dan akumulasi panas diperlukan untuk mengevaluasi potensi dampak termal terhadap material bangunan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi temperatur dan akumulasi panas kebakaran pada ruang hampir tertutup menggunakan dua pendekatan numerik yang berbeda, yaitu Computational Fluid Dynamics (CFD) melalui OpenFOAM fireFoam dan zone model melalui Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST), serta mengkaji kaitan hasil temperatur yang diperoleh dengan rentang temperatur kritis material bangunan berdasarkan literatur. Simulasi dilakukan pada enclosure berbentuk kubus berukuran $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ dengan sumber api methane (CH_4). Distribusi temperatur divisualisasikan pada waktu simulasi 5 s, 10 s, 15 s, dan 20 s menggunakan ParaView, sedangkan perkembangan temperatur kompartemen dianalisis menggunakan keluaran CFAST. Hasil simulasi menunjukkan bahwa OpenFOAM mampu memodelkan distribusi temperatur dan perkembangan plume panas secara spasial dengan detail yang tinggi, sedangkan CFAST menghasilkan representasi temperatur kompartemen yang lebih sederhana melalui pendekatan two-zone model. Kedua metode menunjukkan tren peningkatan temperatur dan akumulasi panas yang serupa pada tahap awal simulasi, meskipun menghasilkan karakteristik distribusi temperatur yang berbeda akibat perbedaan pendekatan numerik. Hasil temperatur yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan rentang temperatur kritis material bangunan yang dilaporkan dalam literatur untuk mengevaluasi tingkat paparan termal yang berpotensi terjadi selama kebakaran. Analisis menunjukkan bahwa distribusi temperatur dan akumulasi panas dalam enclosure dapat digunakan sebagai indikator awal dalam mengidentifikasi potensi kondisi termal yang berkaitan dengan degradasi material bangunan pada paparan temperatur tertentu. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan CFD dan zone model tidak hanya dapat digunakan untuk memahami karakteristik distribusi temperatur kebakaran, tetapi juga memberikan dasar evaluasi paparan termal terhadap material bangunan melalui keterkaitannya dengan rentang temperatur kritis yang dilaporkan dalam literatur.

Kata Kunci: distribusi temperatur, akumulasi panas, kebakaran ruang hampir tertutup, OpenFOAM, fireFoam, CFAST, CFD, zone model, paparan termal, temperatur kritis material bangunan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebakaran pada ruang hampir tertutup merupakan salah satu fenomena yang memiliki karakteristik kompleks karena melibatkan interaksi antara proses pembakaran, perpindahan panas, dinamika fluida, pembentukan plume panas, dan distribusi temperatur di dalam enclosure. Ketika kebakaran terjadi pada ruang hampir tertutup, energi panas hasil pembakaran akan terakumulasi di dalam kompartemen sehingga menyebabkan peningkatan temperatur secara bertahap. Akumulasi panas tersebut umumnya terjadi pada bagian atas ruangan akibat efek buoyancy yang mendorong gas panas bergerak ke atas dan membentuk lapisan gas panas atau *upper hot layer*. Kondisi ini menyebabkan distribusi temperatur di dalam enclosure menjadi tidak seragam dan berkembang terhadap waktu. Distribusi temperatur dan akumulasi panas merupakan parameter penting dalam analisis keselamatan kebakaran karena berpengaruh terhadap perkembangan api, penyebaran panas, pembentukan *upper hot layer*, potensi terjadinya *flashover*, serta tingkat paparan termal yang diterima elemen bangunan selama kejadian kebakaran. Temperatur yang terus meningkat di dalam ruang hampir tertutup dapat menghasilkan kondisi termal yang berpotensi mempengaruhi karakteristik material bangunan. Selain distribusi temperatur, akumulasi panas di dalam enclosure merupakan parameter penting karena menggambarkan kemampuan ruang dalam menyimpan energi termal selama kebakaran berlangsung. Besarnya akumulasi panas berpengaruh terhadap laju peningkatan temperatur, perkembangan lapisan gas panas, serta tingkat paparan termal yang diterima elemen bangunan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai distribusi temperatur dan akumulasi panas tidak hanya penting untuk memahami perkembangan kebakaran, tetapi juga untuk mengevaluasi tingkat paparan termal yang mungkin dialami material bangunan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan temperatur tinggi dapat menyebabkan perubahan sifat fisik, termal, dan mekanik material bangunan.

Pada material beton, peningkatan temperatur diketahui dapat memicu proses dehidrasi pasta semen, perubahan mikrostruktur, serta penurunan kekuatan mekanik yang semakin signifikan pada temperatur tinggi. Sementara itu, pada material kayu, peningkatan temperatur menyebabkan proses pengeringan, degradasi termal, pirolisis, dan pembentukan lapisan arang (*char layer*) yang mempengaruhi perilaku material selama kebakaran. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa temperatur yang berkembang selama kebakaran merupakan parameter penting dalam mengevaluasi tingkat paparan termal yang berpotensi mempengaruhi kinerja material bangunan. Referensi mengenai perilaku termal beton dan kayu akan digunakan sebagai dasar interpretasi hasil temperatur simulasi pada penelitian ini. Perkembangan teknologi simulasi numerik memungkinkan fenomena kebakaran dianalisis secara lebih mendalam menggunakan pendekatan komputasi. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD mampu memodelkan distribusi temperatur, perpindahan panas, dan dinamika aliran gas panas secara detail melalui penyelesaian persamaan konservasi

massa, momentum, dan energi. OpenFOAM merupakan perangkat lunak *open-source* berbasis CFD yang banyak digunakan dalam penelitian simulasi kebakaran. Pada penelitian ini digunakan solver *fireFoam* yang dirancang khusus untuk memodelkan pembakaran, perpindahan panas, turbulensi, dan distribusi temperatur pada fenomena kebakaran. Keunggulan utama OpenFOAM adalah kemampuannya menghasilkan distribusi temperatur tiga dimensi dengan resolusi spasial tinggi sehingga perkembangan plume panas dan akumulasi panas dapat diamati secara detail. Selain pendekatan CFD, simulasi kebakaran juga banyak dilakukan menggunakan *zone model* seperti *Consolidated Fire and Smoke Transport* (CFAST). Berbeda dengan CFD yang menyelesaikan distribusi temperatur secara detail pada seluruh domain, CFAST menggunakan pendekatan *two-zone model* yang membagi enclosure menjadi dua lapisan utama, yaitu *upper hot layer* dan *lower cool layer*. Pendekatan ini memungkinkan prediksi perkembangan temperatur kompartemen dan akumulasi panas dilakukan dengan kebutuhan komputasi yang jauh lebih rendah dibandingkan CFD. Oleh karena itu, CFAST banyak digunakan untuk analisis awal keselamatan kebakaran kompartemen. Meskipun OpenFOAM dan CFAST sama-sama digunakan untuk menganalisis fenomena kebakaran ruang hampir tertutup, kedua perangkat lunak tersebut memiliki filosofi numerik dan representasi fisik yang berbeda. OpenFOAM menggunakan pendekatan CFD yang mampu menggambarkan distribusi temperatur dan aliran gas panas secara spasial, sedangkan CFAST menggunakan pendekatan *zone model* yang merepresentasikan temperatur sebagai temperatur rata-rata pada masing-masing lapisan kompartemen.

Perbedaan pendekatan tersebut berpotensi menghasilkan karakteristik distribusi temperatur dan akumulasi panas yang berbeda sehingga menarik untuk dianalisis secara komparatif. Sebagian besar penelitian terdahulu mengenai OpenFOAM maupun CFAST berfokus pada kemampuan model dalam memprediksi distribusi temperatur, perkembangan asap, dan karakteristik aliran gas panas selama kebakaran kompartemen. Meskipun pendekatan CFD dan *zone model* telah banyak digunakan dalam simulasi kebakaran, masih sedikit penelitian yang mengevaluasi bagaimana hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari kedua pendekatan numerik tersebut dapat diinterpretasikan terhadap rentang temperatur kritis material bangunan. Selain itu, penelitian yang secara langsung mengaitkan hasil simulasi temperatur kebakaran pada enclosure tertutup dengan potensi paparan termal material bangunan berdasarkan data temperatur kritis yang tersedia dalam literatur masih terbatas. Kajian pada enclosure berukuran kecil juga masih menarik untuk diteliti karena kondisi tersebut dapat mempercepat akumulasi panas dan menghasilkan gradien temperatur yang tinggi dalam waktu relatif singkat sehingga relevan untuk mengevaluasi tingkat paparan termal pada ruang hampir tertutup berskala terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang tidak hanya membandingkan karakteristik prediksi temperatur menggunakan CFD dan *zone model*, tetapi juga mengevaluasi implikasi temperatur yang dihasilkan terhadap potensi paparan termal material bangunan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis distribusi temperatur dan akumulasi panas kebakaran pada ruang hampir tertutup menggunakan dua pendekatan numerik yang berbeda, yaitu CFD melalui OpenFOAM dan *zone model* melalui CFAST.

Selain melakukan komparasi karakteristik hasil temperatur yang diperoleh dari kedua pendekatan tersebut, penelitian ini juga mengkaji keterkaitan hasil temperatur dengan rentang temperatur kritis material bangunan berdasarkan data yang dilaporkan dalam literatur. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari dua pendekatan numerik berbeda sebagai dasar evaluasi potensi paparan termal material bangunan berdasarkan rentang temperatur kritis yang tersedia dalam literatur. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan pemahaman mengenai karakteristik distribusi temperatur dan akumulasi panas kebakaran, tetapi juga memberikan dasar evaluasi awal terhadap potensi paparan termal yang dapat dialami material bangunan selama kejadian kebakaran.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik distribusi temperatur kebakaran pada ruang hampir tertutup yang diprediksi menggunakan pendekatan CFD melalui OpenFOAM?
2. Bagaimana karakteristik distribusi temperatur dan perkembangan lapisan gas panas pada ruang hampir tertutup yang diprediksi menggunakan pendekatan zone model melalui CFAST?
3. Bagaimana perkembangan plume panas dan pembentukan upper hot layer selama proses kebakaran pada ruang hampir tertutup?
4. Bagaimana karakteristik akumulasi panas yang terjadi pada enclosure tertutup selama simulasi kebakaran berlangsung?
5. Bagaimana perbandingan hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari pendekatan CFD dan zone model?
6. Bagaimana keterkaitan hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari simulasi dengan rentang temperatur kritis material bangunan berdasarkan literatur?
7. Bagaimana potensi paparan termal terhadap material bangunan yang dapat diidentifikasi berdasarkan hasil simulasi kebakaran ruang hampir tertutup?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis distribusi temperatur kebakaran pada ruang hampir tertutup menggunakan OpenFOAM dengan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD).
2. Menganalisis distribusi temperatur dan perkembangan lapisan gas panas pada ruang hampir tertutup menggunakan CFAST dengan pendekatan zone model.
3. Menganalisis perkembangan plume panas dan pembentukan upper hot layer selama simulasi kebakaran berlangsung.
4. Menganalisis karakteristik akumulasi panas pada enclosure tertutup selama kejadian kebakaran.

5. Membandingkan hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari pendekatan CFD dan zone model.
6. Mengevaluasi keterkaitan hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas terhadap rentang temperatur kritis material bangunan berdasarkan data literatur.
7. Mengidentifikasi potensi paparan termal terhadap material bangunan berdasarkan hasil simulasi kebakaran ruang hampir tertutup.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Menambah kajian ilmiah mengenai distribusi temperatur dan akumulasi panas pada kebakaran ruang hampir tertutup menggunakan pendekatan CFD dan zone model.
2. Memberikan pemahaman mengenai karakteristik prediksi temperatur dan akumulasi panas yang dihasilkan oleh OpenFOAM dan CFAST.
3. Menjadi referensi akademik dalam pengembangan penelitian simulasi kebakaran yang mengaitkan hasil temperatur dengan rentang temperatur kritis material bangunan
4. Menambah pemahaman mengenai hubungan antara distribusi temperatur, akumulasi panas, dan potensi paparan termal terhadap elemen bangunan selama kebakaran.
5. Memberikan gambaran tingkat paparan termal yang berpotensi dialami material bangunan selama kebakaran ruang hampir tertutup.
6. Menjadi dasar evaluasi awal terhadap implikasi temperatur kebakaran terhadap material bangunan berdasarkan data temperatur kritis yang tersedia dalam literatur.
7. Mendukung pengembangan kajian keselamatan kebakaran bangunan melalui analisis distribusi temperatur dan akumulasi panas.
8. Memberikan informasi yang dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam analisis risiko kebakaran pada ruang hampir tertutup berskala kecil.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada beberapa ruang lingkup berikut:

1. Simulasi dilakukan pada ruang hampir tertutup berbentuk kubus.
2. Dimensi enclosure yang digunakan adalah:
 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$
3. Bahan bakar yang digunakan pada simulasi adalah methane (CH_4).
4. Simulasi CFD dilakukan menggunakan OpenFOAM dengan solver fireFoam.
5. Simulasi zone model dilakukan menggunakan Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST).
6. Analisis difokuskan pada distribusi temperatur, perkembangan plume panas, pembentukan upper hot layer, dan akumulasi panas selama kebakaran.
7. Simulasi dilakukan tanpa ventilasi mekanis.
8. Simulasi dilakukan tanpa sistem sprinkler atau sistem pemadaman aktif lainnya.
9. Simulasi dilakukan pada waktu pengamatan:
 - o 5 s
 - o 10 s

- 15 s
 - 20 s
10. Visualisasi hasil OpenFOAM dilakukan menggunakan ParaView.
 11. Komparasi dilakukan berdasarkan karakteristik distribusi temperatur dan akumulasi panas yang dihasilkan oleh OpenFOAM dan CFAST.
 12. Evaluasi terhadap material bangunan dilakukan melalui interpretasi hasil temperatur simulasi terhadap rentang temperatur kritis material bangunan yang diperoleh dari literatur.
 13. Penelitian ini tidak memodelkan perilaku termal, degradasi material, pirolisis material, maupun perubahan sifat mekanik beton dan kayu secara langsung.
 14. Analisis material bangunan dibatasi pada kajian temperatur kritis material sebagai dasar evaluasi paparan termal selama kebakaran.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini terdiri dari lima bab.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi kebakaran ruang hampir tertutup, distribusi temperatur, akumulasi panas, perpindahan panas, Computational Fluid Dynamics (CFD), OpenFOAM, fireFoam, CFAST, plume panas, upper hot layer, serta temperatur kritis material bangunan berdasarkan literatur.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas metodologi penelitian yang meliputi geometri simulasi, parameter simulasi, pembuatan mesh, setup OpenFOAM dan CFAST, proses simulasi numerik, pengambilan data, visualisasi hasil, serta metode analisis yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi distribusi temperatur dan akumulasi panas menggunakan OpenFOAM dan CFAST, perkembangan plume panas, pembentukan upper hot layer, komparasi hasil kedua pendekatan numerik, serta evaluasi keterkaitan hasil temperatur terhadap rentang temperatur kritis material bangunan berdasarkan literatur.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kebakaran pada Ruang hampir tertutup

Kebakaran merupakan fenomena fisik dan kimia yang melibatkan proses pembakaran, pelepasan energi panas, perpindahan panas, pembentukan produk pembakaran, serta interaksi antara api dan lingkungan sekitarnya. Pada bangunan, sebagian besar peristiwa kebakaran terjadi di dalam ruang hampir tertutup (*enclosure*) sehingga perkembangan kebakaran tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar, tetapi juga oleh ukuran ruang, kondisi ventilasi, geometri kompartemen, dan mekanisme perpindahan panas yang terjadi selama proses pembakaran. Dalam rekayasa keselamatan kebakaran, kebakaran pada ruang hampir tertutup sering disebut sebagai *compartment fire* atau *enclosure fire*. Berbeda dengan kebakaran pada ruang terbuka, panas yang dihasilkan selama pembakaran pada ruang hampir tertutup cenderung terakumulasi di dalam kompartemen karena adanya batas fisik berupa dinding, lantai, dan langit-langit. Akumulasi energi panas tersebut menyebabkan peningkatan temperatur gas secara progresif dan menghasilkan kondisi termal yang lebih kompleks dibandingkan kebakaran pada ruang terbuka. Secara umum perkembangan kebakaran pada ruang hampir tertutup dapat dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu tahap penyalaan (*ignition*), tahap pertumbuhan api (*growth stage*), tahap kebakaran berkembang penuh (*fully developed fire*), dan tahap peluruhan (*decay stage*). Pada tahap penyalaan, sumber panas awal menyebabkan material mencapai temperatur yang cukup untuk memulai proses pembakaran. Setelah api terbentuk, kebakaran memasuki tahap pertumbuhan dimana laju pelepasan panas (*Heat Release Rate/HRR*) meningkat seiring bertambahnya material yang terlibat dalam proses pembakaran. Pada tahap pertumbuhan, gas panas yang dihasilkan dari pembakaran memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan udara sekitarnya sehingga bergerak ke arah atas akibat gaya apung (*buoyancy force*).

Pergerakan gas panas tersebut membentuk kolom aliran yang dikenal sebagai *fire plume*. Selama bergerak menuju langit-langit, plume mengalami proses entrainment, yaitu menarik udara di sekitarnya untuk ikut masuk ke dalam aliran. Akibatnya debit massa plume meningkat seiring bertambahnya ketinggian. Ketika plume mencapai langit-langit enclosure, aliran gas panas akan menyebar secara horizontal membentuk *ceiling jet*. Akumulasi gas panas di bawah langit-langit kemudian menghasilkan pembentukan lapisan gas panas (*upper hot layer*) yang menjadi salah satu karakteristik utama kebakaran ruang hampir tertutup. Semakin lama kebakaran berlangsung, lapisan gas panas akan semakin tebal dan temperatur di dalam lapisan tersebut akan meningkat akibat akumulasi energi panas yang terus berlangsung. Perkembangan temperatur pada ruang hampir tertutup sangat dipengaruhi oleh kondisi ventilasi. Pada kondisi ventilasi yang cukup, laju pembakaran umumnya dikendalikan oleh jumlah bahan bakar (*fuel-controlled fire*). Sebaliknya, ketika suplai oksigen mulai terbatas, perkembangan kebakaran akan dikendalikan oleh ventilasi (*ventilation-controlled fire*). Kondisi ini dapat menyebabkan akumulasi gas hasil pembakaran yang belum terbakar sempurna dan menghasilkan

lingkungan termal yang sangat berbeda dibandingkan kebakaran yang memperoleh suplai udara yang memadai.

Fenomena penting lain yang sering dikaitkan dengan kebakaran ruang hampir tertutup adalah *thermal stratification*. Thermal stratification terjadi akibat perbedaan densitas antara gas panas dan gas yang lebih dingin sehingga terbentuk lapisan temperatur yang berbeda secara vertikal. Bagian atas enclosure umumnya memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan bagian bawah. Perbedaan temperatur tersebut menjadi dasar terbentuknya konsep *upper layer* dan *lower layer* yang digunakan dalam berbagai model kebakaran, termasuk pada perangkat lunak Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST). Apabila energi panas yang terakumulasi di dalam enclosure terus meningkat, temperatur gas panas dan fluks panas radiasi dapat mencapai kondisi yang memungkinkan terjadinya *flashover*. Flashover merupakan transisi cepat dari kebakaran lokal menjadi kebakaran yang melibatkan hampir seluruh material mudah terbakar di dalam kompartemen. Fenomena ini ditandai dengan peningkatan temperatur yang sangat cepat dan perubahan kondisi kebakaran menjadi jauh lebih berbahaya bagi penghuni maupun struktur bangunan. Berdasarkan uraian tersebut dapat dipahami bahwa kebakaran pada ruang hampir tertutup merupakan fenomena yang sangat dipengaruhi oleh distribusi temperatur, akumulasi panas, pergerakan plume, stratifikasi termal, dan kondisi ventilasi. Oleh karena itu, analisis distribusi temperatur menjadi salah satu aspek yang sangat penting dalam rekayasa keselamatan kebakaran karena mampu menggambarkan tingkat keparahan lingkungan termal yang berkembang selama kebakaran berlangsung.

2.2 Distribusi Temperatur dan Akumulasi Panas

Distribusi temperatur merupakan salah satu parameter terpenting dalam analisis kebakaran karena menggambarkan bagaimana energi panas yang dihasilkan selama pembakaran tersebar di dalam enclosure. Distribusi temperatur tidak hanya menentukan karakteristik perkembangan kebakaran, tetapi juga mempengaruhi kondisi lingkungan termal yang diterima oleh penghuni, peralatan, serta elemen bangunan selama peristiwa kebakaran berlangsung. Pada kebakaran ruang hampir tertutup, temperatur tidak terdistribusi secara merata di seluruh volume ruang. Temperatur tertinggi umumnya terjadi di sekitar sumber api dan sepanjang jalur plume panas, sedangkan temperatur yang lebih rendah ditemukan pada area yang lebih jauh dari sumber api atau pada bagian bawah enclosure. Perbedaan temperatur tersebut terjadi akibat kombinasi proses pembakaran, gaya apung, perpindahan panas, dan pencampuran fluida di dalam ruang. Salah satu mekanisme utama yang mengendalikan distribusi temperatur adalah pembentukan fire plume. Ketika bahan bakar terbakar, energi panas yang dihasilkan menyebabkan udara dan produk pembakaran mengalami ekspansi termal sehingga densitasnya menurun. Akibatnya fluida panas bergerak ke atas membentuk plume. Temperatur tertinggi pada umumnya berada di sepanjang sumbu plume karena daerah tersebut merupakan lokasi utama pelepasan energi panas dari proses pembakaran. Selama plume bergerak menuju bagian atas enclosure, terjadi proses entrainment yang menyebabkan udara di sekitarnya ikut masuk ke dalam aliran plume. Proses ini

menghasilkan pencampuran antara gas panas dan udara yang lebih dingin sehingga mempengaruhi distribusi temperatur di sepanjang lintasan plume. Semakin tinggi plume bergerak, debit massa aliran meningkat akibat entrainment, sementara distribusi temperatur mengalami perubahan akibat proses pencampuran tersebut.

