



**STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN GAS BERBAGAI
POLUTAN MENGGUNAKAN SIMULASI CFD
(*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*)**

SKRIPSI

Oleh

Nuroh Hidayati

NIM 151810201017

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2019**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh syukur, dan terimakasih yang sebesar-besarnya untuk :

1. Abi Badrus Samsi, Ibu Khotim serta Ibu Siti Julaiha atas segala do'a yang selalu dipanjatkan, motivasi, nasehat, kasih sayang, serta pengorbanan yang telah dilakukan untuk saya selama ini;
2. Ketiga kakak terhebat saya yang selalu menjadi teladan untuk tetap berjuang dalam menyelesaikan tugas akhir ini;
3. Para pengajar sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat bagi saya;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Terimakasih yang tak terhingga saya ucapkan, hanya sebuah karya kecil dan untaian kata-kata ini yang dapat saya persembahkan kepada kalian semua. Atas segala kekurangan dan kekhilafan saya, mohon maaf yang sebesar-besarnya. Demikian skripsi ini saya persembahkan.

MOTTO

Sesungguhnya bersama kesukaran itu ada kemudahan.
Karena itu bila kau telah selesai (mengerjakan yang lain)
dan kepada Tuhan, berharaplah
(Q.S Al Insyirah : 6-8)^{*)1}



^{*)} Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Semarang : PT Kumudasmoro Grafindo



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nuroh Hidayati

NIM : 151810201017

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Studi Karakteristik Aliran Gas Berbagai Polutan Menggunakan Simulasi CFD(*Computational Fluid Dynamics*)” adalah benar-benar hasil karya saya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 15 Juli 2019

Yang menyatakan,

Nuroh Hidayati

NIM 151810201017

SKRIPSI

**STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN GAS BERBAGAI POLUTAN
MENGUNAKAN SIMULASI CFD (*COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS*)**

Oleh

Nuroh Hidayati

NIM 151810201017

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Endhah Purwandari, S.Si, M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Artoto Arkundato, S.Si, M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Studi Karakteristik Aliran Gas Berbagai Polutan Menggunakan Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)” karya Nuroh Hidayati telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal :

Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji :

Ketua,

Anggota I,

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.

Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si.

NIP. 198111112005012001

NIP. 196912251999031001

Anggota II,

Anggota III,

Dr. LutfiRohman, S.Si., M.Si.

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si

NIP. 197208201998021001

NIP. 197003271997022001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D

NIP. 196102041987111001



RINGKASAN

Studi Karakteristik Aliran Gas Berbagai Polutan Menggunakan Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*); Nuroh Hidayati, 151810201017; 2019: 67 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Fluida didefinisikan sebagai suatu zat yang mampu mengalir dari suatu tempat ke tempat lainnya. Suatu zat yang dikategorikan sebagai fluida yaitu zat gas dan zat cair. Fluida membawa banyak keuntungan dalam kehidupan sehari-hari, sehingga fluida banyak dimanfaatkan oleh masyarakat. Selain memiliki keuntungan, fluida juga membawa dampak negatif bagi lingkungan. Salah satu sifat fluida yang dapat membawa dampak negatif bagi lingkungan yaitu gas polutan dari hasil proses pembakaran oleh boiler. Sifat fluida yang terdapat pada gas polutan perlu dipelajari agar dapat mengetahui karakteristik aliran gas.

Karakteristik fluida secara umum dapat dipelajari berdasarkan dua parameter diantaranya laju alir dan tekanan. Kedua parameter tersebut telah dianalisis oleh beberapa peneliti sebelumnya menggunakan metode simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Beberapa penelitian sebelumnya telah mensimulasikan laju alir gas, tekanan, serta perbedaan temperatur gas yang melewati saluran berbentuk cerobong. Metode CFD adalah metode simulasi yang umum digunakan untuk mengetahui fenomena aliran fluida. CFD adalah ilmu komputasi untuk melakukan simulasi aliran fluida dan fenomena aliran lainnya dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes secara numerik. Penggunaan CFD awal digunakan sekitar tahun 1990-an di dunia industri terutama pada industri penerbangan. Tujuan simulasi menggunakan metode CFD yaitu dapat mengetahui fenomena aliran fluida baik berupa cair maupun gas.