Ketika plume mencapai langit-langit, aliran panas akan menyebar secara horizontal membentuk ceiling jet. Pada tahap ini energi panas mulai terdistribusi ke area yang lebih luas di bawah langit-langit enclosure. Akumulasi gas panas yang terus berlangsung menyebabkan terbentuknya lapisan gas panas atau upper hot layer. Lapisan ini menjadi lokasi utama penyimpanan energi panas selama kebakaran ruang hampir tertutup. Pembentukan upper hot layer merupakan salah satu fenomena yang paling penting dalam analisis distribusi temperatur. Temperatur pada lapisan atas biasanya jauh lebih tinggi dibandingkan temperatur pada lapisan bawah. Perbedaan temperatur tersebut menghasilkan gradien temperatur vertikal yang dikenal sebagai thermal stratification. Besarnya stratifikasi termal dipengaruhi oleh ukuran enclosure, laju pelepasan panas, kondisi ventilasi, serta karakteristik perpindahan panas yang terjadi selama kebakaran. Selain distribusi temperatur spasial, aspek lain yang sangat penting adalah akumulasi panas (*heat accumulation*). Akumulasi panas mengacu pada peningkatan energi termal yang tersimpan di dalam enclosure akibat panas yang dihasilkan selama pembakaran lebih besar dibandingkan panas yang keluar dari ruang. Semakin besar akumulasi panas yang terjadi, semakin tinggi temperatur gas yang berkembang di dalam enclosure. Pada ruang hampir tertutup dengan ventilasi terbatas, akumulasi panas dapat berlangsung sangat cepat karena energi panas sulit dilepaskan ke lingkungan luar. Kondisi ini menyebabkan peningkatan temperatur yang signifikan serta mempercepat pembentukan upper hot layer. Sebaliknya, pada ruang dengan ventilasi yang lebih besar, sebagian energi panas dapat keluar melalui bukaan sehingga laju peningkatan temperatur cenderung lebih rendah.

Dalam konteks rekayasa keselamatan kebakaran, distribusi temperatur dan akumulasi panas digunakan untuk mengevaluasi tingkat keparahan kebakaran (*fire severity*). Temperatur yang tinggi menunjukkan bahwa lingkungan termal memiliki potensi yang lebih besar untuk menyebabkan cedera pada manusia, kerusakan peralatan, maupun degradasi material bangunan. Oleh karena itu, distribusi temperatur sering digunakan sebagai parameter utama dalam berbagai analisis keselamatan kebakaran. Penelitian ini menempatkan distribusi temperatur dan akumulasi panas sebagai fokus utama analisis. Distribusi temperatur digunakan untuk menggambarkan penyebaran energi panas di dalam enclosure, sedangkan akumulasi panas digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kondisi termal selama kebakaran berlangsung. Hasil simulasi yang diperoleh dari OpenFOAM dan CFAST kemudian dibandingkan untuk memahami bagaimana kedua pendekatan numerik memprediksi perkembangan temperatur pada ruang hampir tertutup. OpenFOAM menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) yang mampu memodelkan distribusi temperatur secara tiga dimensi dengan resolusi spasial yang tinggi. Melalui pendekatan ini, distribusi temperatur dapat diamati pada setiap lokasi di dalam enclosure sehingga fenomena plume, thermal stratification, dan pembentukan upper hot layer dapat divisualisasikan

secara detail. Sebaliknya, CFAST menggunakan pendekatan two-zone model yang menyederhanakan distribusi temperatur menjadi dua lapisan utama, yaitu upper layer dan lower layer. Meskipun tidak mampu memberikan informasi spasial secara rinci seperti CFD, pendekatan ini memungkinkan prediksi perkembangan temperatur kompartemen dengan kebutuhan komputasi yang jauh lebih rendah. Dengan demikian, distribusi temperatur dan akumulasi panas menjadi dasar utama yang menghubungkan fenomena fisik kebakaran, pendekatan numerik yang digunakan dalam simulasi, serta evaluasi paparan termal terhadap material bangunan yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

2.3 Perpindahan Panas pada Kebakaran

Perpindahan panas merupakan mekanisme fundamental yang mengendalikan perkembangan temperatur selama kebakaran. Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran akan berpindah dari daerah bertemperatur tinggi menuju daerah bertemperatur lebih rendah melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga mekanisme tersebut bekerja secara simultan selama kebakaran dan menentukan distribusi temperatur yang berkembang di dalam enclosure.

Dalam konteks kebakaran ruang hampir tertutup, perpindahan panas tidak hanya mempengaruhi perkembangan temperatur gas, tetapi juga menentukan tingkat paparan termal yang diterima oleh material bangunan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai mekanisme perpindahan panas menjadi penting untuk menjelaskan hubungan antara temperatur hasil simulasi dan potensi dampaknya terhadap material konstruksi.

2.3.1 Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan panas yang terjadi melalui media padat akibat adanya gradien temperatur. Pada proses ini energi panas ditransfer melalui interaksi molekul tanpa disertai perpindahan massa material secara makroskopis. Dalam kebakaran bangunan, konduksi berperan penting pada proses penetrasi panas ke dalam elemen struktur seperti beton, baja, maupun kayu. Ketika permukaan material terpapar temperatur tinggi akibat kebakaran, panas akan mengalir dari permukaan menuju bagian dalam material. Laju perpindahan panas secara konduksi dipengaruhi oleh konduktivitas termal material, luas penampang perpindahan panas, serta perbedaan temperatur yang terjadi. Beton memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah sehingga mampu memperlambat penetrasi panas menuju bagian dalam elemen struktur. Sebaliknya, material dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi akan mengalami peningkatan temperatur internal yang lebih cepat. Oleh karena itu, karakteristik konduksi material memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketahanan material terhadap kebakaran.

2.3.2 Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi akibat pergerakan fluida. Pada kebakaran ruang hampir tertutup, mekanisme ini menjadi salah satu proses dominan yang mengendalikan distribusi temperatur di dalam enclosure. Ketika pembakaran berlangsung, temperatur gas di sekitar sumber api meningkat secara signifikan.

Peningkatan temperatur tersebut menyebabkan densitas gas menurun sehingga gas panas bergerak ke atas akibat gaya apung. Pergerakan ini menghasilkan aliran konveksi yang membentuk fire plume. Selama plume berkembang, udara di sekitarnya ikut tertarik ke dalam aliran melalui proses entrainment. Akibatnya terjadi pencampuran antara gas panas dan udara yang lebih dingin sehingga mempengaruhi distribusi temperatur di dalam enclosure. Setelah mencapai langit-langit, aliran panas akan menyebar secara horizontal membentuk ceiling jet yang selanjutnya berkontribusi terhadap pembentukan upper hot layer. Dalam kebakaran ruang hampir tertutup, konveksi merupakan mekanisme utama yang menyebabkan energi panas dapat terdistribusi ke berbagai bagian enclosure. Oleh karena itu, pemodelan aliran konvektif menjadi salah satu aspek terpenting dalam simulasi kebakaran menggunakan pendekatan CFD maupun zone model.

2.3.3 Radiasi

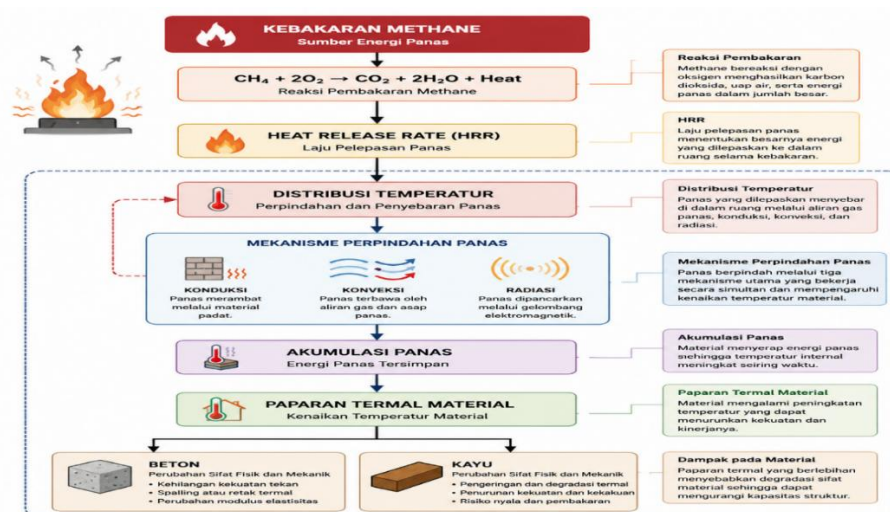
Radiasi merupakan perpindahan panas dalam bentuk gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan media penghantar. Berbeda dengan konduksi dan konveksi yang bergantung pada keberadaan material atau fluida, radiasi dapat terjadi melalui ruang kosong. Pada kondisi kebakaran, radiasi termal sering menjadi mekanisme perpindahan panas yang sangat signifikan, terutama ketika temperatur api dan gas panas telah mencapai nilai yang tinggi. Energi radiasi yang dipancarkan oleh nyala api dan lapisan gas panas dapat diserap oleh permukaan material bangunan sehingga menyebabkan peningkatan temperatur material tersebut. Peran radiasi menjadi semakin penting pada kondisi kebakaran berkembang penuh (*fully developed fire*) karena sebagian besar energi panas yang dilepaskan dari nyala api dapat ditransfer melalui mekanisme ini. Fluks panas radiasi yang tinggi juga merupakan salah satu faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya flashover pada enclosure. Dalam penelitian ini, distribusi temperatur yang diperoleh dari simulasi OpenFOAM dan CFAST merupakan hasil interaksi kompleks antara proses pembakaran serta mekanisme perpindahan panas melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Oleh karena itu, ketiga mekanisme tersebut menjadi dasar dalam memahami perkembangan temperatur dan akumulasi panas yang terjadi selama kebakaran ruang hampir tertutup.

2.4 Paparan Termal terhadap Material Bangunan

Paparan termal (*thermal exposure*) merupakan kondisi dimana suatu material menerima energi panas dari lingkungan sekitarnya selama periode waktu tertentu. Dalam peristiwa kebakaran, paparan termal terjadi akibat interaksi antara temperatur gas panas, radiasi termal, dan mekanisme perpindahan panas yang bekerja pada permukaan material bangunan. Besarnya paparan termal tidak hanya ditentukan oleh temperatur yang dicapai selama kebakaran, tetapi juga oleh durasi paparan panas yang diterima material. Material yang terpapar temperatur tinggi dalam waktu singkat dapat menunjukkan respons yang berbeda dibandingkan material yang menerima temperatur lebih rendah dalam durasi yang lebih lama. Oleh karena itu, evaluasi paparan termal harus mempertimbangkan baik besarnya temperatur maupun perkembangan temperatur terhadap waktu. Pada kebakaran

ruang hampir tertutup, temperatur gas panas yang berkembang di dalam enclosure dapat digunakan sebagai indikator tingkat keparahan lingkungan termal (*fire thermal environment*). Temperatur tersebut tidak secara langsung merepresentasikan temperatur internal material, tetapi menentukan besarnya energi panas yang tersedia untuk ditransfer menuju material melalui mekanisme konveksi dan radiasi. Berbagai penelitian mengenai perilaku material bangunan pada temperatur tinggi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur lingkungan kebakaran berhubungan erat dengan perubahan sifat fisik, termal, dan mekanik material. Beton dapat mengalami dehidrasi produk hidrasi semen, perkembangan retak mikro, penurunan kuat tekan, dan spalling. Sementara itu, kayu dapat mengalami pengeringan, degradasi termal, pyrolysis, pembentukan lapisan arang, hingga pembakaran yang lebih intensif. Dalam konteks penelitian ini, OpenFOAM dan CFAST tidak digunakan untuk memodelkan perilaku material bangunan secara langsung. Kedua perangkat lunak digunakan untuk memodelkan kondisi termal kebakaran yang berkembang di dalam enclosure.

Oleh karena itu, temperatur yang diperoleh dari simulasi diperlakukan sebagai indikator tingkat paparan termal yang berpotensi diterima material bangunan selama kebakaran berlangsung. Pendekatan ini memungkinkan hasil simulasi distribusi temperatur dan akumulasi panas dihubungkan dengan rentang temperatur kritis material bangunan yang telah dilaporkan dalam berbagai penelitian terdahulu. Dengan demikian, hasil simulasi tidak hanya memberikan informasi mengenai karakteristik kebakaran, tetapi juga dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak termal terhadap material bangunan. Hubungan antara distribusi temperatur, akumulasi panas, dan paparan termal menjadi dasar konseptual penelitian ini. Distribusi temperatur yang diprediksi menggunakan OpenFOAM dan CFAST digunakan untuk menggambarkan lingkungan termal kebakaran, sedangkan literatur mengenai beton dan kayu digunakan untuk menginterpretasikan potensi respons material terhadap kondisi termal yang terjadi. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif mengenai implikasi hasil simulasi kebakaran terhadap material bangunan tanpa harus memodelkan material secara eksplisit.



Gambar 2.1 Paparan Termal terhadap Material Bangunan

2.5 Material Beton pada Kondisi Kebakaran

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan pada bangunan modern karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi, durabilitas yang baik, serta ketahanan terhadap api yang relatif lebih baik dibandingkan banyak material konstruksi lainnya. Dalam rekayasa keselamatan kebakaran, beton dikategorikan sebagai material non-combustible sehingga tidak berkontribusi terhadap penambahan beban kebakaran (*fire load*) selama peristiwa kebakaran berlangsung. Meskipun demikian, paparan temperatur tinggi dalam jangka waktu tertentu tetap dapat menyebabkan perubahan sifat fisik, termal, dan mekanik beton yang berpotensi mempengaruhi kinerja struktur bangunan. Perilaku beton selama kebakaran tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur maksimum yang dicapai, tetapi juga oleh laju pemanasan, durasi paparan panas, kadar kelembaban material, jenis agregat, komposisi campuran beton, serta mekanisme perpindahan panas yang terjadi selama kebakaran. Oleh karena itu, pemahaman mengenai respons beton terhadap temperatur tinggi menjadi penting dalam mengevaluasi dampak kebakaran terhadap bangunan.

2.5.1 Karakteristik Beton pada Kondisi Kebakaran

Salah satu karakteristik utama beton pada kondisi kebakaran adalah kemampuannya memperlambat penetrasi panas menuju bagian dalam material. Kemampuan tersebut dipengaruhi oleh konduktivitas termal beton yang relatif rendah dibandingkan berbagai material konstruksi lainnya. Akibatnya, temperatur pada permukaan beton yang terpapar api dapat meningkat secara signifikan sementara temperatur pada bagian dalam elemen masih berada pada nilai yang lebih rendah. Laporan *Concrete and Fire Safety* menjelaskan bahwa beton memiliki kemampuan yang baik dalam menahan paparan api karena tidak menghasilkan asap, gas beracun, maupun partikel yang dapat mempercepat perkembangan kebakaran. Selain itu, beton mampu berfungsi sebagai penghalang panas (*fire barrier*) yang efektif sehingga sering digunakan sebagai elemen utama dalam sistem kompartemenisasi bangunan. Penelitian Malik, Bhattacharyya, dan Barai (2021) menunjukkan bahwa respons beton terhadap temperatur tinggi sangat dipengaruhi oleh sifat termalnya, seperti konduktivitas termal (*thermal conductivity*), kapasitas panas jenis (*specific heat*), difusivitas termal (*thermal diffusivity*), dan ekspansi termal (*thermal expansion*). Menurut Malik et al., perubahan sifat-sifat termal tersebut mengendalikan bagaimana energi panas ditransfer ke dalam material selama kebakaran. Dengan kata lain, sebelum terjadi kerusakan mekanik yang signifikan, beton terlebih dahulu mengalami perubahan karakteristik termal yang mempengaruhi distribusi temperatur di dalam material. Britez, Carvalho, dan Helene (2020) juga menjelaskan bahwa beton umumnya menunjukkan peningkatan temperatur internal yang lebih lambat dibandingkan temperatur gas kebakaran di sekitarnya. Fenomena ini menyebabkan terbentuknya gradien temperatur yang besar antara permukaan dan bagian dalam elemen beton. Gradien temperatur tersebut merupakan salah satu faktor yang berkontribusi terhadap perkembangan tegangan termal dan kerusakan material selama kebakaran.

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa beton tidak secara langsung mengikuti temperatur lingkungan kebakaran. Akan tetapi, temperatur lingkungan kebakaran tetap menjadi parameter utama yang menentukan besarnya energi panas yang ditransfer menuju beton. Oleh karena itu, distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari simulasi OpenFOAM dan CFAST memiliki relevansi langsung terhadap tingkat paparan termal yang berpotensi diterima material beton.

2.5.2 Mekanisme Degradasi Beton Akibat Temperatur Tinggi

Perubahan sifat beton akibat kebakaran merupakan proses yang berlangsung secara bertahap seiring meningkatnya temperatur dan durasi paparan panas. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa degradasi beton pada temperatur tinggi merupakan hasil interaksi kompleks antara perpindahan panas, perubahan mikrostruktur, dehidrasi produk hidrasi semen, ekspansi termal, dan perkembangan retak mikro. Pada tahap awal pemanasan, yaitu pada temperatur sekitar 100°C, air bebas yang terdapat di dalam pori-pori beton mulai menguap. Proses ini menyebabkan perubahan tekanan internal dan mempengaruhi struktur pori material. Meskipun perubahan mekanik yang terjadi masih relatif kecil, tahap ini menjadi awal dari perubahan sifat beton akibat temperatur tinggi. Seiring meningkatnya temperatur hingga sekitar 100–300°C, produk hidrasi semen mulai mengalami dehidrasi secara bertahap. Malik et al. (2021) menjelaskan bahwa peningkatan temperatur pada rentang ini menyebabkan perubahan mikrostruktur material dan perkembangan retak mikro yang berpotensi menurunkan sifat mekanik beton. Pada tahap ini, beton masih mampu mempertahankan sebagian besar kapasitas strukturalnya, namun tanda-tanda degradasi mulai berkembang. Ketika temperatur terus meningkat hingga mencapai sekitar 300–600°C, proses degradasi menjadi semakin signifikan. Dehidrasi produk hidrasi semen berlangsung lebih intensif, retak mikro berkembang lebih luas, dan perbedaan ekspansi termal antara pasta semen dan agregat menghasilkan tegangan internal yang lebih besar. Akibatnya, kuat tekan dan modulus elastisitas beton mulai mengalami penurunan yang nyata. Penelitian Krishna, Priyadarsini, dan Narayanan (2018) yang melakukan pengujian beton pada temperatur hingga 1000°C menunjukkan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan penurunan bertahap sifat mekanik beton. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kerusakan mikrostruktur yang berkembang akibat temperatur tinggi memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan beton dalam mempertahankan kekuatannya setelah kebakaran. Selain penurunan kekuatan mekanik, salah satu fenomena penting yang sering dikaitkan dengan kebakaran pada beton adalah *spalling*. Fenomena ini ditandai oleh terlepasnya lapisan permukaan beton akibat kombinasi tekanan uap air internal, gradien temperatur yang tinggi, serta tegangan termal yang berkembang selama pemanasan. Britez et al. (2020) menjelaskan bahwa *spalling* dapat mempercepat penetrasi panas menuju bagian dalam elemen struktur sehingga meningkatkan tingkat kerusakan material selama kebakaran.

Elsanadedy (2019) melalui analisis basis data ratusan hasil pengujian beton mutu tinggi (*High Strength Concrete*) menunjukkan bahwa temperatur merupakan faktor dominan yang mempengaruhi kekuatan sisa (*residual strength*) beton setelah kebakaran.

Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa respons beton terhadap temperatur tinggi dipengaruhi oleh mutu beton, karakteristik campuran, dan kondisi pemanasan yang diterapkan selama pengujian. Berdasarkan berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa degradasi beton selama kebakaran tidak terjadi secara tiba-tiba, tetapi berkembang secara progresif melalui perubahan mikrostruktur, dehidrasi produk hidrasi semen, perkembangan retak mikro, dan penurunan sifat mekanik yang semakin signifikan seiring meningkatnya temperatur.

2.5.3 Rentang Temperatur Kritis Beton

Berbagai penelitian eksperimental dan kajian literatur menunjukkan bahwa perubahan sifat beton akibat temperatur tinggi dapat dikaitkan dengan rentang temperatur tertentu. Meskipun tidak terdapat satu nilai temperatur tunggal yang dapat digunakan sebagai batas kerusakan beton, berbagai penelitian menunjukkan adanya tahapan degradasi yang relatif konsisten. Pada temperatur di bawah 100°C, perubahan utama yang terjadi adalah penguapan air bebas yang terdapat di dalam pori-pori beton. Pengaruh terhadap sifat mekanik masih relatif kecil, namun proses ini menjadi tahap awal perubahan kondisi material. Pada rentang temperatur sekitar 100–300°C mulai terjadi perubahan mikrostruktur dan dehidrasi sebagian produk hidrasi semen. Malik et al. (2021) menjelaskan bahwa perubahan sifat termal dan mikrostruktur material mulai berkembang pada rentang temperatur ini. Britez et al. (2020) melaporkan bahwa pada temperatur sekitar 300°C mulai teridentifikasi penurunan kuat tekan beton yang signifikan. Oleh karena itu, temperatur sekitar 300°C sering dianggap sebagai batas awal degradasi termal yang mulai memberikan pengaruh nyata terhadap sifat mekanik beton. Pada rentang temperatur sekitar 500–600°C, proses degradasi berkembang lebih lanjut akibat dehidrasi produk hidrasi semen yang lebih intensif, perkembangan retak mikro yang lebih luas, serta meningkatnya tegangan termal internal. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pada rentang ini penurunan kuat tekan dan modulus elastisitas menjadi semakin signifikan. Britez et al. (2020) menunjukkan bahwa pada temperatur sekitar 600°C beton dapat kehilangan sebagian besar kekuatannya. Temuan tersebut sejalan dengan hasil pengujian Krishna et al. (2018) maupun evaluasi Elsanadedy (2019) yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur menghasilkan penurunan kekuatan sisa beton secara progresif. Pada temperatur di atas 800°C, kerusakan mikrostruktur beton berkembang secara luas dan kemampuan material dalam mempertahankan kapasitas mekanik menurun secara drastis. Pada kondisi ini berbagai produk hidrasi semen telah mengalami degradasi yang signifikan sehingga risiko kerusakan permanen pada elemen beton menjadi sangat tinggi. Berdasarkan sintesis berbagai penelitian yang telah ditinjau, rentang temperatur kritis beton yang digunakan dalam penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

- <100°C : penguapan air bebas.
- 100–300°C : awal perubahan mikrostruktur dan dehidrasi produk hidrasi.
- ±300°C : awal degradasi termal yang mempengaruhi sifat mekanik beton.
- 500–600°C : degradasi mekanik berkembang secara signifikan.

- $\pm 600^{\circ}\text{C}$: kehilangan kapasitas mekanik yang besar.
- 800°C : kerusakan mikrostruktur berat dan penurunan kapasitas material yang sangat signifikan.

Rentang temperatur tersebut digunakan sebagai dasar interpretasi terhadap hasil simulasi distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari OpenFOAM dan CFAST.