Penelitian ini diawali dengan kajian pustaka dari beberapa penelitian sebelumnya. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui karakteristik laju alir dan tekanan gas yang melewati geometri ruang berupa silinder. Penelitian ini

dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak simFlow. SimFlow merupakan perangkat lunak berbasis CFD. Tahap simulasi diawali dengan *pre-processing* yaitu meliputi penginputan geometri ruang ke simFlow dan pengaturan meshing pada geometri ruang. Tahap selanjutnya yang disebut *processing* meliputi penentuan solver, pengaturan *boundary condition*, dan pengaturan lainnya. Hasil dari tahap *processing* menghasilkan grafik residual yang dapat dianalisis lebih lanjut lagi ke tahap *post-processing* untuk melihat visualisasi pergerakan gas polutan. Simulasi laju alir gas dan tekanan gas dilakukan pada variasi jenis gas polutan yang berbeda. Jenis gas polutan yang digunakan meliputi CO, SO₂, dan NO dengan menginputkan nilai viskositas kinematik dari ketiga jenis gas polutan. Data output yang diperoleh berupa nilai laju alir gas dan tekanan gas untuk seluruh variasi jenis gas polutan. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa laju alir gas polutan (NO, SO₂, CO) dipengaruhi oleh nilai viskositas kinematik dari gas polutan. Hubungan laju alir gas polutan berbanding terbalik dengan nilai viskositas kinematik gas polutan. Tekanan gas polutan yang dihasilkan dipengaruhi oleh laju alir gas polutan, dimana tekanan gas polutan berbanding lurus dengan laju alir gas polutan. Berdasarkan laju alir maksimum yang dihasilkan dari ketiga gas polutan selama 200 sekon maka dapat disimpulkan bahwa gas SO₂ menunjukkan pergerakan gas yang lebih cepat. Hal ini dikarenakan nilai viskositas kinematik gas SO₂ lebih kecil daripada gas NO dan CO yaitu sebesar $0,689 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Gas CO merupakan gas yang bergerak paling lambat daripada jenis gas lainnya karena nilai viskositas kinematik gas CO termasuk nilai yang terbesar ($\nu = 1,420 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena atas berkat, rahmat serta hidayah-NYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Karakteristik Aliran Gas Berbagai Polutan Menggunakan Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)”. Sholawat dan salam semoga senantiasa selalu menuntun dan mengiringi langkah dan aktivitas kita dalam melangkah menggapai ridho-NYA. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata 1 (S-1) Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, mendampingi, dan mengarahkan penulis dalam menyusun skripsi ini. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Ibu Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing Anggota sekaligus Dosen Pembimbing Akademik yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga dan perhatian dalam membantu penulisan skripsi ini;
2. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Utama dan Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Segenap Dosen dan Karyawan Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu membantu dan mendukung;
4. Kekasih tercinta (Reza) yang tiada henti memberi motivasi, nasehat serta pengorbanan yang tak terbatas;
5. Teman-teman komputasi, partner skripsi (Eka), Ganesha Phi'15, UKMS TITIK, dan teman-teman KKN yang telah banyak membantu dan memberi semangat;



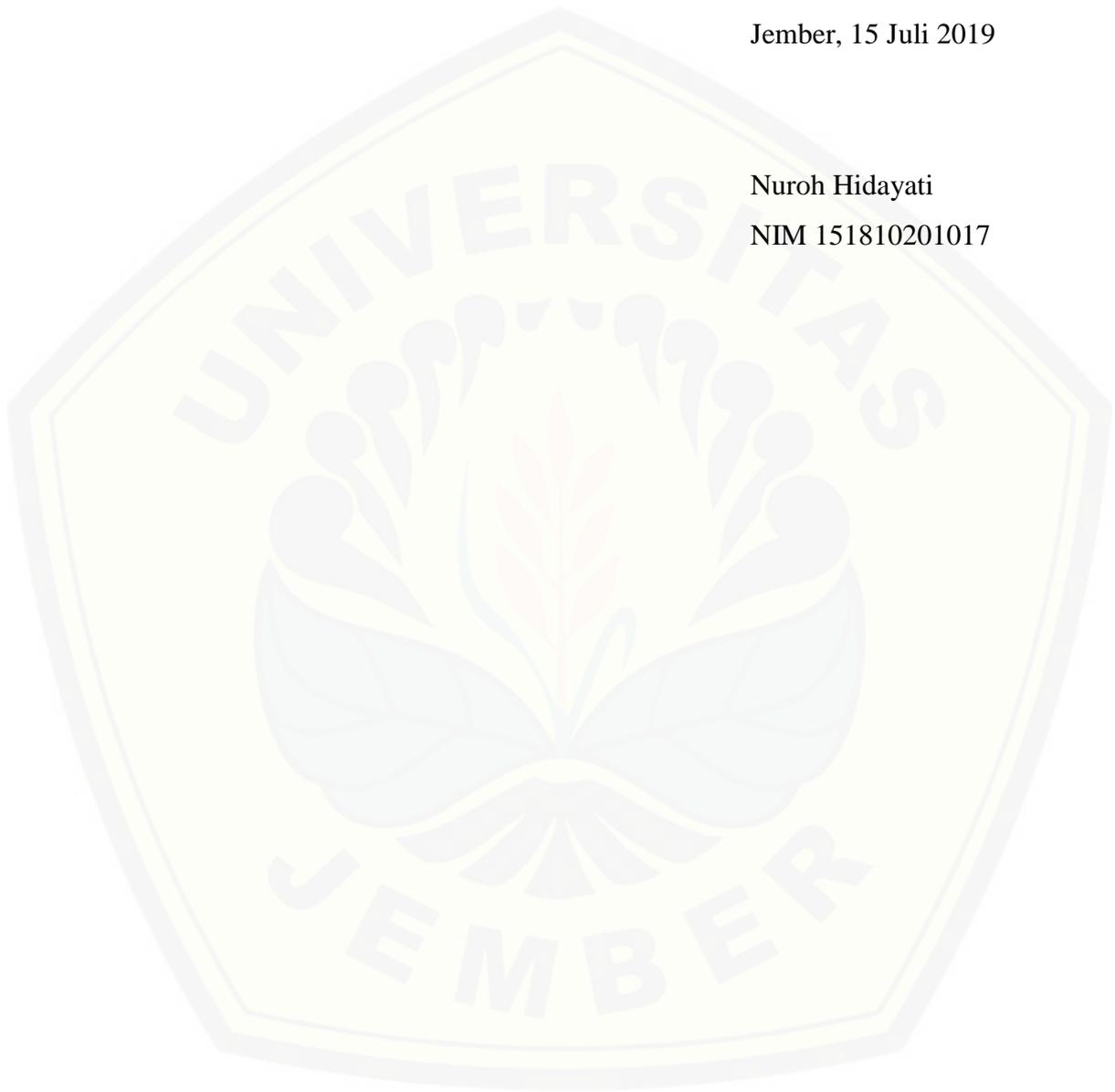
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu;

Penulis sadar bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis berharap skripsi ini dapat dimanfaatkan sebagaimana mestinya.

Jember, 15 Juli 2019

Nuroh Hidayati

NIM 151810201017



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. DASAR TEORI.....	6
2.1 Karakteristik Aliran Fluida	6
2.2 Sifat Fisis Fluida.....	9
2.2.1 Kecepatan atau laju alir fluida	9
2.2.2 Kerapatan atau <i>density</i>	11
2.2.3 Tekanan.....	13
2.2.4 Viskositas.....	14

2.3 Pengertian Emisi Gas Buang	16
2.3.1 Karbon Monoksida (CO)	16
2.3.2 Nitrogen Oksida (NO)	17
2.3.3 Sulfur Dioksida (SO ₂).....	17
2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)	18
2.4.1 Proses CFD	19
2.4.2 Persamaan Umum Aliran Fluida.....	21
2.4.3 Metode Diskritisasi CFD	23
2.4.4 Jenis-jenis Solver CFD	24
2.5 SimFlow	26
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Rancangan Penelitian	28
3.2 Jenis dan Sumber Data.....	29
3.3 Definisi Operasional Variabel.....	30
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah	30
3.5 Prosedur Simulasi CFD.....	31
3.6 Metode Analisis Data.....	41
3.6.1 Analisis Laju Alir pada Gas Berbagai Polutan	41
3.6.2 Analisis Tekanan Gas pada Berbagai Polutan	42
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Laju Alir Gas Berbagai Polutan.....	43
4.2 Tekanan Gas Berbagai Polutan.....	52
BAB 5. PENUTUP.....	60
5.1 Kesimpulan.....	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR GAMBAR