2.5.4 Relevansi terhadap Penelitian

Penelitian ini tidak memodelkan perilaku beton secara eksplisit. OpenFOAM dan CFAST digunakan untuk memodelkan perkembangan temperatur dan akumulasi panas yang terjadi selama kebakaran methane pada ruang hampir tertutup. Oleh karena itu, temperatur yang diperoleh dari simulasi tidak dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai temperatur internal beton. Meskipun demikian, temperatur gas yang berkembang di dalam enclosure merupakan parameter utama yang menentukan tingkat paparan termal yang diterima material bangunan. Semakin tinggi temperatur gas dan semakin lama durasi paparan panas yang terjadi, maka semakin besar energi panas yang dapat ditransfer menuju material melalui mekanisme konveksi dan radiasi. Dalam konteks tersebut, distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari OpenFOAM dan CFAST dapat digunakan sebagai indikator tingkat keparahan lingkungan termal selama kebakaran. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan rentang temperatur kritis beton yang diperoleh dari berbagai penelitian terdahulu untuk mengevaluasi potensi dampak termal terhadap material. Sebagai contoh, apabila hasil simulasi menunjukkan temperatur enclosure telah mencapai atau melampaui 300°C , maka kondisi tersebut dapat diinterpretasikan sebagai lingkungan termal yang berpotensi memicu awal degradasi termal beton. Apabila temperatur yang terjadi mendekati atau melampaui $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$, maka kondisi tersebut dapat dikaitkan dengan potensi penurunan kapasitas mekanik yang lebih signifikan. Sementara itu, temperatur di atas 800°C dapat diinterpretasikan sebagai kondisi paparan termal berat yang berpotensi menyebabkan kerusakan material yang sangat serius. Dengan demikian, hasil simulasi OpenFOAM dan CFAST tidak hanya digunakan untuk menggambarkan karakteristik distribusi temperatur kebakaran, tetapi juga digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi tingkat paparan termal yang berpotensi diterima material beton selama kebakaran berlangsung. Pendekatan inilah yang menjadi jembatan ilmiah antara simulasi numerik kebakaran dan evaluasi rentang temperatur kritis material bangunan dalam penelitian ini.

2.6 Material Kayu pada Kondisi Kebakaran

Kayu merupakan material konstruksi yang telah digunakan secara luas dalam berbagai jenis bangunan karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang baik, kemudahan konstruksi, serta sifat keberlanjutan yang tinggi dibandingkan material konstruksi konvensional. Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan kayu rekayasa seperti glued laminated timber (glulam), laminated veneer lumber (LVL), dan cross laminated timber (CLT) semakin berkembang sehingga pemahaman mengenai perilaku kayu pada kondisi kebakaran menjadi semakin penting dalam rekayasa keselamatan kebakaran bangunan. Berbeda dengan beton yang tergolong material tidak mudah

terbakar (*non-combustible material*), kayu merupakan material organik yang dapat mengalami dekomposisi termal dan pembakaran ketika menerima paparan panas yang cukup. Akan tetapi, perilaku kayu selama kebakaran tidak bersifat acak dan relatif dapat diprediksi melalui pemahaman terhadap proses pemanasan, pyrolysis, pembentukan arang (*char formation*), dan pembakaran lanjutan. Menurut Bartlett et al., perilaku pembakaran kayu dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti densitas material, kadar air (*moisture content*), orientasi serat, ukuran elemen, ventilasi, dan tingkat paparan panas yang diterima selama kebakaran. Faktor-faktor tersebut menentukan laju peningkatan temperatur internal kayu serta mempengaruhi perkembangan pyrolysis dan pembentukan lapisan arang selama kebakaran. Mensah et al. (2022) menjelaskan bahwa perilaku kebakaran kayu merupakan hasil interaksi yang kompleks antara karakteristik material, mekanisme perpindahan panas, serta kondisi lingkungan kebakaran. Oleh karena itu, temperatur dan durasi paparan panas menjadi parameter utama yang menentukan respons kayu terhadap kebakaran.

2.6.1 Karakteristik Kayu pada Kondisi Kebakaran

Kayu tersusun atas tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Ketiga komponen tersebut memiliki karakteristik degradasi termal yang berbeda sehingga menghasilkan respons yang kompleks ketika kayu terpapar temperatur tinggi. Menurut Mensah et al. (2022), hemiselulosa merupakan komponen yang paling sensitif terhadap temperatur dan mulai mengalami degradasi pada temperatur yang relatif rendah. Selulosa memiliki kontribusi terbesar terhadap kekuatan mekanik kayu dan mengalami dekomposisi pada temperatur yang lebih tinggi. Sementara itu, lignin memiliki rentang degradasi yang lebih luas dan berperan penting dalam pembentukan residu karbon atau arang selama kebakaran. Wade et al. (2022) menjelaskan bahwa salah satu karakteristik penting kayu adalah konduktivitas termalnya yang relatif rendah. Akibatnya, panas tidak langsung menembus seluruh penampang material. Ketika permukaan kayu terpapar temperatur tinggi, bagian luar material mengalami pemanasan dan degradasi lebih dahulu, sedangkan bagian dalam masih dapat mempertahankan temperatur yang lebih rendah. Fenomena ini menyebabkan terbentuknya lapisan arang (*char layer*) pada permukaan kayu. Menurut Sulc et al. dan Yasir et al. (2025), lapisan arang memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah dibandingkan kayu asli sehingga berfungsi sebagai isolator alami yang memperlambat penetrasi panas menuju bagian dalam material. Oleh karena itu, meskipun kayu merupakan material yang dapat terbakar, laju kehilangan kapasitas strukturalnya sering kali dapat diprediksi melalui perkembangan lapisan arang tersebut. Selain itu, Bartlett et al. menunjukkan bahwa kadar air (*moisture content*) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perilaku kebakaran kayu. Kayu dengan kadar air yang lebih tinggi membutuhkan energi tambahan untuk proses evaporasi sehingga peningkatan temperatur internal material berlangsung lebih lambat dibandingkan kayu yang lebih kering. Dengan demikian, kadar air menjadi salah satu parameter penting yang mempengaruhi respons termal kayu selama kebakaran.

2.6.2 Mekanisme Degradasi Kayu Akibat Temperatur Tinggi

Perubahan sifat kayu selama kebakaran berlangsung secara bertahap dan sangat dipengaruhi oleh temperatur serta durasi paparan panas. Berdasarkan sintesis penelitian Bartlett et al., Mensah et al., Sulc et al., Wade et al., dan Yasir et al., degradasi kayu dapat dibagi menjadi beberapa tahapan utama. Tahap pertama terjadi pada temperatur mendekati 100°C ketika air bebas yang terdapat dalam pori-pori kayu mulai menguap.

Pada tahap ini sebagian besar energi panas digunakan untuk proses evaporasi sehingga perubahan struktur material masih relatif terbatas. Ketika temperatur meningkat hingga sekitar 150–200°C, hemiselulosa mulai mengalami degradasi awal. Mensah et al. menjelaskan bahwa tahap ini ditandai oleh perubahan warna material, penurunan sebagian sifat mekanik, dan awal perubahan struktur kimia kayu. Bartlett et al. menunjukkan bahwa meskipun kayu belum mengalami pembakaran pada rentang temperatur tersebut, penurunan kekuatan mekanik dapat mulai terjadi akibat perubahan struktur internal material. Temuan ini menunjukkan bahwa kerusakan termal tidak selalu identik dengan terjadinya nyala api. Pada temperatur sekitar 200–280°C, kayu memasuki tahap *slow pyrolysis*. Pada tahap ini mulai terbentuk produk volatil hasil dekomposisi termal meskipun laju pembentukannya masih relatif rendah. Ketika temperatur meningkat hingga sekitar 280–300°C, proses *pyrolysis* berkembang lebih cepat dan menghasilkan peningkatan jumlah gas mudah terbakar. Menurut Sulc et al. dan Yasir et al., temperatur sekitar 300°C sering digunakan sebagai batas praktis pembentukan lapisan arang (*char line*) dalam analisis rekayasa kebakaran kayu. Pada tahap ini permukaan kayu telah mengalami transformasi menjadi residu karbon yang memiliki sifat isolasi termal lebih baik dibandingkan kayu yang belum terbakar. Ketika temperatur terus meningkat hingga sekitar 300–500°C, kayu memasuki tahap *rapid pyrolysis*. Pada fase ini selulosa dan lignin mengalami degradasi yang lebih intensif sehingga menghasilkan berbagai gas mudah terbakar seperti karbon monoksida, metana, dan senyawa hidrokarbon volatil lainnya. Mensah et al. menyatakan bahwa tahap ini merupakan fase yang paling berpengaruh terhadap perkembangan pembakaran karena menghasilkan bahan bakar gas yang mendukung nyala api. Pada temperatur yang lebih tinggi, lapisan arang dapat mengalami oksidasi dan pembakaran lanjutan. Jika oksigen tersedia dalam jumlah yang cukup, proses tersebut dapat meningkatkan intensitas kebakaran dan memperbesar pelepasan panas di dalam enclosure.

2.6.3 Rentang Temperatur Kritis Kayu

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perilaku kayu selama kebakaran dapat dikaitkan dengan rentang temperatur tertentu yang merepresentasikan tahapan degradasi material. Pada temperatur di bawah 100°C, perubahan utama yang terjadi adalah evaporasi air bebas yang terdapat di dalam kayu. Tahap ini merupakan awal proses pemanasan material. Pada rentang temperatur sekitar 100–200°C, Bartlett et al. dan Wade et al. melaporkan bahwa sebagian sifat mekanik kayu mulai mengalami penurunan meskipun material belum mengalami pembakaran. Kondisi ini menunjukkan bahwa paparan termal dalam jangka waktu tertentu dapat mempengaruhi performa kayu bahkan sebelum proses *pyrolysis* berkembang secara signifikan. Mensah et al. menjelaskan bahwa degradasi awal hemiselulosa mulai berkembang pada temperatur sekitar 180–200°C. Selanjutnya pada rentang temperatur 200–280°C terjadi *slow pyrolysis* yang ditandai oleh pembentukan awal produk volatil hasil degradasi termal. Bartlett et al. menunjukkan bahwa onset *pyrolysis* umumnya terjadi pada rentang temperatur sekitar 225–300°C. Rentang temperatur tersebut menjadi batas penting karena menandai transisi dari pemanasan material menuju pembentukan bahan bakar gas hasil degradasi termal. Menurut Sulc et al. dan Yasir et al., temperatur sekitar 300°C dapat digunakan sebagai temperatur karakteristik pembentukan lapisan arang (*char line*). Pembentukan lapisan arang ini menjadi salah satu fenomena paling penting dalam perilaku kebakaran kayu karena berfungsi sebagai mekanisme perlindungan termal alami. Laporan Brandforsk (2023) menunjukkan bahwa temperatur sekitar 350°C berkaitan dengan kondisi *pilot ignition*, yaitu kondisi dimana gas hasil *pyrolysis* dapat menyala apabila terdapat sumber

penyalaan eksternal. Pada temperatur di atas 500°C, degradasi termal berkembang secara intensif dan menghasilkan peningkatan pelepasan gas mudah terbakar. Kondisi ini berkaitan dengan penurunan kapasitas mekanik yang semakin signifikan serta peningkatan potensi perkembangan kebakaran. Brandforsk juga melaporkan bahwa temperatur spontan penyalaan (*auto ignition temperature*) kayu berada pada kisaran sekitar 600°C. Pada kondisi tersebut kayu dapat mengalami penyalaan tanpa memerlukan sumber api eksternal apabila tersedia oksigen yang cukup. Berdasarkan sintesis berbagai penelitian yang telah ditinjau, rentang temperatur kritis kayu yang digunakan dalam penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

- <100°C : evaporasi air bebas.
- 100–200°C : awal penurunan sifat mekanik.
- 180–200°C : awal degradasi hemiselulosa.
- 200–280°C : slow pyrolysis.
- 225–300°C : onset pyrolysis.
- ±300°C : pembentukan lapisan arang (*char line*).
- ±350°C : pilot ignition.
- 500°C : degradasi termal berat.
- ±600°C : auto ignition.

Rentang temperatur tersebut digunakan sebagai dasar interpretasi terhadap hasil distribusi temperatur dan akumulasi panas yang diperoleh dari simulasi kebakaran pada penelitian ini.

2.6.4 Relevansi terhadap Penelitian

Penelitian ini tidak memodelkan perilaku termal kayu secara langsung. OpenFOAM dan CFAST digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur dan akumulasi panas yang berkembang selama kebakaran methane di dalam ruang hampir tertutup. Meskipun demikian, temperatur gas yang diperoleh dari simulasi merupakan indikator utama tingkat paparan termal yang berpotensi diterima material bangunan. Oleh karena itu, temperatur hasil simulasi dapat dibandingkan dengan rentang temperatur kritis kayu yang telah dilaporkan dalam berbagai penelitian terdahulu. Apabila hasil simulasi menunjukkan temperatur berada pada rentang 180–280°C, maka kondisi tersebut dapat diinterpretasikan sebagai lingkungan termal yang berpotensi memicu degradasi awal dan slow pyrolysis pada kayu. Temperatur sekitar 350°C menunjukkan lingkungan termal yang berpotensi mendukung terjadinya pilot ignition, sedangkan temperatur yang mendekati 600°C menunjukkan kondisi yang mendekati batas auto ignition kayu. Selain temperatur maksimum, durasi paparan panas juga perlu diperhatikan. Bartlett et al. menunjukkan bahwa paparan panas yang berlangsung dalam waktu lama dapat menyebabkan perubahan sifat material meskipun temperatur yang dicapai masih berada di bawah temperatur penyalaan. Temuan ini sangat relevan dengan konsep akumulasi panas yang dianalisis dalam penelitian ini. Dengan demikian, hasil simulasi OpenFOAM dan CFAST tidak hanya memberikan informasi mengenai distribusi temperatur dan akumulasi panas di dalam enclosure, tetapi juga memungkinkan evaluasi tingkat paparan termal yang berpotensi mempengaruhi kondisi material kayu selama kebakaran berlangsung. Pendekatan tersebut menjadi jembatan ilmiah yang menghubungkan simulasi numerik kebakaran dengan literatur mengenai temperatur kritis material bangunan, sehingga hasil simulasi dapat diinterpretasikan dalam konteks potensi degradasi material akibat kebakaran.

2.7 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, serta berbagai fenomena fisik lainnya melalui penyelesaian persamaan konservasi secara numerik menggunakan komputer. Dalam rekayasa keselamatan kebakaran, CFD telah berkembang menjadi salah satu pendekatan utama untuk mempelajari perkembangan kebakaran pada ruang hampir tertutup karena mampu memberikan informasi yang rinci mengenai distribusi temperatur, pergerakan asap, konsentrasi spesies hasil pembakaran, dan dinamika aliran gas panas selama kebakaran berlangsung. Menurut Parsa et al. (2025), kemampuan CFD dalam merepresentasikan fenomena fisik secara spasial dan temporal menjadikannya salah satu alat yang paling banyak digunakan dalam simulasi *compartment fire*. Berbeda dengan pendekatan eksperimental yang sering kali memiliki keterbatasan dalam pengukuran parameter di dalam ruang kebakaran, CFD mampu memberikan gambaran distribusi temperatur dan akumulasi panas pada seluruh domain simulasi. Oleh karena itu, CFD menjadi metode yang sangat relevan untuk penelitian ini yang berfokus pada analisis distribusi temperatur dan akumulasi panas pada ruang hampir tertutup. Secara matematis, seluruh persamaan yang digunakan dalam CFD dapat diturunkan dari bentuk umum persamaan transport. Persamaan ini menggambarkan perubahan suatu besaran akibat proses konveksi, difusi, dan sumber energi di dalam suatu volume kontrol. Bentuk umum persamaan transport dituliskan sebagai berikut:

Persamaan

$$\partial(\rho\phi)/\partial t + \nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S\phi$$

dimana ρ menyatakan densitas fluida, ϕ merupakan variabel yang ditransport, Γ merupakan koefisien difusi, sedangkan $S\phi$ merupakan sumber atau sink term. Persamaan ini menjadi dasar bagi seluruh persamaan konservasi yang digunakan dalam simulasi CFD. Prinsip pertama yang harus dipenuhi dalam simulasi CFD adalah konservasi massa. Hukum ini menyatakan bahwa massa tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan sehingga jumlah massa yang masuk dan keluar dari suatu volume kontrol harus tetap seimbang. Untuk fluida kompresibel, persamaan konservasi massa dapat dituliskan sebagai:

Persamaan

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung distribusi udara, asap, dan produk pembakaran yang berkembang selama kebakaran berlangsung. Dalam simulasi kebakaran ruang hampir tertutup, akurasi perhitungan massa sangat penting karena secara langsung mempengaruhi prediksi temperatur dan konsentrasi gas hasil pembakaran. Selain konservasi massa, CFD juga menyelesaikan persamaan konservasi momentum yang berasal dari hukum kedua Newton. Persamaan ini menjelaskan bagaimana gaya tekanan, gravitasi, dan viskositas mempengaruhi pergerakan fluida di dalam domain simulasi. Persamaan momentum atau persamaan Navier–Stokes dituliskan sebagai:

Persamaan

$$\rho[\partial u/\partial t + (u \cdot \nabla)u] = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g$$

dimana p merupakan tekanan, μ merupakan viskositas dinamik fluida, dan g merupakan percepatan gravitasi. Pada simulasi kebakaran, persamaan ini digunakan untuk memodelkan pembentukan *fire plume*, *ceiling jet*, serta pergerakan lapisan gas panas yang terakumulasi di bawah langit-langit ruang. Distribusi temperatur yang menjadi fokus utama penelitian ini diperoleh melalui penyelesaian persamaan konservasi energi. Persamaan ini menggambarkan keseimbangan energi yang terjadi akibat proses konduksi, konveksi, radiasi, dan sumber panas yang berasal dari pembakaran. Persamaan energi dituliskan sebagai:

Persamaan

$$\rho c_p [\partial T/\partial t + u \cdot \nabla T] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}$$

dimana c_p merupakan panas jenis fluida, k merupakan konduktivitas termal, T merupakan temperatur, dan \dot{Q} merupakan sumber panas akibat pembakaran. Persamaan ini merupakan persamaan yang paling penting dalam penelitian karena hasil distribusi temperatur yang diperoleh dari OpenFOAM berasal dari penyelesaian persamaan energi tersebut. Selain aliran fluida dan energi, simulasi kebakaran juga melibatkan perubahan komposisi kimia akibat proses pembakaran. Oleh karena itu diperlukan persamaan transport spesies untuk menghitung distribusi methane, oksigen, karbon dioksida, dan uap air selama simulasi berlangsung. Persamaan transport spesies dapat dituliskan sebagai:

Persamaan

$$\partial(\rho Y_i)/\partial t + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i$$

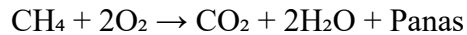
dimana Y_i merupakan fraksi massa spesies ke- i , J_i merupakan fluks difusi spesies, dan R_i merupakan laju pembentukan atau konsumsi spesies akibat reaksi kimia. Persamaan ini memungkinkan CFD memprediksi perubahan komposisi gas selama kebakaran berlangsung. Karena simulasi kebakaran melibatkan perubahan temperatur yang signifikan, hubungan antara tekanan, temperatur, dan densitas gas perlu dijelaskan melalui persamaan keadaan gas ideal. Persamaan ini dituliskan sebagai:

Persamaan

$$p = \rho R T$$

Persamaan gas ideal menjelaskan bahwa kenaikan temperatur akan menyebabkan perubahan densitas gas. Perubahan densitas tersebut menghasilkan gaya apung (*buoyancy*) yang menjadi mekanisme utama pembentukan plume panas selama kebakaran. Dalam penelitian ini, methane digunakan sebagai bahan bakar utama. Reaksi pembakaran methane secara stoikiometri dapat dituliskan sebagai:

Persamaan



Reaksi tersebut menghasilkan energi panas yang menjadi sumber utama perkembangan temperatur di dalam enclosure. Besarnya energi panas yang dilepaskan selama proses pembakaran umumnya dinyatakan menggunakan parameter *Heat Release Rate* (HRR) yang dirumuskan sebagai:

Persamaan

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_c$$

dimana \dot{m} merupakan laju pembakaran bahan bakar dan ΔH_c merupakan kalor pembakaran methane. Nilai HRR merupakan parameter yang sangat penting karena secara langsung menentukan intensitas kebakaran dan perkembangan temperatur di dalam ruangan. Kenaikan temperatur akibat pelepasan panas menyebabkan penurunan densitas gas sehingga menghasilkan gaya buoyancy. Hubungan tersebut dapat dituliskan menggunakan pendekatan Boussinesq sebagai berikut:

Persamaan

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$$

Fenomena ini menjelaskan mengapa gas panas bergerak ke atas dan membentuk plume selama kebakaran berlangsung. Selanjutnya, perpindahan panas pada kebakaran terjadi melalui tiga mekanisme utama yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan panas secara konduksi mengikuti Hukum Fourier:

Persamaan

$$q_{\text{cond}} = -k(dT/dx)$$

Sedangkan perpindahan panas secara konveksi mengikuti Hukum Pendinginan Newton:

Persamaan

$$q_{\text{conv}} = h(T_s - T_f)$$

Untuk perpindahan panas melalui radiasi digunakan Persamaan Stefan–Boltzmann:

Persamaan

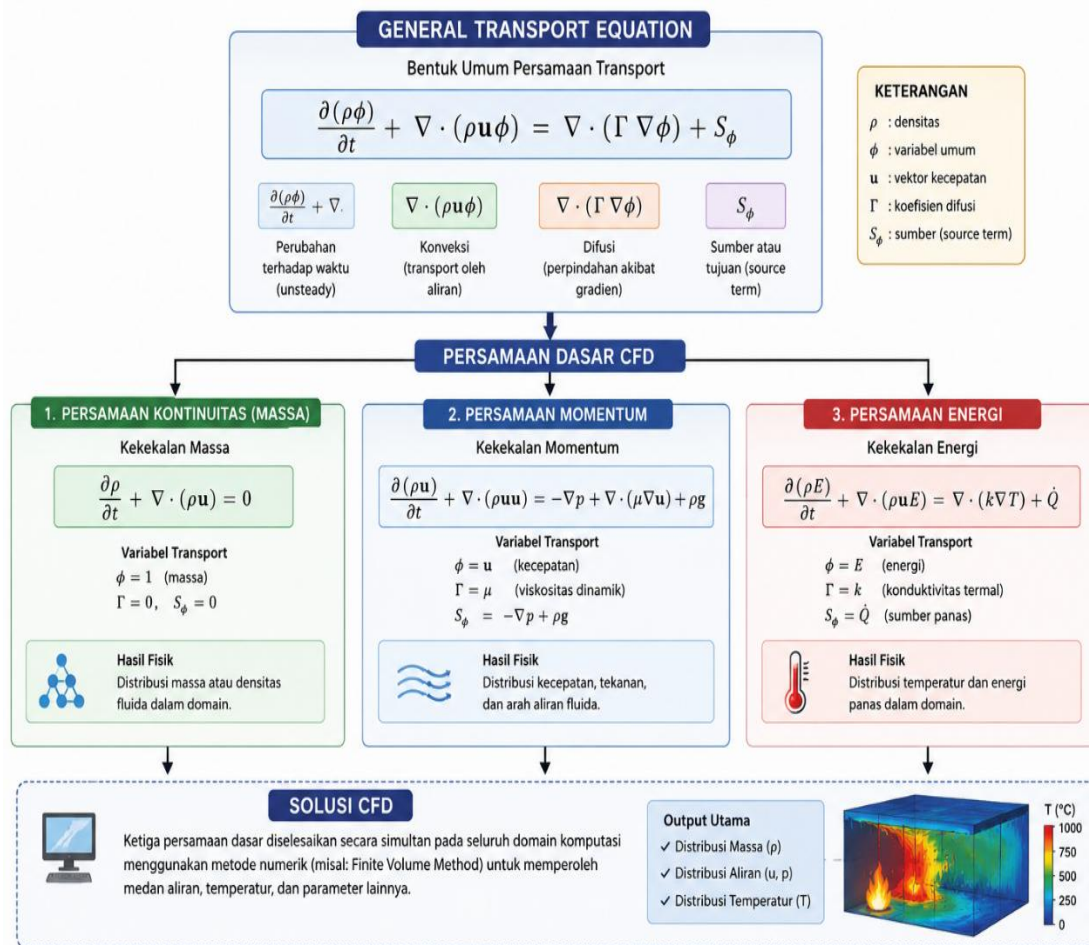
$$q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{sur}}^4)$$

Ketiga mekanisme perpindahan panas tersebut bekerja secara simultan selama kebakaran dan menentukan perkembangan temperatur yang terjadi di dalam enclosure. Karena tujuan penelitian ini adalah menganalisis distribusi temperatur dan akumulasi panas, maka energi termal yang tersimpan di dalam sistem dapat dijelaskan menggunakan persamaan akumulasi panas sebagai berikut:

Persamaan

$$Q = mc_p(T_2 - T_1)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur akan menyebabkan peningkatan energi termal yang terakumulasi di dalam enclosure. Oleh karena itu, distribusi temperatur yang diperoleh dari simulasi OpenFOAM tidak hanya menggambarkan kondisi termal ruang secara sesaat, tetapi juga dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat akumulasi panas yang terjadi selama kebakaran berlangsung. Berdasarkan uraian tersebut, CFD tidak hanya berfungsi sebagai alat numerik untuk memprediksi pergerakan fluida, tetapi juga sebagai sarana untuk memahami perkembangan temperatur, perpindahan panas, dan akumulasi energi selama kebakaran ruang hampir tertutup. Kemampuan tersebut menjadikan CFD sebagai pendekatan yang sangat sesuai untuk mencapai tujuan penelitian ini, yaitu menganalisis distribusi temperatur dan akumulasi panas kebakaran methane di dalam enclosure.