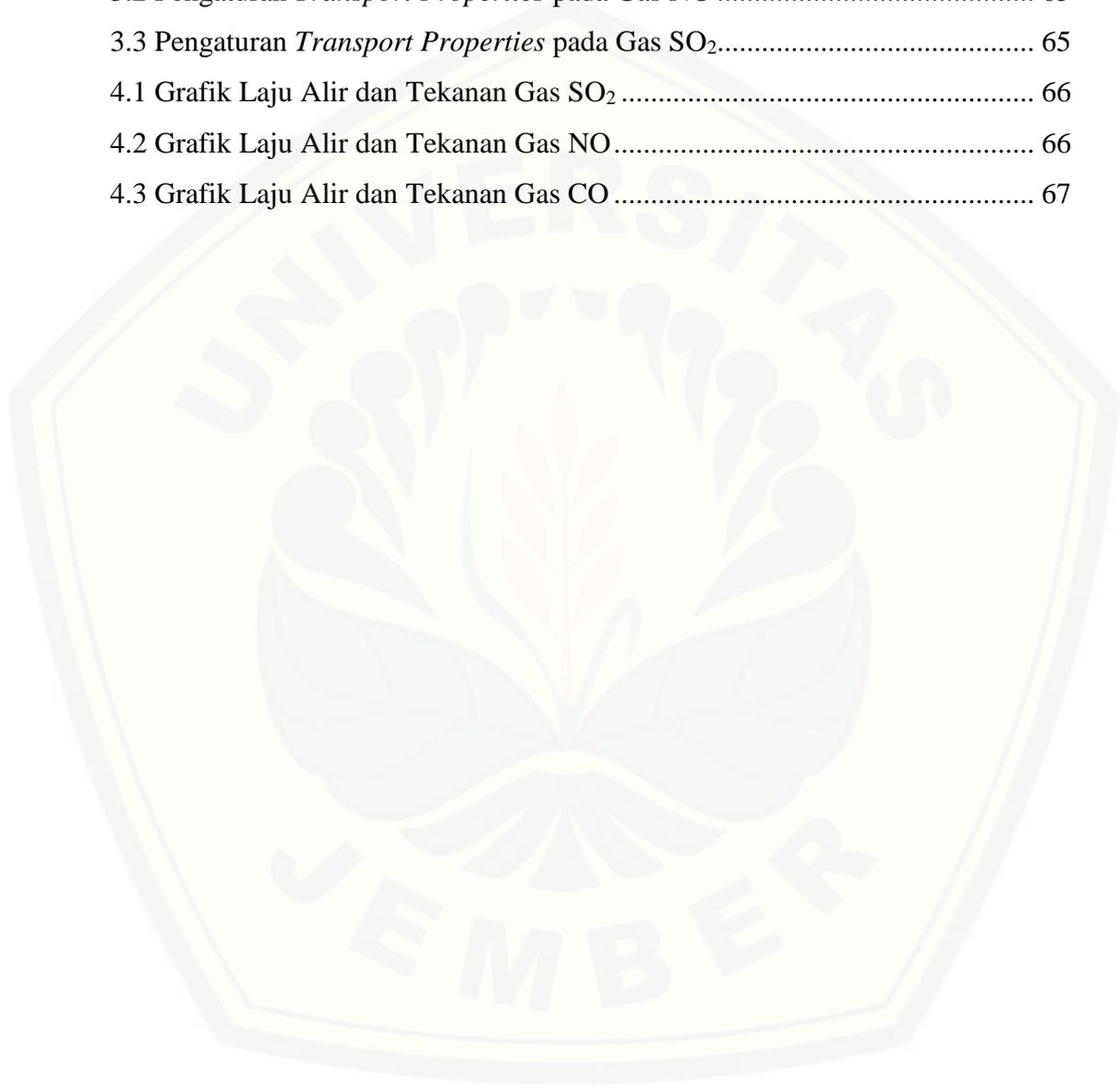
	Halaman
2.1 Aliran Laminar	7
2.2 Aliran Transisi	7
2.3 Aliran Turbulen	8
2.4 Aliran Fluida pada pipa	11
3.1 Diagram alir rancangan penelitian	29
3.2 Diagram alir proses simulasi	31
3.3 Cara input file script ke simFlow	32
3.4 Desain geometri ruang berupa silinder	32
3.5 Desain geometri ruang berupa balok	33
3.6 Pengaturan <i>meshing</i> pada geometri ruang	34
3.7 Desain balok <i>mesh</i>	34
3.8 Pengaturan nilai minimum, maksimum, nilai divisi pada balok <i>mesh</i>	35
3.9 Pengaturan batas-batas <i>mesh</i> pada sisi-sisi balok <i>mesh</i>	35
3.10 Pengaturan diskritisasi	37
3.11 Pengaturan <i>transport properties</i>	37
3.12 Pengaturan kondisi batas <i>cylinder_inlet</i>	39
3.13 Pengaturan kondisi batas <i>inlet</i>	40
3.14 Pengaturan <i>time control</i>	41
4.1 Grafik hubungan laju alir (U _x , U _y , U _z ,U _r) gas NO terhadap waktu	44
4.2 Grafik hubungan laju alir (U _x , U _y , U _z ,U _r) gas SO ₂ terhadap waktu	46
4.1 Grafik hubungan laju alir (U _x , U _y , U _z ,U _r) gas CO terhadap waktu	48
4.4 Grafik hubungan resultan laju alir (U _r) gas NO,SO ₂ ,CO terhadap waktu	49
4.5 Grafik hubungan tekanan gas NO,SO ₂ ,CO terhadap waktu	49
4.6 Grafik hubungan resultan laju alir dan tekanan gas NO terhadap waktu	50
4.7 Grafik hubungan resultan laju alir dan tekanan gas SO ₂ terhadap waktu	51
4.8 Grafik hubungan resultan laju alir dan tekanan gas CO terhadap waktu	51