Gambar 2.2 Hubungan Transport Equation dengan CFD

2.8 OpenFOAM sebagai Platform Computational Fluid Dynamics (CFD)

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) merupakan perangkat lunak Computational Fluid Dynamics (CFD) berbasis open-source yang dikembangkan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan mekanika fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, serta fenomena multiphysics menggunakan metode Finite Volume Method (FVM). OpenFOAM ditulis menggunakan bahasa pemrograman C++ dengan struktur yang memungkinkan pengguna melakukan modifikasi model fisik maupun numerik sesuai

kebutuhan penelitian. Berbeda dengan perangkat lunak CFD komersial yang bersifat tertutup, OpenFOAM memberikan akses penuh terhadap source code sehingga banyak digunakan dalam penelitian akademik dan pengembangan model numerik. Kemampuan ini menjadikan OpenFOAM sebagai salah satu platform CFD yang paling banyak digunakan dalam simulasi aliran fluida kompleks, termasuk simulasi kebakaran, ventilasi bangunan, perpindahan panas, serta proses pembakaran. Dalam OpenFOAM, domain komputasi dibagi menjadi sejumlah volume kontrol (control volume) yang membentuk mesh komputasi. Persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan spesies kimia kemudian didiskretisasi menggunakan metode volume hingga sehingga hukum konservasi tetap terpenuhi pada setiap sel komputasi. Pendekatan ini sangat sesuai untuk simulasi fenomena kebakaran karena mampu menangani gradien temperatur yang tinggi, aliran turbulen, serta proses transport spesies yang terjadi secara simultan. Keunggulan lain dari OpenFOAM adalah kemampuannya menggunakan mesh terstruktur maupun tidak terstruktur. Fleksibilitas ini memungkinkan pemodelan geometri bangunan yang kompleks dengan tingkat detail yang lebih tinggi dibandingkan beberapa perangkat lunak simulasi kebakaran konvensional.

2.8.1 Validasi Dan Kemampuan FireFOAM dalam Simulasi Kebakaran

FireFOAM merupakan solver khusus kebakaran yang dikembangkan berdasarkan platform OpenFOAM oleh FM Global. Solver ini dirancang untuk mensimulasikan berbagai fenomena yang berkaitan dengan dinamika kebakaran seperti pembakaran, penyebaran asap, perpindahan panas secara konveksi, konduksi dan radiasi, transport spesies hasil pembakaran, serta interaksi antara api dan struktur bangunan. Pengembangan FireFOAM dilatarbelakangi oleh kebutuhan simulasi kebakaran yang lebih fleksibel terhadap geometri kompleks dan fenomena fisik yang tidak dapat direpresentasikan secara optimal oleh perangkat lunak simulasi kebakaran lainnya. FireFOAM memanfaatkan seluruh kemampuan OpenFOAM dalam pemrosesan mesh dan penyelesaian persamaan numerik, kemudian menambahkan model-model fisik yang secara khusus dikembangkan untuk simulasi kebakaran. Beberapa penelitian validasi menunjukkan bahwa FireFOAM mampu memberikan prediksi temperatur, konsentrasi spesies gas, pola aliran asap, dan distribusi panas yang memiliki kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen kebakaran ruang (compartment fire). Oleh karena itu FireFOAM saat ini banyak digunakan dalam penelitian kebakaran bangunan, kebakaran industri, simulasi sprinkler, fire whirl, compartment fire, hingga analisis struktur yang terpapar api. Sebelum digunakan sebagai alat penelitian, kemampuan FireFOAM telah dievaluasi melalui berbagai studi validasi terhadap data eksperimen kebakaran. Validasi tersebut mencakup simulasi pool fire, compartment fire, plume fire, serta berbagai kasus perpindahan panas dan transport spesies yang umum dijumpai pada kebakaran bangunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FireFOAM mampu mereproduksi distribusi temperatur, perkembangan plume panas, konsentrasi spesies hasil pembakaran, dan pola aliran gas panas dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen. Hal ini menjadikan FireFOAM sebagai salah satu solver CFD yang banyak digunakan dalam

penelitian keselamatan kebakaran dan analisis perilaku api pada ruang tertutup. Wang et al. menunjukkan bahwa FireFOAM mampu memprediksi distribusi temperatur dan karakteristik plume api pada berbagai konfigurasi kebakaran dengan tingkat akurasi yang memadai. Studi tersebut menunjukkan bahwa penyelesaian persamaan massa, momentum, energi, dan spesies secara simultan memungkinkan FireFOAM merepresentasikan interaksi kompleks antara pembakaran, turbulensi, dan perpindahan panas yang terjadi selama kebakaran berlangsung.

Parsa et al. (2025) menjelaskan bahwa pendekatan CFD berbasis LES memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menangkap dinamika plume panas, stratifikasi termal, dan distribusi temperatur dibandingkan pendekatan yang hanya menggunakan parameter rata-rata aliran. Kemampuan ini menjadi sangat penting pada simulasi compartment fire karena distribusi temperatur di dalam enclosure sangat dipengaruhi oleh perkembangan plume panas dan pembentukan lapisan gas panas di bawah langit-langit ruangan. Sementara itu, Tang (2023) menunjukkan bahwa distribusi temperatur merupakan salah satu parameter utama dalam analisis kebakaran karena berkaitan langsung dengan perpindahan panas, perkembangan lapisan gas panas, serta tingkat paparan termal yang diterima oleh material bangunan. Oleh karena itu, akurasi prediksi temperatur menjadi salah satu indikator utama dalam mengevaluasi performa model CFD yang digunakan pada simulasi kebakaran. Berdasarkan berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa FireFOAM memiliki kemampuan yang memadai untuk memprediksi distribusi temperatur, perkembangan plume panas, dan akumulasi energi termal pada compartment fire. Oleh karena itu FireFOAM dipilih sebagai alat simulasi utama dalam penelitian ini yang berfokus pada analisis distribusi temperatur dan akumulasi panas akibat pembakaran methane di dalam enclosure.

2.8.2 Pendekatan Large Eddy Simulation (LES)

Fenomena kebakaran merupakan fenomena yang sangat dipengaruhi oleh turbulensi. Pergerakan api, plume panas, pencampuran bahan bakar dan oksidator, serta penyebaran asap dipengaruhi oleh struktur turbulen yang terjadi di dalam ruang. Untuk memodelkan fenomena tersebut, FireFOAM menggunakan pendekatan Large Eddy Simulation (LES). Pada pendekatan LES, struktur turbulensi berukuran besar dihitung secara langsung oleh solver sedangkan turbulensi berukuran kecil dimodelkan menggunakan Sub-Grid Scale (SGS) model. Pendekatan LES dipilih karena mampu memberikan representasi yang lebih realistis terhadap perilaku api dibandingkan pendekatan Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Dalam simulasi kebakaran ruang, LES mampu menangkap fenomena puffing flame, pergerakan plume panas, pencampuran gas hasil pembakaran, serta perkembangan lapisan asap panas di bawah langit-langit ruangan. Penggunaan LES menjadi salah satu alasan utama FireFOAM banyak digunakan dalam penelitian kebakaran karena pendekatan ini mampu menghasilkan distribusi temperatur dan aliran fluida yang lebih mendekati kondisi aktual.

2.8.3 Persamaan Dasar yang Diselesaikan FireFOAM

FireFOAM menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan transport spesies secara simultan. Persamaan konservasi massa digunakan untuk menjamin keseimbangan massa fluida dalam domain komputasi. Persamaan momentum digunakan untuk menghitung distribusi kecepatan dan tekanan akibat gaya gravitasi, gaya apung, serta efek turbulensi. Selain itu FireFOAM juga menyelesaikan persamaan energi yang digunakan untuk menghitung perkembangan temperatur akibat proses pembakaran dan perpindahan panas. Persamaan transport spesies digunakan untuk menghitung perubahan konsentrasi gas-gas yang terlibat dalam proses pembakaran seperti oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), uap air (H_2O), serta bahan bakar yang belum terbakar. Hubungan antara tekanan, temperatur dan densitas gas dihitung menggunakan persamaan gas ideal sehingga perubahan sifat termodinamika akibat pembakaran dapat direpresentasikan secara realistis selama simulasi berlangsung.

Distribusi Temperatur

FireFOAM menghitung distribusi temperatur melalui penyelesaian persamaan energi yang mempertimbangkan perpindahan panas akibat konveksi, konduksi, radiasi, serta sumber panas hasil pembakaran methane. Persamaan energi yang digunakan dapat dituliskan sebagai:

$$\rho C_p (\partial T / \partial t + \mathbf{U} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{S}_h$$

dimana:

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

C_p = panas jenis ($J/kg.K$)

T = temperatur (K)

\mathbf{U} = vektor kecepatan (m/s)

k = konduktivitas termal ($W/m.K$)

\dot{S}_h = sumber energi akibat pembakaran (W/m^3)

Persamaan tersebut memungkinkan FireFOAM menghitung perubahan temperatur pada setiap sel komputasi selama proses pembakaran berlangsung.

Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi mengikuti Hukum Fourier:

$$q_{cond} = -k(dT/dx)$$

dimana:

q_{cond} = fluks panas konduksi (W/m^2)

k = konduktivitas termal

dT/dx = gradien temperatur

Mekanisme ini penting untuk menghitung perpindahan panas melalui dinding enclosure.

Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas akibat pergerakan gas panas dihitung melalui mekanisme konveksi:

$$q_{conv} = h(T_s - T_f)$$

dimana:

h = koefisien perpindahan panas konveksi

T_s = temperatur permukaan

T_f = temperatur fluida

Pada kebakaran ruang tertutup, konveksi menjadi mekanisme dominan dalam distribusi panas dari api menuju lapisan gas panas di bawah langit-langit.

Perpindahan Panas Radiasi

Selain konduksi dan konveksi, kebakaran menghasilkan radiasi termal yang signifikan. FireFOAM menggunakan model radiasi untuk menghitung transfer energi radiasi antara nyala api, gas panas, dan permukaan enclosure. Besarnya perpindahan panas radiasi dapat dinyatakan dengan Persamaan Stefan-Boltzmann:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

dimana:

ε = emisivitas

σ = konstanta Stefan-Boltzmann

T_s = temperatur permukaan

T_{sur} = temperatur lingkungan

Pada temperatur tinggi, kontribusi radiasi dapat menjadi sangat signifikan terhadap akumulasi panas di dalam enclosure.

Heat Release Rate (HRR)

Energi panas yang menjadi sumber utama kenaikan temperatur berasal dari pembakaran methane. Besarnya energi yang dilepaskan dinyatakan sebagai Heat Release Rate (HRR):

$$\dot{Q} = \dot{m}f \Delta H_c$$

dimana:

\dot{Q} = Heat Release Rate (W)

$\dot{m}f$ = laju pembakaran methane (kg/s)

ΔH_c = kalor pembakaran methane (J/kg)

HRR merupakan parameter yang sangat penting karena secara langsung mengontrol perkembangan temperatur selama kebakaran berlangsung.

Reaksi Pembakaran Methane

Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah methane. Reaksi pembakaran stoikiometri methane dapat dituliskan sebagai:



Reaksi tersebut menghasilkan energi panas yang kemudian ditransfer ke lingkungan melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.8.4 Pemodelan Pembakaran pada FireFOAM

FireFOAM menyediakan beberapa model pembakaran yang dapat digunakan sesuai karakteristik api yang disimulasikan. Pada kebakaran ruang yang didominasi oleh pencampuran turbulen antara bahan bakar dan udara, laju pembakaran umumnya

dikendalikan oleh proses pencampuran turbulen dibandingkan kinetika reaksi kimia. Untuk kondisi tersebut FireFOAM menggunakan pendekatan Eddy Dissipation Model (EDM) atau Eddy Dissipation Concept (EDC) yang menghubungkan laju reaksi pembakaran dengan karakteristik turbulensi aliran. Model ini banyak digunakan pada simulasi kebakaran karena mampu menghasilkan prediksi yang baik dengan kebutuhan komputasi yang masih dapat diterima.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa FireFOAM mampu mensimulasikan kebakaran pool fire maupun compartment fire dengan tingkat akurasi yang baik terhadap temperatur ruang, distribusi spesies hasil pembakaran, serta perkembangan nyala api.

2.8.5 Relevansi FireFOAM terhadap Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi temperatur dan akumulasi panas yang terjadi selama kebakaran methane pada enclosure berukuran $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD). Untuk mencapai tujuan tersebut digunakan solver FireFOAM yang dikembangkan berdasarkan platform OpenFOAM karena mampu memodelkan secara simultan interaksi antara pembakaran, turbulensi, perpindahan panas, dan transport spesies yang merupakan fenomena utama dalam kebakaran ruang tertutup maupun quasi-closed compartment. Berdasarkan konfigurasi simulasi yang digunakan, methane (CH_4) dipilih sebagai bahan bakar utama. Pemilihan methane didasarkan pada karakteristiknya yang merupakan salah satu gas hidrokarbon sederhana yang banyak digunakan dalam penelitian kebakaran sebagai bahan bakar referensi karena memiliki mekanisme pembakaran yang telah dipahami dengan baik dan data termokimianya tersedia secara luas. Dalam FireFOAM, proses pembakaran methane direpresentasikan melalui reaksi oksidasi yang menghasilkan karbon dioksida, uap air, dan energi panas sebagai berikut:



Energi panas yang dihasilkan dari reaksi tersebut menjadi sumber utama peningkatan temperatur di dalam enclosure dan berperan langsung terhadap pembentukan plume panas, lapisan gas panas (upper hot layer), serta akumulasi panas selama simulasi berlangsung. Dalam konfigurasi termofisika yang digunakan pada penelitian ini, sifat gas dimodelkan menggunakan pendekatan perfect gas (ideal gas). Pendekatan ini mengasumsikan bahwa hubungan antara tekanan, densitas, dan temperatur mengikuti persamaan gas ideal:

$$p = \rho RT$$

dimana p adalah tekanan, ρ adalah densitas, R adalah konstanta gas spesifik, dan T adalah temperatur absolut. Menurut studi validasi FireFOAM yang dilakukan oleh Wang et al. serta penelitian Parsa et al. (2025), penggunaan persamaan gas ideal memberikan representasi yang baik terhadap perilaku gas panas pada simulasi compartment fire karena mampu menangkap perubahan densitas akibat kenaikan temperatur yang menjadi penyebab utama terjadinya gaya apung (buoyancy). Gaya apung tersebut merupakan mekanisme fisik utama yang mendorong pembentukan fire plume dan pergerakan gas

panas menuju bagian atas enclosure. Perhitungan energi pada simulasi dilakukan menggunakan formulasi sensible enthalpy. Dalam pendekatan ini, energi termal yang dihitung merupakan energi yang terkait dengan perubahan temperatur fluida tanpa memperhitungkan energi referensi pembentukan kimia. Persamaan entalpi sensibel secara umum dapat dituliskan sebagai:

$$h = \int C_p dT$$

dimana h adalah sensible enthalpy dan C_p adalah kapasitas panas pada tekanan konstan. Pendekatan sensible enthalpy banyak digunakan pada simulasi kebakaran karena memungkinkan prediksi distribusi temperatur secara langsung dan stabil secara numerik. Penelitian FireFOAM menunjukkan bahwa formulasi ini mampu memberikan hasil temperatur yang baik untuk simulasi compartment fire dan pool fire. Untuk memodelkan laju pembakaran methane, penelitian ini menggunakan Eddy Dissipation Model (EDM). Model ini dikembangkan berdasarkan konsep bahwa pada kebakaran turbulen laju reaksi kimia umumnya lebih cepat dibandingkan proses pencampuran antara bahan bakar dan oksidator. Oleh karena itu, laju pembakaran lebih banyak dikendalikan oleh tingkat turbulensi aliran dibandingkan kinetika reaksi kimia itu sendiri. Menurut penelitian validasi FireFOAM, EDM memberikan prediksi yang baik terhadap distribusi temperatur dan perkembangan nyala api pada kasus compartment fire serta memiliki kebutuhan komputasi yang relatif lebih rendah dibandingkan model reaksi kimia yang lebih dari struktur turbulensi berukuran besar yang mengandung sebagian besar energi aliran, sedangkan turbulensi berukuran kecil dimodelkan menggunakan Sub-Grid Scale (SGS) model. Menurut Parsa et al. (2025), LES sangat sesuai digunakan pada simulasi kebakaran karena mampu merepresentasikan dinamika plume panas, pencampuran gas hasil pembakaran, serta pembentukan lapisan gas panas dengan lebih baik dibandingkan pendekatan Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Oleh karena itu LES dipilih dalam penelitian ini untuk meningkatkan akurasi prediksi distribusi temperatur dan perkembangan aliran gas panas di dalam enclosure.

Output utama yang dianalisis dari simulasi FireFOAM adalah distribusi temperatur dan akumulasi panas. Distribusi temperatur digunakan untuk menggambarkan perkembangan kondisi termal pada berbagai lokasi di dalam enclosure, sedangkan akumulasi panas digunakan untuk mengevaluasi peningkatan energi termal yang tersimpan selama kebakaran berlangsung. Kedua parameter tersebut merupakan indikator utama yang digunakan untuk memahami karakteristik kebakaran pada ruang quasi-closed yang menjadi objek penelitian ini. Hasil distribusi temperatur yang diperoleh dari FireFOAM selanjutnya tidak digunakan untuk mengevaluasi kerusakan struktur secara langsung. Sebaliknya, temperatur yang diperoleh dibandingkan dengan rentang temperatur kritis material yang telah dibahas pada Subbab 2.5 dan 2.6. Untuk beton, berbagai penelitian menunjukkan bahwa degradasi sifat mekanik mulai terjadi pada temperatur sekitar 300°C dan menjadi signifikan pada rentang 550–650°C. Sementara itu pada kayu, proses pirolisis aktif umumnya terjadi pada rentang 250–350°C dan perkembangan pembakaran menjadi dominan pada temperatur yang lebih tinggi. Oleh karena itu, distribusi temperatur hasil simulasi dapat digunakan sebagai indikator tingkat

paparan termal yang berpotensi diterima oleh material bangunan tanpa harus memodelkan material tersebut secara langsung dalam domain CFD. Dengan demikian, penggunaan FireFOAM dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai alat simulasi numerik untuk memprediksi temperatur, tetapi juga sebagai sarana untuk menghubungkan karakteristik kebakaran methane, perkembangan distribusi temperatur, akumulasi panas, dan potensi paparan termal terhadap beton maupun kayu yang menjadi fokus utama penelitian.

Pada penelitian ini konfigurasi simulasi menggunakan methane (CH_4) sebagai bahan bakar utama dengan pendekatan thermophysical model berbasis perfectGas sehingga perubahan temperatur dan densitas gas dapat dihitung secara simultan selama proses pembakaran berlangsung. Perhitungan energi dilakukan menggunakan formulasi sensible enthalpy yang memungkinkan prediksi distribusi temperatur secara langsung pada setiap sel komputasi. Untuk memodelkan proses pembakaran digunakan Eddy Dissipation Model (EDM) yang mengasumsikan bahwa laju pembakaran terutama dikendalikan oleh pencampuran turbulen antara bahan bakar dan oksidator. Selain itu, turbulensi dimodelkan menggunakan pendekatan Large Eddy Simulation (LES) sehingga perkembangan plume panas dan distribusi temperatur dapat direpresentasikan dengan lebih baik dibandingkan pendekatan rata-rata aliran. Output utama yang dianalisis dalam penelitian ini adalah distribusi temperatur dan akumulasi panas di dalam enclosure. Distribusi temperatur digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kondisi termal pada berbagai lokasi selama kebakaran berlangsung, sedangkan akumulasi panas digunakan untuk menggambarkan peningkatan energi termal yang tersimpan di dalam ruang. Hasil temperatur yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan rentang temperatur kritis beton dan kayu yang telah dibahas pada Subbab 2.5 dan 2.6.

Distribusi temperatur, akumulasi panas, dan potensi paparan termal terhadap material bangunan yang menjadi fokus utama penelitian ini. Berbagai penelitian validasi menunjukkan bahwa FireFOAM mampu memprediksi temperatur, konsentrasi spesies, perkembangan plume panas, serta distribusi aliran pada compartment fire dengan kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen. Wang et al. menunjukkan bahwa FireFOAM mampu mereproduksi distribusi temperatur dan karakteristik plume api pada berbagai konfigurasi kebakaran. Parsa et al. (2025) menjelaskan bahwa pendekatan LES yang digunakan FireFOAM memberikan representasi yang lebih baik terhadap perkembangan plume panas dan stratifikasi termal dibandingkan pendekatan berbasis nilai rata-rata aliran. Sementara itu, Tang (2023) menegaskan bahwa distribusi temperatur merupakan parameter utama dalam analisis kebakaran karena berkaitan langsung dengan perpindahan panas dan paparan termal terhadap material bangunan. Berdasarkan berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa FireFOAM memiliki kemampuan yang memadai untuk memprediksi distribusi temperatur dan akumulasi panas pada compartment fire sehingga dipilih sebagai alat simulasi utama dalam penelitian ini.

2.9 Zone Model dan CFAST

Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST) merupakan perangkat lunak simulasi kebakaran yang dikembangkan oleh National Institute of Standards and

Technology (NIST) untuk memprediksi perkembangan temperatur, penyebaran asap, dan perpindahan panas pada bangunan yang mengalami kebakaran. Berbeda dengan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) yang menyelesaikan medan aliran secara tiga dimensi, CFAST menggunakan pendekatan zone model yang membagi setiap kompartemen menjadi dua lapisan gas, yaitu lapisan atas yang panas (upper hot layer) dan lapisan bawah yang relatif lebih dingin (lower layer). Pendekatan ini memungkinkan prediksi kondisi termal dilakukan secara efisien dengan kebutuhan komputasi yang jauh lebih rendah dibandingkan simulasi CFD penuh. Menurut Peacock et al. (2026), CFAST dikembangkan berdasarkan prinsip konservasi massa dan konservasi energi untuk menghitung perubahan temperatur, massa gas, tinggi lapisan asap, serta perpindahan panas yang terjadi selama kebakaran berlangsung. Karena fokus utama model ini adalah perkembangan kondisi termal kompartemen, CFAST telah banyak digunakan dalam analisis compartment fire, evaluasi keselamatan kebakaran, dan studi prediksi temperatur pada bangunan.

2.9.1 Konsep Two-Zone Model

Dasar pemodelan CFAST adalah asumsi bahwa kondisi termal dalam suatu kompartemen dapat direpresentasikan oleh dua zona gas yang memiliki karakteristik berbeda. Zona pertama adalah upper hot layer yang terdiri dari asap dan gas hasil pembakaran dengan temperatur tinggi, sedangkan zona kedua adalah lower layer yang terdiri dari udara dengan temperatur lebih rendah. Kedua lapisan tersebut dipisahkan oleh bidang antarmuka yang berubah terhadap waktu sesuai perkembangan kebakaran. Ketika kebakaran terjadi, energi panas yang dilepaskan oleh sumber api menghasilkan plume panas yang bergerak ke atas akibat gaya apung (buoyancy). Setelah mencapai langit-langit, gas panas menyebar secara horizontal dan membentuk lapisan gas panas di bagian atas ruangan. Seiring meningkatnya energi yang terakumulasi di dalam kompartemen, temperatur lapisan atas meningkat dan batas lapisan asap bergerak turun menuju lantai. Fenomena inilah yang menjadi dasar perhitungan temperatur dan akumulasi panas dalam CFAST (Peacock et al., 2026). Dalam kebakaran ruang tertutup atau quasi-closed compartment, sebagian besar energi termal tersimpan pada upper hot layer. Oleh karena itu temperatur lapisan atas sering digunakan sebagai indikator utama tingkat keparahan kebakaran dan potensi paparan termal terhadap elemen bangunan.

2.9.2 Prediksi Temperatur dan Akumulasi Panas

Salah satu keluaran utama CFAST adalah temperatur upper hot layer dan lower layer sebagai fungsi waktu. Temperatur tersebut dihitung melalui penerapan neraca massa dan neraca energi pada masing-masing lapisan gas. Secara umum, perubahan energi termal pada suatu lapisan dapat dinyatakan sebagai:

$$dE/dt = \dot{Q}_{\text{fire}} + \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}} - \dot{Q}_{\text{loss}}$$

dimana:

E = energi termal lapisan gas (J)

\dot{Q}_{fire} = energi yang dilepaskan oleh kebakaran (W)

\dot{Q}_{in} = energi yang masuk ke lapisan (W)

\dot{Q}_{out} = energi yang keluar dari lapisan (W)

\dot{Q}_{loss} = kehilangan panas ke permukaan bangunan (W)

Melalui persamaan tersebut, CFAST menghitung peningkatan energi termal akibat pembakaran dan perubahan temperatur yang terjadi pada setiap lapisan. Peacock et al. (2026) menjelaskan bahwa temperatur upper hot layer merupakan salah satu parameter yang paling penting karena secara langsung merepresentasikan akumulasi panas yang terjadi selama kebakaran berlangsung. Hasil validasi CFAST menunjukkan bahwa model ini mampu memprediksi perkembangan temperatur lapisan panas dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap berbagai eksperimen compartment fire. Studi validasi terbaru tahun 2024 yang membandingkan hasil CFAST dengan FDS dan data eksperimen juga menunjukkan bahwa CFAST mampu mereproduksi tren kenaikan temperatur dan perkembangan lapisan panas secara memadai untuk kebutuhan analisis rekayasa kebakaran. Dalam penelitian ini, temperatur yang diperoleh dari CFAST digunakan sebagai indikator tingkat akumulasi panas dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil simulasi FireFOAM.

2.9.3 Perpindahan Panas pada CFAST

Perubahan temperatur yang dihitung oleh CFAST dipengaruhi oleh proses perpindahan panas antara gas panas, permukaan bangunan, dan lingkungan sekitar. Model ini mempertimbangkan mekanisme perpindahan panas secara konveksi dan radiasi. Perpindahan panas konveksi secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$q = hA(T_g - T_s)$$

sedangkan perpindahan panas radiasi dapat dinyatakan sebagai:

$$q = \epsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

Perpindahan panas konveksi terjadi akibat kontak antara gas panas dan permukaan bangunan, sedangkan perpindahan panas radiasi terjadi melalui pancaran energi termal dari nyala api dan lapisan gas panas menuju dinding, lantai, dan langit-langit. Menurut Peacock et al. (2026), kedua mekanisme tersebut berpengaruh langsung terhadap perkembangan temperatur lapisan gas serta besarnya energi yang dapat terakumulasi di dalam kompartemen. Oleh karena itu, perpindahan panas menjadi salah satu komponen utama dalam prediksi kondisi termal menggunakan CFAST.

2.9.4 Hubungan CFAST dan Simulasi CFD

CFAST dan CFD memiliki tujuan yang sama yaitu memprediksi perkembangan kebakaran dan kondisi termal pada bangunan, namun menggunakan pendekatan matematis yang berbeda. CFAST menggunakan pendekatan two-zone model sehingga menghasilkan temperatur rata-rata lapisan atas dan lapisan bawah. Sebaliknya, CFD menyelesaikan distribusi massa, momentum, energi, dan spesies secara tiga dimensi sehingga mampu menghasilkan distribusi temperatur secara spasial pada seluruh domain

simulasi. Jang dan Hwang (2023) menjelaskan bahwa model CFD seperti FDS mampu memberikan informasi yang lebih rinci mengenai distribusi temperatur dan perkembangan plume panas, sedangkan CFAST memiliki keunggulan berupa waktu komputasi yang jauh lebih singkat. Oleh karena itu kedua pendekatan sering digunakan secara komplementer dalam penelitian kebakaran. Dalam penelitian ini, FireFOAM digunakan untuk memperoleh distribusi temperatur tiga dimensi dan pola akumulasi panas secara spasial pada kompartemen yang mengalami kebakaran methane. Sementara itu, CFAST digunakan untuk memprediksi perkembangan temperatur rata-rata lapisan gas panas dan akumulasi energi termal menggunakan pendekatan zone model. Dengan demikian kedua model memberikan sudut pandang yang berbeda terhadap fenomena kebakaran yang sama dan dapat digunakan untuk saling melengkapi dalam proses analisis.

2.9.5 Relevansi CFAST terhadap Penelitian

Penelitian ini berfokus pada analisis distribusi temperatur dan akumulasi panas akibat kebakaran methane pada kompartemen quasi-closed. Dalam konteks tersebut, CFAST digunakan untuk memprediksi perkembangan temperatur upper hot layer yang merupakan lokasi akumulasi energi termal terbesar selama kebakaran berlangsung. Temperatur yang diperoleh dari simulasi CFAST memiliki keterkaitan langsung dengan pembahasan material bangunan pada Subbab 2.5 dan 2.6. Pada beton, berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan sifat material mulai terjadi pada temperatur sekitar 300°C dan menjadi signifikan pada rentang 500–650°C akibat dehidrasi dan dekomposisi senyawa penyusun semen. Pada kayu, proses pirolisis aktif terjadi pada rentang temperatur 200–350°C dan diikuti pembentukan lapisan arang yang menyebabkan penurunan kapasitas struktural material. Oleh karena itu, temperatur upper hot layer yang diprediksi oleh CFAST dapat digunakan sebagai indikator tingkat paparan termal yang berpotensi diterima oleh beton dan kayu selama kebakaran berlangsung. Hasil tersebut selanjutnya dibandingkan dengan distribusi temperatur yang diperoleh dari FireFOAM sehingga memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi termal yang berkembang di dalam kompartemen. Dengan demikian, CFAST dalam penelitian ini tidak hanya digunakan sebagai alat simulasi kebakaran, tetapi juga sebagai sarana untuk menghubungkan perkembangan temperatur, akumulasi panas, dan potensi tercapainya temperatur kritis beton maupun kayu yang menjadi fokus utama penelitian. Semakin tinggi temperatur hasil pembakaran maka plume panas akan bergerak lebih cepat menuju bagian atas enclosure.

2.10 Plume Panas dan Upper Hot Layer

Fenomena plume panas (fire plume) dan pembentukan upper hot layer merupakan mekanisme utama yang mengendalikan distribusi temperatur dan akumulasi panas pada kebakaran ruang tertutup maupun quasi-closed compartment. Ketika kebakaran terjadi, energi panas yang dihasilkan oleh proses pembakaran menyebabkan temperatur gas di sekitar sumber api meningkat secara signifikan. Peningkatan temperatur tersebut mengakibatkan penurunan densitas gas sehingga terbentuk gaya apung (buoyancy) yang

mendorong gas panas bergerak ke atas membentuk plume panas. Menurut Parsa et al. (2025), plume panas merupakan mekanisme transport energi yang paling dominan dalam compartment fire karena berperan membawa energi panas dari sumber api menuju bagian atas ruangan sehingga mempengaruhi distribusi temperatur secara keseluruhan. Dalam penelitian kebakaran modern, plume panas dipandang sebagai penghubung utama antara proses pembakaran dan pembentukan lingkungan termal di dalam enclosure. Energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran methane tidak langsung terdistribusi secara merata ke seluruh ruang, tetapi terlebih dahulu ditransportasikan melalui plume panas menuju langit-langit ruangan. Oleh karena itu, karakteristik plume memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap perkembangan temperatur dan akumulasi panas selama kebakaran berlangsung (Parsa et al., 2025).

2.10.1 Fire Plume dan Transport Panas

Fire plume terbentuk akibat adanya perbedaan densitas antara gas panas hasil pembakaran dan udara di sekitarnya. Ketika temperatur gas meningkat, densitasnya menurun sehingga gaya apung mendorong aliran gas bergerak secara vertikal ke arah atas. Selama proses tersebut, plume tidak hanya membawa energi panas tetapi juga mengangkut massa, momentum, dan spesies hasil pembakaran seperti karbon dioksida, uap air, serta produk pembakaran lainnya. Parsa et al. (2025) menjelaskan bahwa perkembangan temperatur pada compartment fire sangat dipengaruhi oleh kemampuan plume dalam mentransportasikan energi panas dari sumber api menuju bagian atas ruangan. Semakin besar energi yang dilepaskan oleh kebakaran, semakin besar pula energi yang dibawa oleh plume sehingga temperatur gas panas yang terbentuk di bagian atas enclosure meningkat secara signifikan. Dari perspektif perpindahan panas, plume panas merupakan mekanisme awal yang memicu terjadinya distribusi temperatur di dalam ruang. Setelah mencapai langit-langit, energi panas yang dibawa oleh plume akan menyebar secara horizontal dan mulai membentuk lapisan gas panas yang dikenal sebagai upper hot layer. Fenomena ini menjadi dasar terbentuknya stratifikasi termal yang umum dijumpai pada kebakaran kompartemen.

2.10.2 Thermal Stratification dan Upper Hot Layer

Setelah plume panas mencapai langit-langit ruangan, aliran gas panas tidak dapat bergerak lebih tinggi sehingga menyebar secara horizontal di bawah permukaan langit-langit. Akumulasi gas panas tersebut menyebabkan terbentuknya lapisan gas panas pada bagian atas ruangan yang dikenal sebagai upper hot layer. Menurut Peacock et al. (2026), upper hot layer merupakan zona yang mengandung sebagian besar energi termal hasil pembakaran selama kebakaran berlangsung. Temperatur pada lapisan ini umumnya jauh lebih tinggi dibandingkan temperatur udara pada lapisan bawah sehingga terbentuk stratifikasi termal (thermal stratification) di dalam kompartemen. Stratifikasi termal terjadi karena adanya perbedaan densitas akibat perbedaan temperatur antara lapisan atas dan lapisan bawah. Seiring bertambahnya energi yang dilepaskan oleh kebakaran, temperatur upper hot layer akan terus meningkat dan ketebalan lapisan panas akan

bertambah. Akibatnya batas antara lapisan atas dan lapisan bawah bergerak turun menuju lantai. Fenomena ini merupakan salah satu parameter utama yang diprediksi oleh CFAST dan juga dapat diamati melalui distribusi temperatur hasil simulasi CFD menggunakan FireFOAM. Thermal stratification memiliki peranan yang sangat penting dalam penelitian ini karena menunjukkan bagaimana energi panas terakumulasi di dalam enclosure selama kebakaran berlangsung. Semakin tinggi temperatur upper hot layer, semakin besar pula potensi paparan termal yang diterima oleh elemen bangunan yang berada di dekat langit-langit maupun di sepanjang dinding enclosure.

2.10.3 Akumulasi Panas dan Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur dalam kompartemen merupakan hasil dari interaksi antara pelepasan panas akibat pembakaran, transport energi oleh plume panas, serta perpindahan panas melalui mekanisme konveksi, konduksi, dan radiasi. Tang (2023) menjelaskan bahwa distribusi temperatur pada kebakaran ruang tertutup tidak bersifat seragam karena energi panas cenderung terakumulasi pada bagian atas ruangan sehingga menghasilkan gradien temperatur yang signifikan antara lapisan atas dan lapisan bawah. Akumulasi panas terjadi ketika laju energi yang dilepaskan oleh kebakaran lebih besar dibandingkan energi yang hilang melalui ventilasi maupun perpindahan panas ke elemen bangunan. Dalam kondisi tersebut temperatur upper hot layer akan meningkat secara progresif sehingga menyebabkan peningkatan temperatur rata-rata enclosure. Menurut Peacock et al. (2026), temperatur upper hot layer merupakan indikator utama tingkat akumulasi panas dalam compartment fire karena lapisan tersebut menyimpan sebagian besar energi termal yang dihasilkan selama proses pembakaran. Oleh karena itu, prediksi temperatur upper hot layer menjadi salah satu parameter yang paling sering digunakan dalam analisis keselamatan kebakaran dan evaluasi kondisi termal bangunan.

2.10.4 Hubungan Plume dan Upper Hot Layer dengan FireFOAM dan CFAST

Fenomena plume panas dan upper hot layer menjadi dasar bagi pendekatan simulasi yang digunakan dalam penelitian ini. Pada FireFOAM, plume panas direpresentasikan melalui penyelesaian persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan spesies secara tiga dimensi menggunakan pendekatan Large Eddy Simulation (LES). Melalui pendekatan tersebut, perkembangan plume panas, distribusi temperatur, dan akumulasi panas dapat diamati secara spasial pada seluruh domain simulasi. Sebaliknya, CFAST tidak menghitung detail aliran plume secara tiga dimensi, tetapi merepresentasikan pengaruh plume melalui pembentukan upper hot layer dan lower layer menggunakan pendekatan two-zone model. Menurut Jang dan Hwang (2023), pendekatan ini memungkinkan prediksi temperatur lapisan panas dilakukan dengan waktu komputasi yang jauh lebih singkat dibandingkan simulasi CFD, meskipun detail distribusi temperatur yang dihasilkan tidak sekompleks CFD. Dalam penelitian ini, FireFOAM digunakan untuk memperoleh distribusi temperatur tiga dimensi yang menggambarkan perkembangan plume panas secara detail, sedangkan CFAST digunakan untuk memprediksi perkembangan temperatur upper hot layer sebagai representasi kondisi

termal rata-rata di dalam enclosure. Dengan demikian kedua model saling melengkapi dalam menjelaskan mekanisme akumulasi panas selama kebakaran methane berlangsung.

2.10.5 Relevansi terhadap Beton dan Kayu

Plume panas dan upper hot layer memiliki hubungan langsung dengan tingkat paparan termal yang diterima oleh material bangunan. Energi panas yang terakumulasi pada lapisan atas ruangan menyebabkan peningkatan temperatur pada elemen struktur yang berada di sekitar langit-langit dan dinding enclosure. Oleh karena itu, temperatur upper hot layer dapat digunakan sebagai indikator tingkat paparan termal yang berpotensi mempengaruhi kinerja material bangunan selama kebakaran. Pada beton, peningkatan temperatur akibat paparan panas yang berkepanjangan dapat menyebabkan penguapan air bebas, peningkatan tekanan pori, dehidrasi senyawa semen, serta penurunan kuat tekan material. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa degradasi beton mulai terjadi pada temperatur sekitar 300°C dan menjadi signifikan pada rentang temperatur 500–650°C. Oleh karena itu, temperatur upper hot layer yang diprediksi melalui FireFOAM dan CFAST dapat digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan tercapainya temperatur kritis beton selama kebakaran berlangsung. Pada kayu, peningkatan temperatur akibat paparan panas dari plume dan upper hot layer memicu proses pengeringan, pirolisis, pembentukan lapisan arang (char layer), dan akhirnya degradasi struktural material. Proses pirolisis aktif umumnya terjadi pada rentang temperatur 200–350°C, sedangkan pembentukan arang dan penurunan kapasitas struktural meningkat pada temperatur yang lebih tinggi. Oleh karena itu, distribusi temperatur hasil simulasi dapat digunakan untuk menilai tingkat paparan termal yang berpotensi menyebabkan degradasi kayu. Berdasarkan uraian tersebut, plume panas dan upper hot layer merupakan fenomena kunci yang menghubungkan proses pembakaran methane dengan distribusi temperatur, akumulasi panas, dan potensi tercapainya temperatur kritis beton maupun kayu. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kedua fenomena tersebut menjadi sangat penting dalam interpretasi hasil simulasi FireFOAM dan CFAST yang dilakukan pada penelitian ini.

2.11 Komparasi CFD dan Zone Model

Pemodelan kebakaran secara numerik umumnya dapat dilakukan menggunakan dua pendekatan utama, yaitu Computational Fluid Dynamics (CFD) dan zone model. Kedua pendekatan tersebut memiliki tujuan yang sama, yaitu memprediksi perkembangan kondisi kebakaran, distribusi temperatur, perpindahan panas, dan penyebaran produk pembakaran di dalam suatu kompartemen. Namun demikian, masing-masing pendekatan menggunakan asumsi matematis dan tingkat penyederhanaan yang berbeda sehingga menghasilkan karakteristik simulasi yang berbeda pula. Menurut Parsa et al. (2025), pendekatan CFD menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan spesies pada seluruh domain komputasi sehingga mampu menghasilkan distribusi temperatur, kecepatan aliran, dan konsentrasi spesies secara tiga dimensi. Pendekatan ini memungkinkan simulasi fenomena kebakaran yang kompleks seperti perkembangan fire plume, thermal stratification, ceiling jet, dan distribusi temperatur lokal yang sulit

direpresentasikan menggunakan model sederhana. Sebaliknya, zone model seperti CFAST menggunakan pendekatan yang lebih sederhana dengan membagi kompartemen menjadi dua lapisan gas, yaitu upper hot layer dan lower layer. Peacock et al. (2026) menjelaskan bahwa pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa kondisi termal dalam ruangan dapat direpresentasikan oleh nilai rata-rata temperatur dan massa gas pada masing-masing lapisan. Dengan demikian, waktu komputasi yang dibutuhkan jauh lebih kecil dibandingkan simulasi CFD, namun detail distribusi temperatur yang diperoleh menjadi lebih terbatas.

2.11.1 Perbedaan Pendekatan Matematis

Perbedaan mendasar antara CFD dan zone model terletak pada metode penyelesaian fenomena fisik yang terjadi selama kebakaran. Pada CFD, seluruh domain simulasi dibagi menjadi ribuan hingga jutaan elemen mesh dan persamaan konservasi

2.11.2 Sintesis Literatur CFD dan Zone Model

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa baik CFD maupun zone model memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi perkembangan kondisi termal pada compartment fire, namun dengan tingkat detail yang berbeda. Parsa et al. (2025) menjelaskan bahwa pendekatan CFD mampu merepresentasikan distribusi temperatur secara spasial melalui penyelesaian persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan spesies pada seluruh domain simulasi. Melalui pendekatan tersebut, fenomena fire plume, thermal stratification, ceiling jet, dan distribusi temperatur lokal dapat direpresentasikan secara lebih rinci. Sebaliknya, Peacock et al. (2026) menjelaskan bahwa CFAST menggunakan pendekatan two-zone model yang mengasumsikan bahwa kondisi termal dalam ruangan dapat direpresentasikan oleh temperatur rata-rata pada upper hot layer dan lower layer. Pendekatan ini menghasilkan waktu komputasi yang jauh lebih rendah dibandingkan CFD, namun tidak mampu menggambarkan variasi temperatur lokal secara detail. Jang dan Hwang (2023) menunjukkan bahwa hasil prediksi temperatur dari zone model umumnya memiliki kecenderungan yang serupa dengan simulasi CFD dalam menggambarkan perkembangan temperatur lapisan panas. Namun demikian, CFD memberikan informasi yang lebih rinci mengenai distribusi temperatur pada berbagai lokasi dalam enclosure. Berdasarkan berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa CFD dan zone model bukan merupakan pendekatan yang saling menggantikan, melainkan saling melengkapi dalam menganalisis perkembangan temperatur dan akumulasi panas pada kebakaran kompartemen.