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Jenis bahan dan massa jenisnya	12
2.2 Viskositas dinamik gas	15
3.1 Pengaturan <i>meshing</i> pada geometri ruang	33
3.2 Pengaturan batas-batas <i>domain</i>	36
3.3 Parameter input dari gas polutan.....	38
4.1 Hasil simulasi laju alir gas dan tekanan gas NO	43
4.2 Hasil simulasi laju alir gas dan tekanan gas SO ₂	45
4.3 Hasil simulasi laju alir gas dan tekanan gas CO	47

DAFTAR LAMPIRAN

3.1 Pengaturan <i>Transport Properties</i> pada Gas CO	64
3.2 Pengaturan <i>Transport Properties</i> pada Gas NO	65
3.3 Pengaturan <i>Transport Properties</i> pada Gas SO ₂	65
4.1 Grafik Laju Alir dan Tekanan Gas SO ₂	66
4.2 Grafik Laju Alir dan Tekanan Gas NO	66
4.3 Grafik Laju Alir dan Tekanan Gas CO	67





BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fluida merupakan jenis zat yang memiliki sifat mampu mengalir dari satu tempat ke tempat lain dan tidak dapat menolak adanya perubahan/deformasi saat diberikan beban tegangan geser kepadanya (White, 1994). Secara umum, fluida diklasifikasikan menjadi dua yakni zat cair dan zat gas (Nakayama, 1999). Sifat kemudahannya di dalam mengalir, membuat fluida banyak diaplikasikan pada berbagai aktivitas manusia. Sebagai contoh adalah penggunaan pompa hidrolik ban sepeda yang memanfaatkan hukum Pascal, dimana tekanan yang diberikan pada gas di ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama besar (Sitorus, 2008). Namun demikian, sifat alir fluida juga membawa permasalahan bagi lingkungan, saat dijumpai adanya gas buangan sebagai hasil dari proses pembakaran oleh boiler.

Karakteristik aliran fluida dipelajari berdasarkan dua parameter utama, yakni kecepatan dan tekanan fluida. Secara simulasi, kedua parameter tersebut telah dianalisis karakteristiknya saat melewati saluran berbentuk cerobong, dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Ehsan (2018) telah mengamati adanya perbedaan distribusi kecepatan dan temperatur udara dalam cerobong asap dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pada keadaan tanpa beban (turbin tidak beroperasi), penurunan tekanan turbin menyebabkan kecepatan udara yang melalui cerobong mengalami penurunan. Akibatnya, besarnya temperatur di dalam cerobong juga mengalami penurunan. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa suhu pada saat turbin beroperasi lebih tinggi daripada suhu pada saat kondisi tanpa beban (Ehsan, 2018).

Metode CFD juga telah digunakan untuk mempelajari fenomena angin saat melewati penghalang berupa cerobong asap dengan menggunakan ANSYS. Mohsin (2016) telah mensimulasikan aliran angin di sekitar cerobong asap, sehingga dapat diketahui besarnya tekanan angin, kecepatan angin dan gaya yang dihasilkan oleh pergerakan angin pada berbagai variasi ketinggian cerobong. Hasil

penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketiga parameter tersebut semakin kecil nilainya jika ukuran tinggi cerobong juga semakin pendek. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa faktor penghalang aliran fluida mempengaruhi karakteristik aliran dari fluida itu sendiri (Mohsin, 2016).

Besarnya tekanan dan laju alir (kecepatan) gas dalam sebuah saluran dapat dipengaruhi pula oleh karakteristik jenis gas yang dikandung. Kusman (2017) telah melakukan penelitian tentang simulasi kecepatan aliran gas pada beberapa jenis gas polutan. Gas polutan yang divariasikan yaitu gas SO_x, NO_x, dan CO. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut yaitu terdapat perbedaan konsentrasi berbagai gas polutan dengan nilai laju alir gas yang sama. Kusman juga membuat variasi besar kecepatan udara pada setiap jenis gas polutan. Berdasarkan dari penelitian tersebut, data yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa nilai kecepatan udara yang divariasikan menghasilkan besar konsentrasi gas yang hampir sama untuk satu jenis gas. Karakteristik laju alir gas polutan di dalam penelitian ini akan dipelajari dengan menggunakan metode CFD.

CFD merupakan ilmu yang mempelajari perilaku aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, transpor massa, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan matematis seperti persamaan Navier-Stokes. CFD adalah ilmu komputasi yang menggunakan komputer untuk melakukan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena aliran lainnya dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes secara numerik. Penggunaan CFD awal digunakan sekitar tahun 1990-an di dunia industri terutama pada industri penerbangan. CFD berkembang secara cepat menjadi komponen vital di dalam dunia industri khususnya desain produk, manufaktur, serta optimasi. CFD banyak digunakan dalam menganalisis permasalahan yang berkaitan dengan aliran fluida. Simulasi menggunakan metode CFD harus dapat menjelaskan fenomena aliran fluida yang bergerak. Perangkat lunak berbasis CFD yang umum digunakan antara lain ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, FloVent, PHOENICS, CFD2000, *Flow Simulation SolidWorks* dan FloEFD (Fermi, 2014).

Penelitian yang akan dilakukan selanjutnya yaitu simulasi CFD menggunakan perangkat lunak simFlow. SimFlow adalah perangkat lunak CFD

yang dapat dioperasikan baik di bawah Windows maupun Linux *operating system*. Perangkat lunak simFlow merupakan software CFD yang kuat untuk kebutuhan simulasi aliran fluida. SimFlow dilengkapi dengan pustaka (*library*) OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*). OpenFOAM adalah CFD toolbox gratis yang bersifat non-komersil karena termasuk paket perangkat lunak *open source* yang diproduksi oleh *OpenCFD Ltd*. Keunggulan simFlow yaitu dapat membuat dan mengimpor mesh, mendefinisikan kondisi batas, menentukan parameter, menjalankan simulasi, menghitung secara parallel dengan hanya satu kali klik, dan melihat hasil *pro-processing* dengan *Para-View* (Teknologi SIMFLOW, 2012).