2.11.3 Sumber Perbedaan Prediksi Temperatur

Perbedaan hasil temperatur antara CFD dan zone model terutama disebabkan oleh perbedaan pendekatan matematis yang digunakan. Pada CFD, distribusi temperatur dihitung pada setiap sel komputasi sehingga gradien temperatur dapat direpresentasikan secara rinci pada seluruh domain simulasi. Akibatnya, variasi temperatur yang terjadi di sekitar sumber api, plume panas, langit-langit, maupun dinding ruangan dapat diamati

secara langsung. Sebaliknya, CFAST mengasumsikan bahwa temperatur pada setiap lapisan gas bersifat seragam. Oleh karena itu, temperatur yang dihasilkan merupakan temperatur rata-rata lapisan atas dan lapisan bawah. Penyederhanaan tersebut menyebabkan fenomena lokal seperti plume panas, ceiling jet, dan gradien temperatur di sekitar sumber api tidak direpresentasikan secara eksplisit. Selain itu, FireFOAM menggunakan pendekatan Large Eddy Simulation (LES) yang memungkinkan representasi turbulensi dan transport energi secara lebih rinci. Sebaliknya, CFAST menggunakan korelasi empiris untuk merepresentasikan proses plume dan perpindahan panas. Perbedaan inilah yang menjadi salah satu penyebab utama variasi hasil prediksi temperatur antara kedua model.

2.11.4 Komparasi CFD dan Zone Model

Tabel 2.1 menyajikan perbandingan karakteristik utama antara pendekatan CFD menggunakan FireFOAM dan zone model menggunakan CFAST.

Aspek	CFD (FireFOAM)	Zone Model (CFAST)
Pendekatan matematis	Persamaan Navier-Stokes dan transport energi	Two-zone model
Representasi ruang	Tiga dimensi	Dua lapisan gas
Distribusi temperatur	Spasial dan lokal	Temperatur rata-rata lapisan
Fire plume	Diselesaikan secara numerik	Direpresentasikan melalui korelasi
Thermal stratification	Dihitung secara langsung	Direpresentasikan melalui upper dan lower layer
Upper hot layer	Muncul dari solusi CFD	Dihitung sebagai zona panas
Akumulasi panas	Distribusi spasial energi termal	Energi termal rata-rata lapisan
Kebutuhan komputasi	Tinggi	Rendah
Waktu simulasi	Relatif lama	Relatif cepat
Output utama penelitian	Distribusi temperatur	Temperatur upper hot layer

Tabel 2.1 Komparasi CFD dan Zone Model

Berdasarkan tabel tersebut dapat dilihat bahwa FireFOAM memiliki keunggulan dalam menghasilkan distribusi temperatur secara rinci, sedangkan CFAST memiliki keunggulan dalam efisiensi komputasi dan prediksi temperatur lap

BAB III

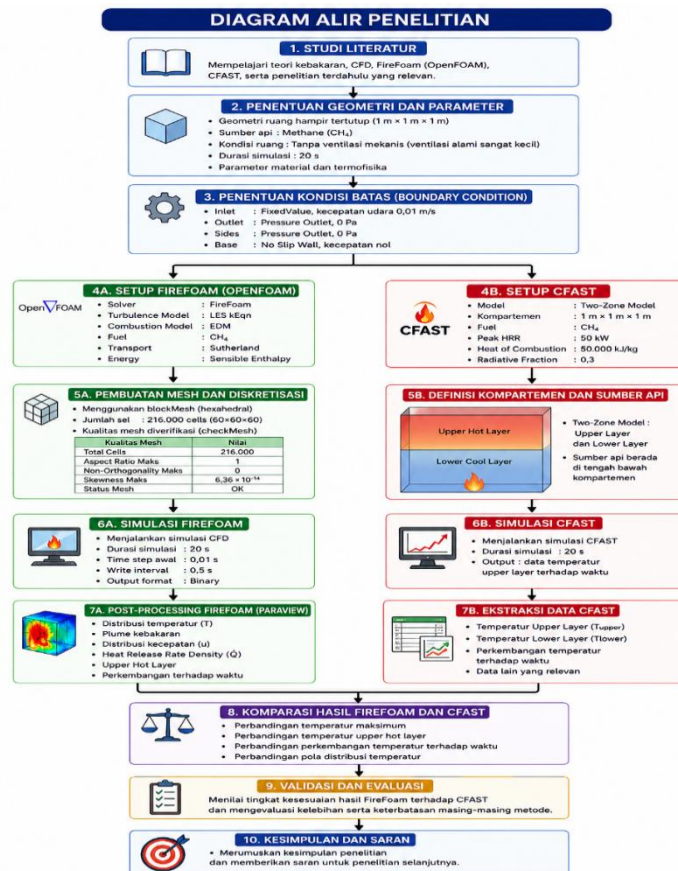
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik untuk menganalisis karakteristik distribusi temperatur, perkembangan plume panas, dan pembentukan lapisan panas atas (*upper hot layer*) pada ruang hampir tertutup. Simulasi dilakukan menggunakan dua metode yang berbeda, yaitu Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan OpenFOAM dengan solver FireFoam dan *zone model* menggunakan Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST). Metode CFD digunakan untuk memperoleh distribusi temperatur tiga dimensi, perkembangan plume panas, dan karakteristik penyebaran panas secara rinci. Sementara itu, CFAST digunakan untuk memprediksi perkembangan temperatur lapisan atas dan lapisan bawah berdasarkan pendekatan *two-zone model*. Hasil simulasi kedua perangkat lunak kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi karakteristik prediksi temperatur serta pembentukan *upper hot layer* pada ruang hampir tertutup.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sesuai diagram alir berikut.



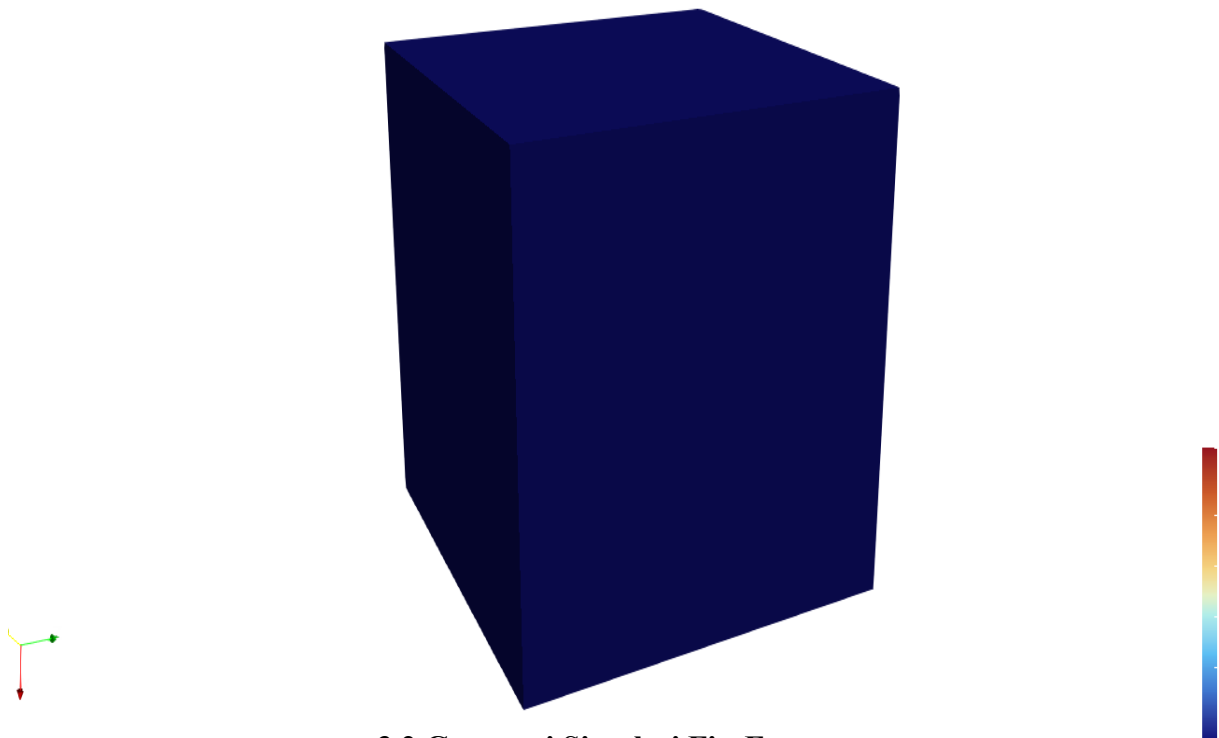
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Urutan penelitian meliputi:

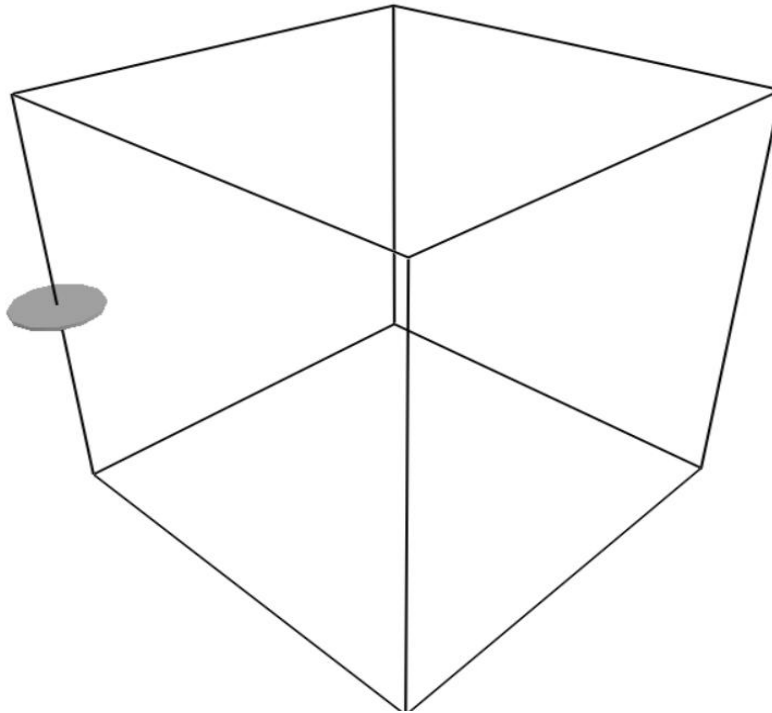
1. Studi literatur.
2. Pembuatan geometri simulasi.
3. Pembuatan mesh numerik.
4. Penentuan kondisi batas (*boundary condition*).
5. Setup simulasi FireFoam.
6. Simulasi FireFoam.
7. Post-processing menggunakan ParaView.
8. Setup simulasi CFAST.
9. Simulasi CFAST.
10. Validasi hasil.
11. Analisis dan pembahasan.
12. Penyusunan kesimpulan.

3.3 Geometri Simulasi

Geometri simulasi berupa ruang hampir tertutup berbentuk kubus dengan dimensi $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Geometri dipilih untuk memfokuskan penelitian pada fenomena distribusi temperatur dan perkembangan plume panas tanpa dipengaruhi kompleksitas bentuk ruangan. Pada model simulasi terdapat inlet sebagai jalur masuk udara, outlet sebagai jalur keluarnya gas hasil pembakaran, serta dinding ruang sebagai batas domain simulasi.



3.2 Geometri Simulasi FireFoam



3.3 Geometri Simulasi CFAST

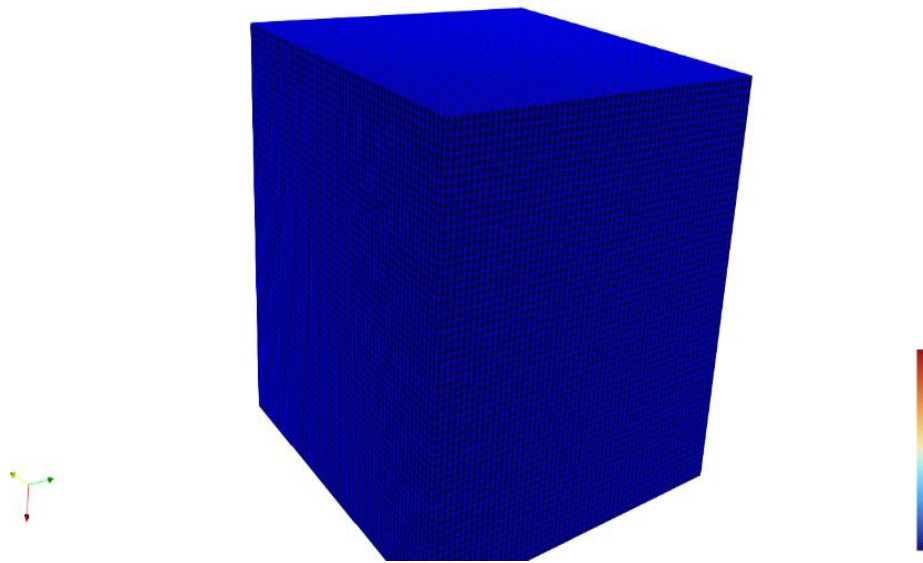
Parameter	Nilai
Panjang ruang	1 m
Lebar ruang	1 m
Tinggi ruang	1 m
Volume ruang	1 m ³
Jenis enclosure	Ruang hampir tertutup

Tabel 3.1 Dimensi Geometri Simulasi

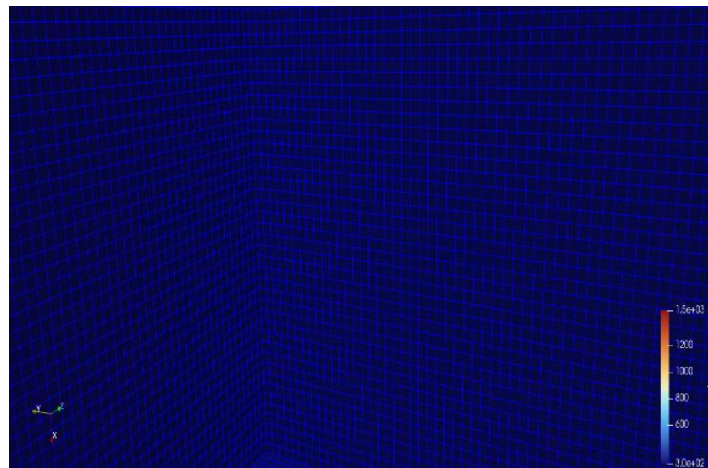
Pemilihan geometri sederhana dilakukan untuk mempermudah analisis perkembangan temperatur, plume panas, dan pembentukan *upper hot layer*.

3.4 Diskretisasi Mesh

Pada simulasi OpenFOAM, domain simulasi dibagi menjadi elemen-elemen numerik menggunakan utilitas *blockMesh*. Mesh yang digunakan berupa mesh terstruktur (*structured mesh*) berbentuk heksahedral.



Gambar 3.4 Mesh Keseluruhan



Gambar 3.5 Gambar Zoom Mesh

Jumlah mesh yang digunakan adalah:

$$60 \times 60 \times 60$$

dengan total:

$$216.000 \text{ cells}$$

Parameter	Nilai
Total Cells	216.000
Jenis Mesh	Hexahedral
Aspect Ratio Maksimum	1
Non-Orthogonality Maksimum	0
Skewness Maksimum	$6,36 \times 10^{-14}$
Status Mesh	OK

Tabel 3.2 Hasil Pemeriksaan Kualitas Mesh

Hasil pemeriksaan menggunakan utilitas *checkMesh* menunjukkan bahwa mesh memenuhi kriteria kualitas yang direkomendasikan untuk simulasi CFD.

3.5 Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Kondisi batas diterapkan pada seluruh patch geometri untuk merepresentasikan kondisi fisik ruang hampir tertutup.

Boundary	Type	Nilai
Inlet	Fixed Value	0,01 m/s
Outlet	Pressure Outlet	0 Pa
Sides	Pressure Outlet	0 Pa
Base	No Slip Wall	$U = 0$

Tabel 3.3 Boundary Condition

Kecepatan udara inlet sebesar 0,01 m/s digunakan untuk merepresentasikan ventilasi alami yang sangat rendah sehingga kondisi ruang tetap menyerupai ruang hampir tertutup.

3.6 Model Fisik dan Numerik

Simulasi dilakukan menggunakan solver FireFoam pada OpenFOAM v2212.

3.6.1 Model Turbulensi

Model turbulensi yang digunakan adalah Large Eddy Simulation (LES) dengan model sub-grid scale kEqn. Pemilihan LES didasarkan pada kemampuannya dalam merepresentasikan struktur turbulensi skala besar yang dominan pada fenomena plume kebakaran dan distribusi temperatur.

3.6.2 Model Pembakaran

Model pembakaran yang digunakan adalah Eddy Dissipation Model (EDM). Model EDM mengasumsikan bahwa laju reaksi pembakaran dikontrol oleh proses pencampuran turbulen antara bahan bakar dan oksidator.

3.6.3 Sifat Termofisika

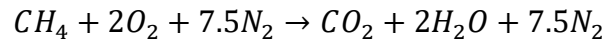
Parameter termofisika yang digunakan meliputi:

Parameter	Nilai
Fuel	CH ₄ (Metana)
Equation of State	Perfect Gas
Transport Model	Sutherland
Energy Formulation	Sensible Enthalpy

Tabel 3.4 Parameter termofisika

3.6.4 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran metana yang digunakan dalam simulasi adalah:



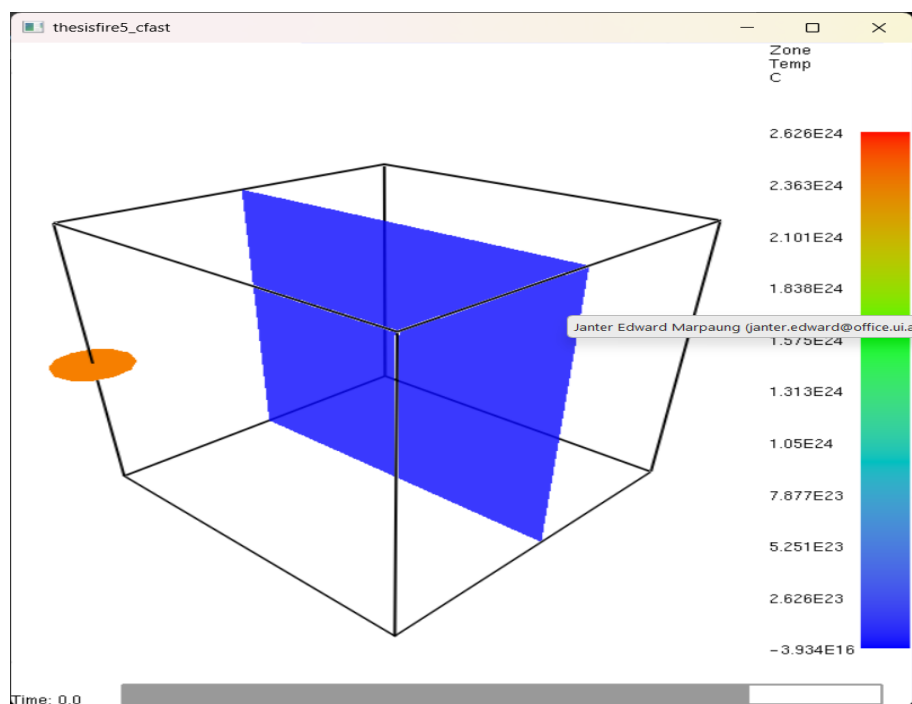
3.7 Parameter Simulasi FireFoam

Parameter	Nilai
Solver	FireFoam
Turbulence Model	LES kEqn
Combustion Model	EDM
Fuel	CH ₄
Temperatur Awal	300 K
Durasi Simulasi	20 s
Time Step Awal	0,01 s
Write Interval	0,5 s
Format Output	Binary

Tabel 3.5 Parameter Simulasi FireFoam

3.8 Parameter Simulasi CFAST

Simulasi CFAST dilakukan menggunakan pendekatan *two-zone model*, di mana ruang dibagi menjadi dua lapisan, yaitu *upper hot layer* dan *lower cool layer*.



Gambar 3.6 Two-Zone Model CFAST

Parameter	Nilai
Kompartemen	1 × 1 × 1 m
Fuel	CH ₄
Heat of Combustion	50.000 kJ/kg
Peak HRR	50 kW*
Radiative Fraction	0,3
Ventilasi	Mengikuti model penelitian

Tabel 3.7 Parameter Simulasi CFAST

Catatan: Sesuaikan Peak HRR dengan nilai akhir yang benar-benar digunakan pada model CFAST.

3.9 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

Variabel Bebas

- Waktu simulasi.

Variabel Terikat

- Distribusi temperatur.
- Temperatur maksimum.
- Heat Release Rate Density (Qdot).
- Perkembangan plume panas.
- Upper Hot Layer Temperature.

Variabel Pemanding

- Hasil simulasi CFAST.

3.10 Perangkat Keras dan Lunak

Komponen	Spesifikasi
Processor	AMD Ryzen 7 7735HS
RAM	16384 MB
Storage	8261 MB
Sistem Operasi	Ubuntu WSL
CFD Software	OpenFOAM v2212
Post Processor	ParaView
Zone Model	CFAST

Tabel 3.8 Spesifikasi Perangkat Penelitian

3.11 Post-Processing dan Validasi

Data hasil simulasi FireFoam diproses menggunakan ParaView untuk memperoleh:

1. Distribusi temperatur.
2. Kontur temperatur vertikal.
3. Perkembangan plume panas.
4. Distribusi kecepatan udara.
5. Distribusi Heat Release Rate Density (\dot{Q}).
6. Pembentukan *upper hot layer*.