Karakteristik aliran gas yang akan dipelajari pada penelitian ini, disimulasikan dengan menggunakan geometri berbentuk silinder. Adapun beberapa jenis gas polutan yang menjadi objek untuk dianalisis adalah CO, NO, dan SO₂. Ketiga jenis polutan tersebut banyak muncul sebagai gas buangan akhir dalam proses pembakaran. Proses pembakaran sempurna bahan bakar terjadi jika ada pasokan oksigen yang cukup. Oksigen (O₂) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20,9% dari udara. Kandungan udara hampir 79% (tanpa adanya oksigen) merupakan nitrogen, dan sisanya merupakan elemen lainnya. Nitrogen merupakan gas yang dapat mengurangi efisiensi pembakaran dengan cara menyerap panas dari pembakaran bahan bakar dan mengencerkan gas buang. Proses pembakaran yang tidak sempurna akan terjadi ketika hasil dari pembakaran masih menghasilkan gas buang karbon monoksida (CO) (Praja, 2006). Proses simulasi dilakukan dengan tiga tahapan sehingga nantinya didapatkan hasil yang dapat diamati secara visual. Ketiga tahap tersebut meliputi *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*. *Pre-processing* dilakukan pada saat menginput geometri berupa silinder. *Solving* dilakukan saat menginput kondisi batas dan kondisi awal serta parameter jenis gas yang digunakan. *Post-processing* dilakukan dengan cara menjalankan data yang telah diinput sehingga visualisasi gas yang keluar dari ruang geometri berbentuk silinder dapat diamati.



Hasil simulasi diharapkan dapat menunjukkan karakteristik kecepatan alir dan tekanan berbagai gas polutan yang dianalisis terhadap perubahan waktu pengamatan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dari kegiatan penelitian ini adalah;

1. Bagaimanakah distribusi kecepatan aliran gas polutan yang disimulasikan dengan menggunakan metode dinamika fluida berbasis simFlow?
2. Bagaimanakah karakteristik tekanan dari gas polutan yang disimulasikan dengan menggunakan metode dinamika fluida berbasis simFlow?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik laju alir gas berbagai polutan. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sumber emisi gas polutan berasal dari aliran gas dengan geometri ruang berbentuk silinder. Pemodelan simulasi yang digunakan yaitu dalam bentuk penampang 3 Dimensi (3D). Gas polutan yang disimulasikan meliputi CO, SO₂, dan NO.