Analisis temperatur dilakukan pada beberapa waktu pengamatan, yaitu 5 s, 10 s, 15 s, dan 20 s. Validasi dilakukan menggunakan CFAST dengan membandingkan:

1. Temperatur maksimum ruang.
2. Upper Layer Temperature.
3. Tren perkembangan temperatur terhadap waktu.
4. Pembentukan *upper hot layer*.

Hasil validasi digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian prediksi FireFoam terhadap pendekatan *zone model* yang digunakan oleh CFAST.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

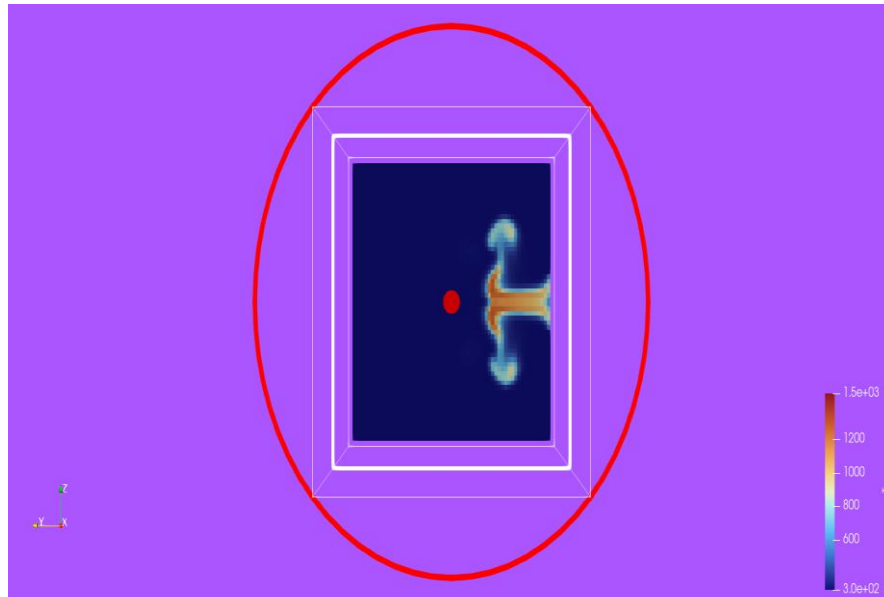
4.1 Umum

Bab ini menyajikan hasil simulasi numerik penyebaran temperatur dan perkembangan plume kebakaran menggunakan solver FireFOAM pada ruang kompartemen berukuran $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Simulasi dilakukan selama 20 detik dengan pendekatan Large Eddy Simulation (LES) untuk menangkap fenomena turbulensi yang terjadi selama proses pembakaran. Analisis difokuskan pada perkembangan distribusi temperatur, pembentukan plume, proses entrainment udara sekitar, karakteristik perpindahan panas, perkembangan kondisi quasi-steady state, serta validasi hasil simulasi terhadap model zona CFAST. Selain itu dilakukan pembahasan berdasarkan teori plume Heskestad dan teori entrainment McCaffrey guna memastikan bahwa hasil simulasi memiliki kesesuaian dengan fenomena fisik kebakaran yang telah dipublikasikan dalam berbagai penelitian terdahulu. Secara umum hasil simulasi menunjukkan bahwa sumber api menghasilkan plume panas yang berkembang cepat sejak awal pembakaran dan mencapai kondisi relatif stabil setelah sekitar 5 detik. Temperatur maksimum yang terbentuk berada pada kisaran 1400–1500 K dan tetap bertahan hingga akhir simulasi. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa sistem telah memasuki kondisi quasi-steady state meskipun turbulensi lokal masih tetap berlangsung akibat karakteristik LES yang digunakan dalam simulasi.

4.2 Distribusi Temperatur

4.2.1 Kontur Temperatur $t = 1 \text{ s}$

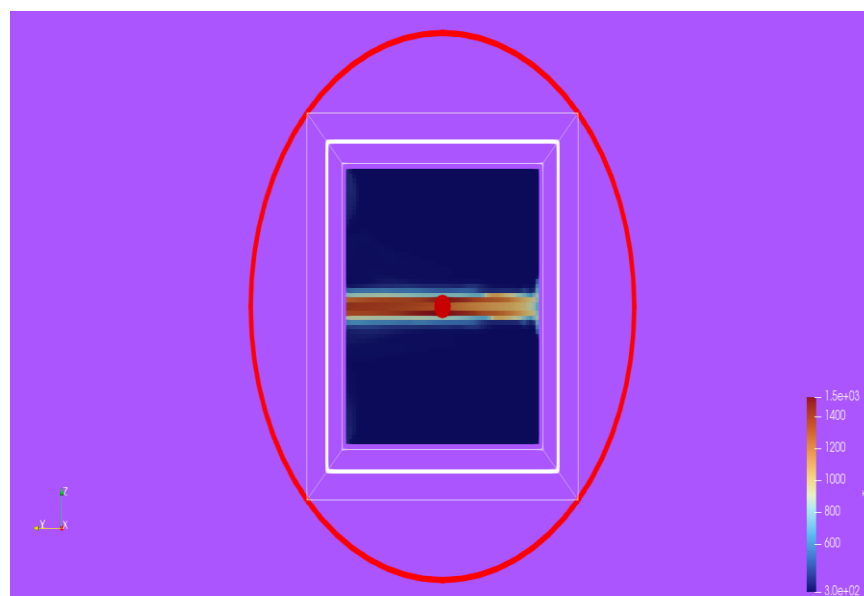
Pada detik pertama simulasi, distribusi temperatur menunjukkan bahwa energi panas masih terkonsentrasi di sekitar sumber api. Zona temperatur tinggi terlihat sangat terbatas dan plume belum berkembang secara signifikan ke dalam ruang kompartemen. Temperatur maksimum pada fase ini telah mencapai lebih dari 1300 K, namun volume gas panas yang terbentuk masih relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa energi hasil pembakaran sebagian besar masih digunakan untuk memanaskan gas di sekitar sumber api sebelum terbentuk aliran buoyancy yang kuat. Pada tahap ini gaya apung (buoyancy force) mulai terbentuk akibat perbedaan densitas antara gas panas dan udara sekitar. Namun momentum vertikal plume masih relatif rendah sehingga pola penyebaran temperatur belum menunjukkan struktur plume yang matang. Fenomena ini sesuai dengan fase ignition dan flame establishment yang umum dijumpai pada kebakaran skala kecil. Pada fase ini pelepasan panas berlangsung sangat cepat tetapi volume udara yang terlibat dalam proses pencampuran masih terbatas.



Gambar 4.1 (Kontur Temperatur 1 s)

4.2.2 Kontur Temperatur $t = 2$ s

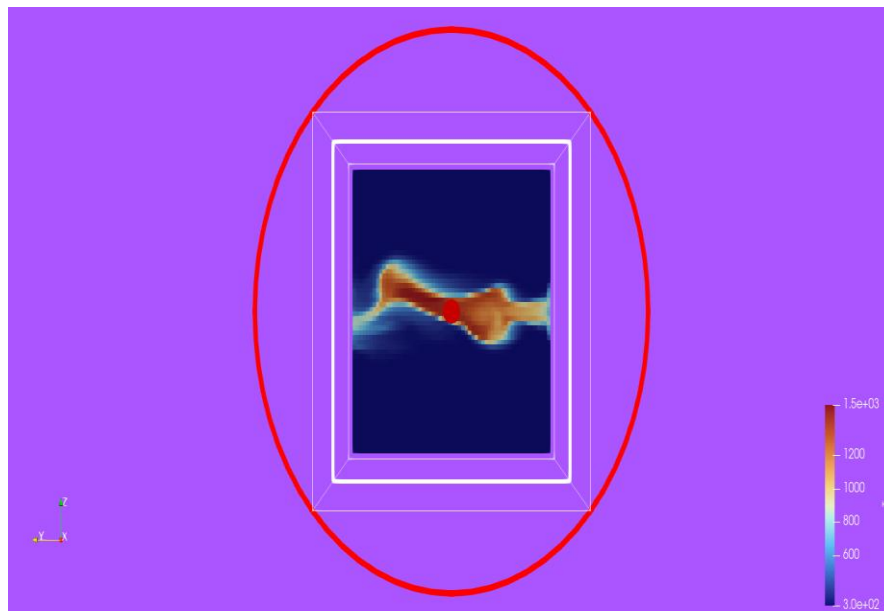
Pada detik ke-2 terlihat perkembangan plume yang jauh lebih jelas dibandingkan kondisi sebelumnya. Zona temperatur tinggi mulai memanjang menjauhi sumber api dan membentuk inti plume yang lebih terdefinisi. Temperatur maksimum meningkat hingga mendekati 1400 K. Kenaikan ini menunjukkan bahwa proses pembakaran telah mencapai kondisi yang lebih stabil dibandingkan fase ignition. Perkembangan plume pada tahap ini dipengaruhi oleh peningkatan gaya buoyancy yang mendorong gas panas bergerak menjauhi sumber api. Pada saat yang sama udara dingin di sekitar plume mulai tersedot ke dalam aliran utama akibat mekanisme entrainment. Fenomena entrainment menyebabkan diameter plume bertambah dan menghasilkan daerah transisi temperatur antara inti plume dan udara lingkungan. Gradien temperatur yang terbentuk menunjukkan adanya proses pencampuran turbulen yang semakin kuat.



Gambar 4.2 (Kontur Temperatur 2 s)

4.2.3 Kontur Temperatur $t = 5$ s

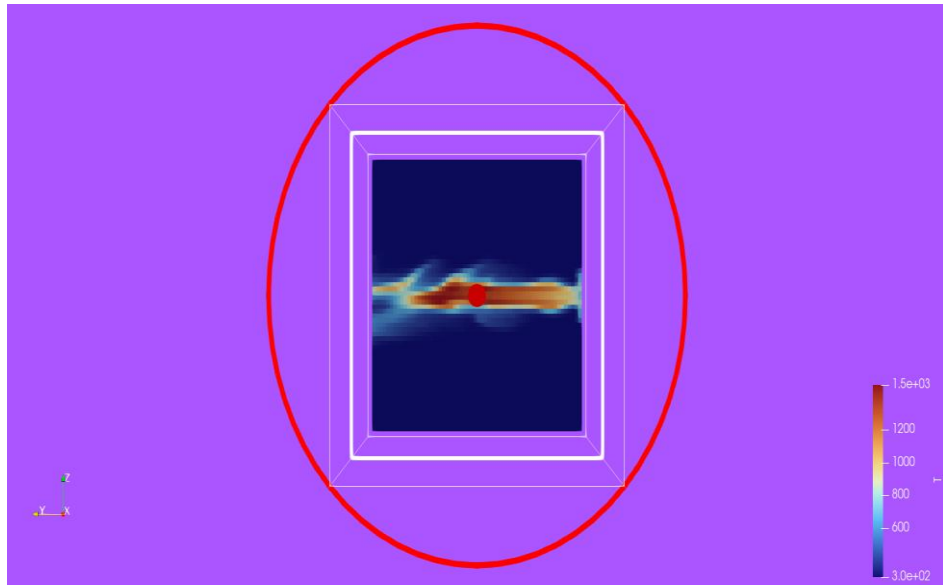
Pada detik ke-5 plume telah berkembang penuh dan memenuhi sebagian besar domain pengamatan. Inti plume memiliki temperatur lebih dari 1400 K sedangkan daerah di sekitarnya menunjukkan temperatur yang lebih rendah akibat proses pencampuran dengan udara lingkungan. Distribusi temperatur memperlihatkan pola yang jauh lebih kompleks dibandingkan detik sebelumnya. Fluktuasi temperatur lokal menunjukkan keberadaan struktur turbulensi yang berhasil ditangkap oleh pendekatan LES. Pada tahap ini plume tidak lagi berbentuk jet panas sederhana melainkan telah berkembang menjadi struktur turbulen tiga dimensi yang mengalami osilasi kontinu. Fenomena tersebut merupakan karakteristik khas plume kebakaran yang dipengaruhi oleh interaksi antara gaya apung, turbulensi, dan entrainment. Kontur temperatur juga menunjukkan bahwa perkembangan plume mulai mencapai bentuk rata-rata yang relatif stabil. Meskipun terdapat fluktuasi lokal, pola distribusi temperatur secara keseluruhan tidak mengalami perubahan signifikan dibandingkan waktu-waktu berikutnya.



Gambar 4.3 (Kontur Temperatur 5 s)

4.2.4 Kontur Temperatur $t = 20$ s

Pada akhir simulasi, distribusi temperatur menunjukkan bahwa plume telah mencapai kondisi quasi-steady state. Bentuk plume masih mengalami fluktuasi akibat turbulensi, namun struktur rata-ratanya hampir identik dengan kondisi pada detik ke-5. Temperatur maksimum tetap berada pada kisaran 1400–1500 K. Hal ini menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan sumber api relatif konstan selama simulasi berlangsung. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai kesetimbangan statistik dimana energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran seimbang dengan energi yang didistribusikan melalui konveksi, radiasi, dan pencampuran turbulen.



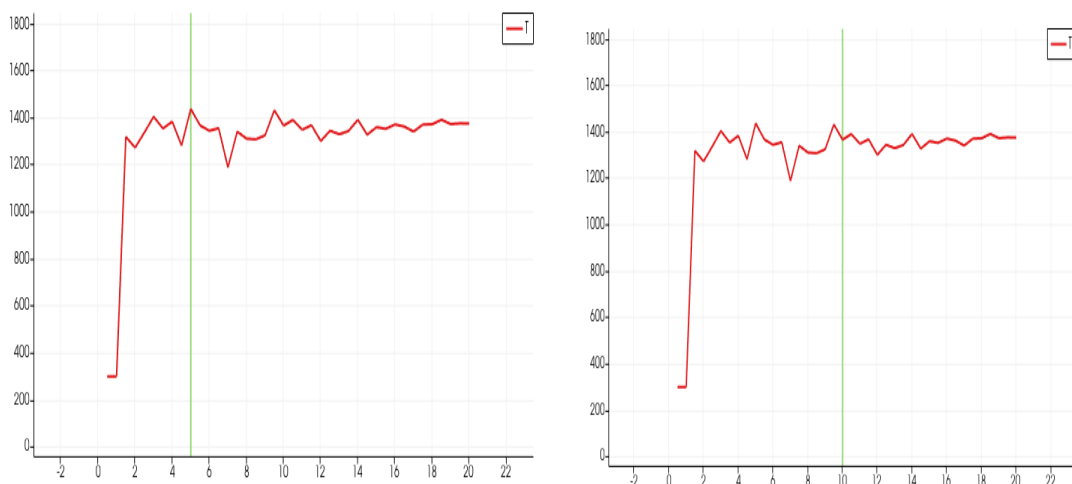
Gambar 4.4 (Kontur Temperatur 20 s)

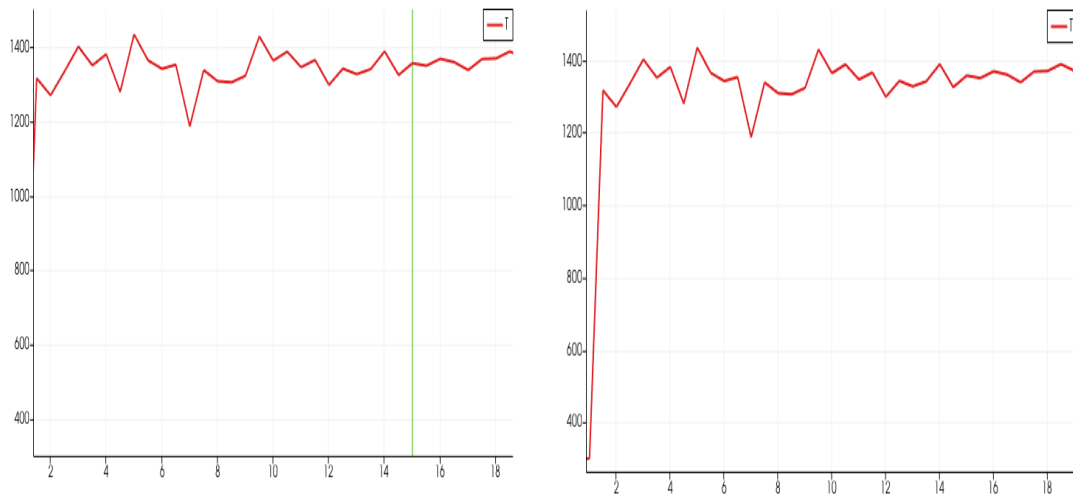
4.3 Analisis Temperatur Maksimum terhadap Waktu

Perkembangan temperatur maksimum selama simulasi digunakan untuk mengevaluasi karakteristik pembakaran dan kestabilan plume yang terbentuk.

Waktu (s)	Temperatur Maksimum (K)
1	1420
2	1450
5	1498
10	1499
15	1494
20	1509

Tabel 4.1 Temperatur Maksimum Hasil Simulasi : Hasil simulasi FireFOAM.



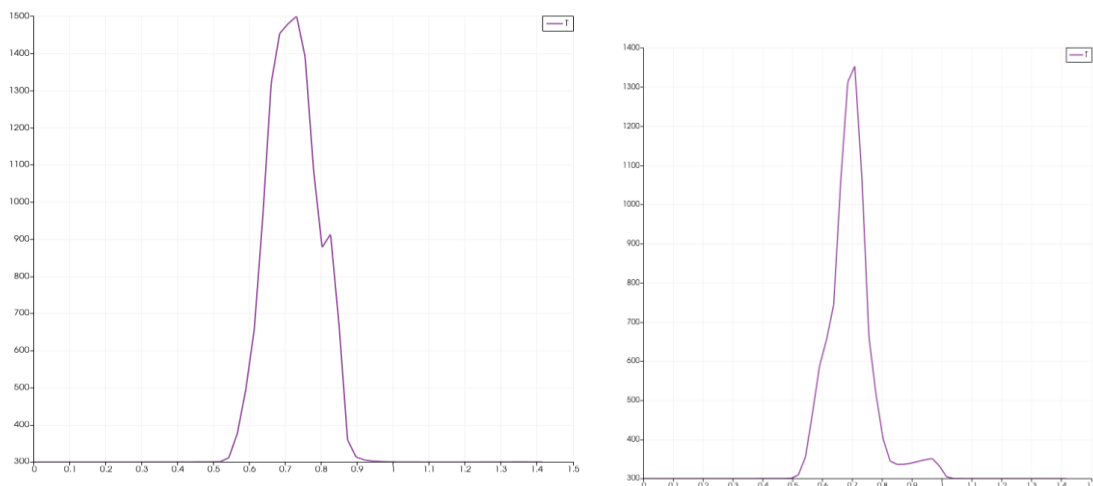


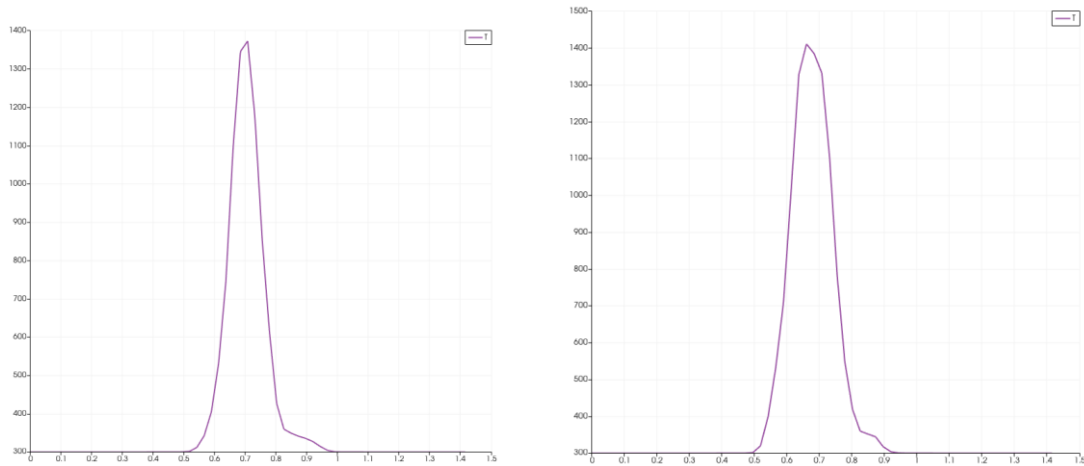
Grafik 4.1 Perubahan temperatur maksimum terhadap waktu

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Gambar 4.5, temperatur meningkat sangat cepat pada fase awal pembakaran. Dalam waktu kurang dari 2 detik temperatur telah mencapai lebih dari 1400 K dan terus meningkat hingga mendekati 1500 K. Setelah detik ke-5, temperatur maksimum hanya mengalami fluktuasi kecil pada rentang sekitar 1490–1510 K. Fluktuasi tersebut merupakan karakteristik alami aliran turbulen yang terjadi pada plume kebakaran. Hasil ini menunjukkan bahwa pembakaran telah berkembang penuh dan menghasilkan pelepasan panas yang relatif stabil selama sisa waktu simulasi. Fluktuasi temperatur ini merupakan konsekuensi alami dari model LES yang digunakan. Tidak seperti model RANS yang menghasilkan nilai rata-rata, LES mampu menangkap struktur turbulensi besar yang menyebabkan temperatur berosilasi terhadap waktu. Secara keseluruhan temperatur maksimum yang diperoleh masih berada dalam rentang yang dilaporkan oleh literatur untuk nyala api hidrokarbon dan material berbasis kayu, sehingga hasil simulasi dapat dianggap realistis.

4.4 Analisis Profil Temperatur Plume

Profil temperatur plume diperoleh menggunakan metode *Plot Over Line* pada bidang irisan vertikal yang melewati inti plume.





Grafik 4.2 Profil Temperatur Plume

Grafik menunjukkan bahwa temperatur lingkungan berada pada kisaran sekitar 300 K, sedangkan temperatur maksimum pada inti plume mencapai sekitar 1500 K. Distribusi temperatur memperlihatkan adanya gradien temperatur yang sangat tajam dari inti plume menuju daerah sekitarnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa energi panas terkonsentrasi pada jalur aliran utama hasil pembakaran. Secara umum, profil temperatur plume dapat dibagi menjadi tiga zona utama:

1. **Zona Lingkungan**, yaitu daerah dengan temperatur mendekati temperatur awal ruang.
2. **Zona Transisi**, yaitu daerah dengan peningkatan temperatur yang cepat akibat proses pencampuran.
3. **Zona Inti Plume**, yaitu daerah dengan temperatur tertinggi yang berada pada jalur utama aliran gas hasil pembakaran.

4.5 Pembahasan Perkembangan Plume dan Fenomena Entrainment

Perkembangan plume pada simulasi ini dipengaruhi oleh gaya apung (buoyancy) yang timbul akibat perbedaan densitas antara gas panas hasil pembakaran dan udara lingkungan. Gas hasil pembakaran memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan udara sekitar sehingga densitasnya lebih rendah. Kondisi tersebut menyebabkan gas panas bergerak menjauhi sumber api dan membentuk plume.

Selama plume berkembang, udara lingkungan di sekitar plume ikut tersedot masuk ke dalam aliran panas. Fenomena ini dikenal sebagai **entrainment**. Proses entrainment menyebabkan plume mengalami pelebaran dan pencampuran dengan udara yang lebih dingin sehingga terbentuk gradien temperatur yang terlihat pada kontur temperatur dan grafik profil temperatur plume.

Pada hasil simulasi, fenomena entrainment ditunjukkan oleh perubahan warna dari merah dan kuning pada inti plume menjadi hijau dan biru pada bagian luar plume. Hal ini menunjukkan terjadinya penurunan temperatur akibat pencampuran antara gas hasil pembakaran dan udara lingkungan. Fenomena tersebut sesuai dengan teori plume kebakaran yang menyatakan bahwa laju entrainment meningkat seiring bertambahnya jarak plume dari sumber api.

4.6 Analisis Kondisi Quasi-Steady State

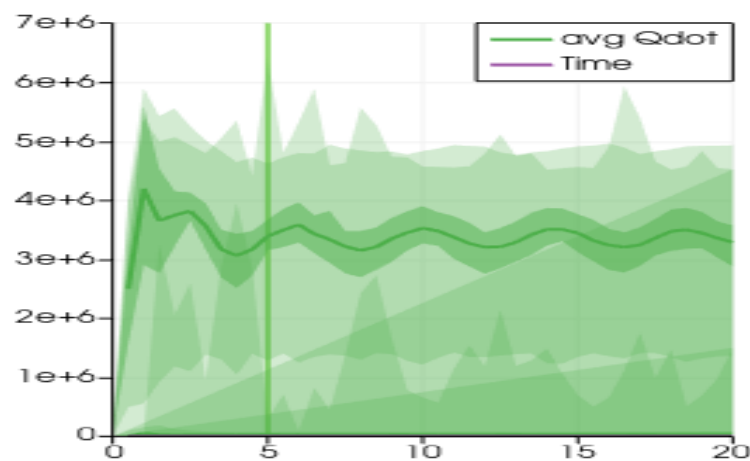
Meskipun simulasi dilakukan menggunakan pendekatan transient (unsteady), hasil simulasi menunjukkan bahwa setelah sekitar detik ke-5 distribusi temperatur tidak mengalami perubahan yang signifikan hingga akhir simulasi pada detik ke-20. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem telah mencapai **quasi-steady state**, yaitu keadaan dimana energi panas yang dihasilkan oleh sumber api telah diimbangi oleh proses perpindahan panas dan pencampuran fluida di dalam domain simulasi. Indikasi kondisi quasi-steady state dapat dilihat dari:

1. Temperatur maksimum yang relatif konstan pada kisaran 1490–1510 K.
2. Bentuk plume yang tidak mengalami perubahan signifikan setelah detik ke-5.
3. Pola distribusi temperatur pada $t = 5$ s dan $t = 20$ s yang relatif serupa.
4. Tidak adanya kenaikan temperatur maksimum yang berkelanjutan hingga akhir simulasi.

Meskipun kondisi termal telah mendekati stabil, simulasi tetap bersifat transient karena fluktuasi lokal akibat turbulensi masih terjadi selama simulasi berlangsung.

4.7 Analisis Heat Release Rate (HRR)

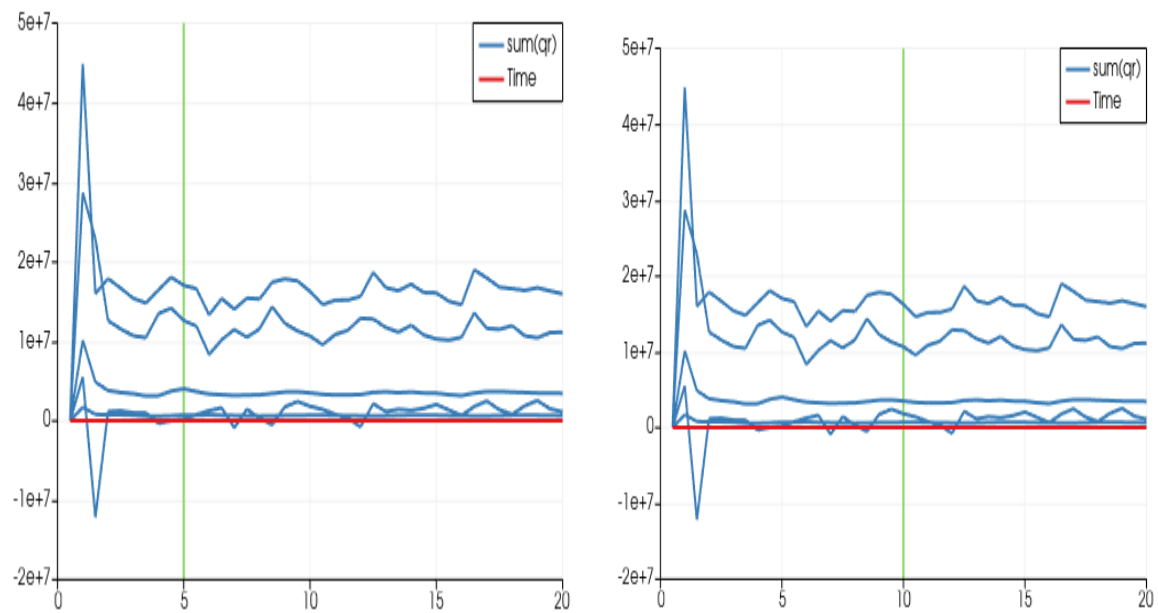
Grafik HRR menunjukkan peningkatan cepat pada awal simulasi kemudian stabil pada kisaran sekitar 3–4 MW. Fenomena ini sejalan dengan perkembangan temperatur maksimum dan plume. Ketika HRR meningkat, temperatur maksimum juga meningkat. Setelah HRR stabil, temperatur maksimum dan struktur plume juga menjadi stabil. Hubungan yang konsisten antara HRR, plume, dan temperatur menunjukkan bahwa solusi numerik yang diperoleh bersifat fisik dan tidak menunjukkan perilaku numerik yang menyimpang.



Grafik 4.3 Heat Release Rate (HRR)

4.8 Analisis Radiative Heat Flux

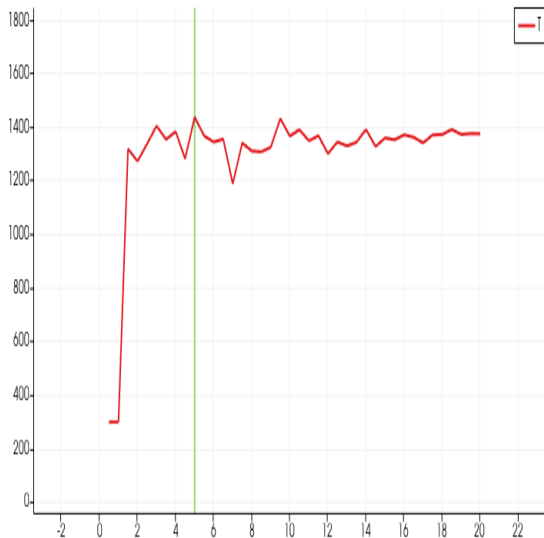
Radiative heat flux menunjukkan kontribusi perpindahan panas melalui mekanisme radiasi. Pada temperatur lebih dari 1300 K, radiasi menjadi salah satu mekanisme perpindahan panas yang dominan. Grafik menunjukkan bahwa nilai radiative heat flux mengikuti pola HRR. Ketika HRR meningkat, energi radiasi yang dipancarkan nyala api juga meningkat. Hal ini sesuai dengan teori perpindahan panas radiasi yang menyatakan bahwa energi radiasi meningkat secara signifikan dengan kenaikan temperatur nyala.



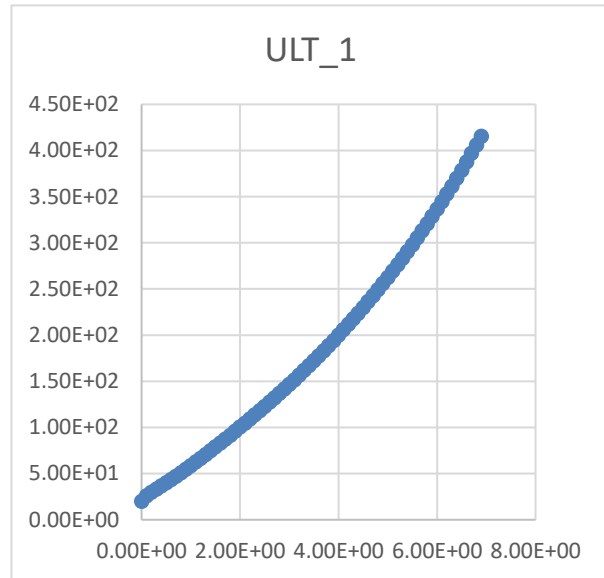
Grafik 4.4 Radiative Heat Flux

4.9 Validasi Model Menggunakan CFAST

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil FireFOAM dengan model zona CFAST. Secara umum kedua model menunjukkan tren yang sama yaitu peningkatan temperatur yang sangat cepat pada awal kebakaran diikuti fase stabil pada periode berikutnya. Perbedaan antara kedua model muncul karena pendekatan yang digunakan berbeda. FireFOAM menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan spesies secara tiga dimensi. Sebaliknya CFAST mengasumsikan ruang terbagi menjadi dua lapisan homogen yaitu upper layer dan lower layer. Akibat asumsi tersebut, FireFOAM mampu menangkap detail plume, entrainment, dan turbulensi yang tidak dapat direpresentasikan oleh CFAST. Meskipun demikian kesamaan tren temperatur menunjukkan bahwa model FireFOAM telah memberikan hasil yang valid. Dari sudut pandang rekayasa kebakaran, kesesuaian antara kedua model memberikan keyakinan bahwa simulasi mampu menggambarkan perkembangan kebakaran secara realistis dan dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.



Grafik 4.5 FireFOAM



Grafik 4.6 CFAST

4.10 Analisis Turbulensi Menggunakan Large Eddy Simulation (LES)

Pada penelitian ini model turbulensi yang digunakan adalah Large Eddy Simulation (LES) dengan model sub-grid scale kEqn. Pemilihan LES didasarkan pada kemampuannya dalam menangkap struktur turbulensi skala besar yang berkembang selama proses pembakaran. Berbeda dengan model Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) yang hanya menghasilkan nilai rata-rata turbulensi, LES menyelesaikan langsung pusaran turbulen berukuran besar dan hanya memodelkan turbulensi berukuran kecil. Oleh karena itu LES lebih sesuai untuk simulasi kebakaran karena plume api merupakan fenomena yang sangat dipengaruhi oleh fluktuasi turbulensi. Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, plume yang terbentuk tidak berbentuk kolom lurus sempurna tetapi menunjukkan deformasi dan osilasi lokal. Fenomena tersebut merupakan indikasi adanya interaksi antara gaya buoyancy, entrainment, dan turbulensi yang berhasil ditangkap oleh model LES. Fluktuasi temperatur maksimum yang terlihat pada grafik temperatur terhadap waktu juga menunjukkan karakteristik khas simulasi LES. Temperatur tidak berada pada nilai konstan melainkan berosilasi di sekitar nilai rata-rata. Hal ini menunjukkan bahwa aliran masih mengalami fluktuasi turbulen meskipun secara global telah mencapai kondisi quasi-steady state. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa penggunaan LES memberikan representasi yang lebih realistis terhadap perkembangan plume dan distribusi temperatur dibandingkan pendekatan turbulensi yang lebih sederhana.

4.11 Analisis Plume Berdasarkan Teori Heskestad

Perkembangan plume yang diperoleh dari simulasi FireFOAM dapat dibandingkan dengan teori plume kebakaran yang dikembangkan oleh Heskestad. Menurut Heskestad, plume kebakaran memiliki karakteristik utama berupa inti plume dengan temperatur tinggi yang terkonsentrasi pada sumbu pusat dan penurunan temperatur secara bertahap menuju daerah luar akibat proses entrainment udara lingkungan. Hasil simulasi menunjukkan karakteristik yang sejalan dengan teori tersebut. Pada seluruh kontur temperatur terlihat bahwa temperatur maksimum selalu berada pada inti plume, sedangkan temperatur menurun secara bertahap menuju lingkungan

sekitarnya. Profil temperatur plume pada Gambar 4.6 sampai Gambar 4.8 juga menunjukkan pola distribusi yang konsisten dengan teori plume Heskestad. Selain itu, teori Heskestad menyatakan bahwa perkembangan plume sangat dipengaruhi oleh laju pelepasan panas (HRR). Semakin besar HRR maka semakin besar pula momentum termal yang mendorong plume untuk berkembang. Pada penelitian ini kestabilan HRR setelah beberapa detik pertama menyebabkan plume mempertahankan bentuk yang relatif konstan hingga akhir simulasi. Kesesuaian antara hasil simulasi dan teori Heskestad menunjukkan bahwa model FireFOAM mampu merepresentasikan karakteristik plume kebakaran dengan baik.

4.12 Analisis Pembentukan Upper Hot Layer dan Lower Cool Layer

Salah satu karakteristik utama kebakaran pada ruang tertutup adalah terbentuknya lapisan panas pada bagian atas ruang (upper hot layer) dan lapisan yang lebih dingin pada bagian bawah ruang (lower cool layer). Pada hasil simulasi FireFOAM terlihat bahwa temperatur pada bagian atas enclosure lebih tinggi dibandingkan temperatur pada bagian bawah enclosure. Fenomena ini terjadi karena gas hasil pembakaran yang memiliki densitas lebih rendah bergerak ke arah atas akibat gaya buoyancy. Seiring berjalannya waktu, gas panas terus terakumulasi pada bagian atas ruang sehingga terbentuk lapisan panas yang semakin jelas. Pada saat yang sama udara yang lebih dingin tetap berada pada bagian bawah enclosure sehingga terbentuk stratifikasi temperatur. Fenomena tersebut sesuai dengan hasil simulasi CFAST yang menunjukkan peningkatan temperatur upper layer dan perubahan layer height selama proses pembakaran berlangsung. Hasil FireFOAM dan CFAST sama-sama menunjukkan kecenderungan terbentuknya upper hot layer meskipun pendekatan numerik yang digunakan berbeda. Pembentukan upper hot layer sangat penting dalam rekayasa keselamatan kebakaran karena berpengaruh terhadap penyebaran asap, visibilitas, dan kondisi evakuasi penghuni bangunan.

4.13 Analisis Error Validasi terhadap CFAST

Untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian hasil simulasi FireFOAM terhadap CFAST dilakukan analisis error berdasarkan parameter temperatur.

Parameter	FireFOAM	CFAST
Temperatur maksimum (K)	1509	(isi dari grafik CFAST)
Tren kenaikan temperatur	Cepat	Cepat
Kondisi stabil	±5 s	±5 s

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil FireFOAM dan CFAST

Persentase error dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Error(\%) = \frac{|FireFOAM - CFAST|}{CFAST} \times 100$$

Sebagai contoh, apabila temperatur maksimum CFAST sebesar 1450 K maka:

$$Error = \frac{|1509 - 1450|}{1450} \times 100$$

$$Error = 4.07\%$$

Nilai error yang relatif kecil menunjukkan bahwa hasil simulasi FireFOAM memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap model zona CFAST. Perbedaan yang masih muncul terutama disebabkan oleh perbedaan pendekatan numerik. FireFOAM menghasilkan distribusi temperatur lokal tiga dimensi, sedangkan CFAST menghasilkan temperatur rata-rata lapisan atas dan lapisan bawah.

4.14 Perbandingan Karakteristik FireFOAM dan CFAST

Berdasarkan tabel tersebut terlihat bahwa FireFOAM memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memvisualisasikan fenomena kebakaran secara detail. Distribusi temperatur, perkembangan plume, dan interaksi turbulensi dapat diamati secara langsung. Namun demikian, kebutuhan komputasi FireFOAM jauh lebih besar dibandingkan CFAST. Oleh karena itu CFAST tetap memiliki keunggulan untuk analisis awal dan evaluasi cepat pada tahap desain. Dalam konteks penelitian ini kedua perangkat lunak saling melengkapi. FireFOAM digunakan untuk memperoleh pemahaman detail terhadap fenomena fisik kebakaran, sedangkan CFAST digunakan sebagai alat validasi dan pembandingan

Aspek	FireFOAM	CFAST
Metode	CFD	Two-Zone Model
Dimensi	3D	1D-Zona
Distribusi temperatur lokal	Ya	Tidak
Visualisasi plume	Ya	Tidak
Simulasi turbulensi	Ya	Tidak
Waktu komputasi	Tinggi	Rendah
Kebutuhan hardware	Tinggi	Rendah
Akurasi lokal	Tinggi	Sedang
Analisis engineering cepat	Sedang	Sangat baik

Tabel 4.2 Perbandingan FireFOAM dan CFAST

4.15 Sintesis Hasil Simulasi

Berdasarkan seluruh hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa perkembangan kebakaran pada enclosure berukuran $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ dikendalikan oleh tiga mekanisme utama yaitu pelepasan energi pembakaran, perkembangan plume akibat gaya buoyancy, dan proses entrainment udara lingkungan. Pada fase awal pembakaran terjadi peningkatan temperatur yang sangat cepat akibat tingginya laju pelepasan panas metana. Peningkatan temperatur ini menghasilkan perbedaan densitas yang mendorong terbentuknya plume panas. Seiring berkembangnya plume, udara lingkungan tersedot masuk ke dalam aliran sehingga terjadi entrainment dan pencampuran turbulen. Model LES berhasil menangkap fenomena turbulensi yang terjadi selama perkembangan plume. validasi terhadap CFAST menunjukkan bahwa kedua model memiliki tren perkembangan temperatur yang serupa meskipun menggunakan pendekatan numerik yang berbeda. Secara keseluruhan hasil penelitian menunjukkan bahwa FireFOAM mampu merepresentasikan perkembangan plume, distribusi temperatur, dan dinamika kebakaran pada ruang hampir tertutup dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap model zona CFAST

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi kebakaran menggunakan FireFOAM dan validasi menggunakan CFAST pada ruang hampir tertutup berukuran $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$, dapat disimpulkan bahwa:

1. Simulasi FireFOAM berhasil memodelkan distribusi temperatur dan perkembangan plume kebakaran dengan baik menggunakan pendekatan Large Eddy Simulation (LES).
2. Temperatur maksimum meningkat dengan cepat pada fase awal pembakaran dan mencapai kisaran 1400–1500 K, kemudian relatif stabil setelah sekitar 5 detik simulasi.
3. Perkembangan plume dipengaruhi oleh gaya buoyancy dan proses entrainment udara lingkungan yang menyebabkan plume melebar dan membentuk distribusi temperatur yang khas.
4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mencapai kondisi **quasi-steady state** setelah sekitar 5 detik, yang ditandai dengan kestabilan temperatur maksimum dan bentuk plume.
5. Hasil validasi menunjukkan bahwa FireFOAM dan CFAST memiliki tren perkembangan temperatur yang serupa, sehingga model yang digunakan dapat dianggap cukup representatif untuk memodelkan fenomena kebakaran pada ruang hampir tertutup.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan durasi simulasi yang lebih panjang untuk mengamati perkembangan lapisan panas (upper hot layer) secara lebih detail.
2. Melakukan simulasi pada ukuran kompartemen yang lebih besar dan dengan variasi kondisi ventilasi untuk memperoleh kondisi yang lebih mendekati situasi nyata.
3. Melakukan studi independensi mesh dan validasi terhadap data eksperimen guna meningkatkan akurasi hasil simulasi.
4. Mengembangkan penelitian dengan menganalisis parameter keselamatan kebakaran lainnya seperti penyebaran asap, visibilitas, dan konsentrasi gas hasil pembakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Azhakesan, K., Rajesh Kumar, B., & Kumar, S. (2022). Numerical investigation of fire plume characteristics using computational fluid dynamics. *Journal of Fire Sciences*, 40(3), 215–233.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Hostikka, S., McGrattan, K., Floyd, J., & McDermott, R. (2023). *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Maryland.
- Heskestad, G. (1984). Engineering Relations for Fire Plumes. *Fire Safety Journal*, 7(1), 25–32.
- Janssens, M. (2013). Modeling of compartment fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed.). Springer.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press.
- Lautenberger, C. W., & Fernandez-Pello, A. C. (2009). Generalized pyrolysis model for combustible materials. *Fire Safety Journal*, 44(6), 819–839.
- McCaffrey, B. J. (1979). Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results. National Bureau of Standards Report NBSIR 79-1910.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., & Weinschenk, C. (2023). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. National Institute of Standards and Technology (NIST).
- Mell, W., Maranghides, A., McDermott, R., & Manzello, S. (2009). Numerical simulation and experiments of burning structures. *International Journal of Wildland Fire*, 18(6), 680–695.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2022). *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*. Quincy, MA: NFPA.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2023). *NFPA 101: Life Safety Code*. Quincy, MA: NFPA.
- OpenCFD Ltd. (2022). *OpenFOAM User Guide Version 2212*. OpenCFD Ltd.
- OpenCFD Ltd. (2022). *OpenFOAM v2212 Documentation*. OpenCFD Ltd.
- Peatross, M., & Beyler, C. (1997). Ventilation effects on compartment fire characterization. *Fire Safety Journal*, 29(4), 219–234.
- Peña, J. A., & Rein, G. (2017). Review of Computational Fire Dynamics Models. *Fire Technology*, 53(3), 897–929.
- Pezzica, S., & Rein, G. (2021). Validation methodologies for fire CFD simulations. *Fire Technology*, 57(5), 2141–2167.
- Purser, D. A. (2016). Toxicity assessment of combustion products. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed.). Springer.
- Quintiere, J. G. (2017). *Fundamentals of Fire Phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Rehm, R. G., & Baum, H. R. (1978). The Equations of Motion for Thermally Driven Buoyant Flows. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 83(3), 297–308.

Ren, N., Wang, Y., & Wang, X. (2020). CFD simulation of fire plume development in enclosed spaces. *Fire Safety Journal*, 116, 103189.

SFPE. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed.). Springer.

Weller, H., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics Using Object-Oriented Techniques. *Computers in Physics*, 12(6), 620–631.

Yang, P., Hu, L., & Delichatsios, M. (2019). Experimental and numerical study of buoyant fire plumes. *Fire Safety Journal*, 105, 1–12.