1.4 Tujuan Penelitian

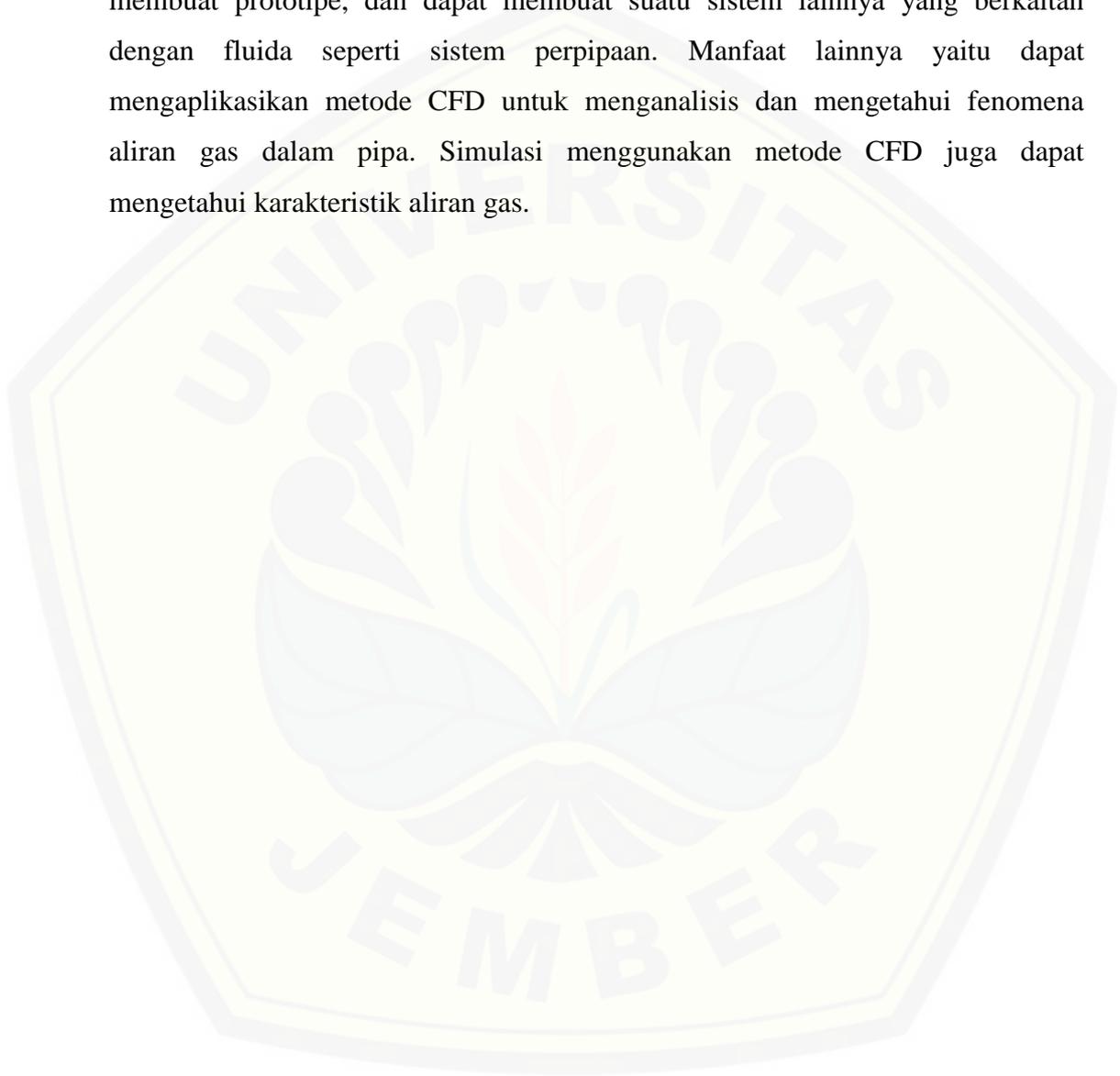
Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian yang akan dilakukan adalah:

1. Mengetahui distribusi kecepatan aliran gas polutan yang disimulasikan dengan menggunakan metode dinamika fluida berbasis simFlow.
2. Mengetahui karakteristik tekanan dari gas polutan yang disimulasikan dengan menggunakan metode dinamika fluida berbasis simFlow.



1.5 Manfaat

Penelitian ini memiliki manfaat yaitu dapat mengetahui aplikasi penggunaan CFD. Aplikasi CFD banyak dimanfaatkan dalam bidang industri dan teknologi terutama pada industri penerbangan. Metode CFD dimanfaatkan untuk membuat prototipe, dan dapat membuat suatu sistem lainnya yang berkaitan dengan fluida seperti sistem perpipaan. Manfaat lainnya yaitu dapat mengaplikasikan metode CFD untuk menganalisis dan mengetahui fenomena aliran gas dalam pipa. Simulasi menggunakan metode CFD juga dapat mengetahui karakteristik aliran gas.



BAB 2. DASAR TEORI

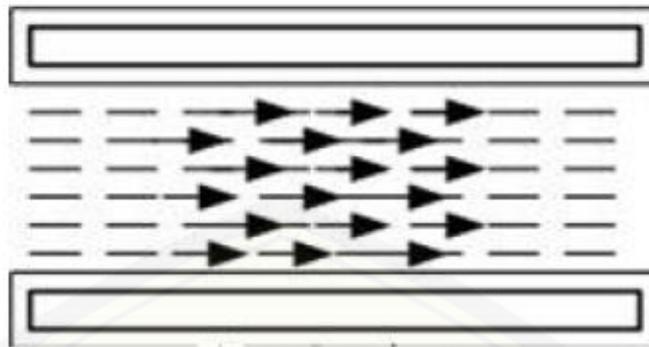
2.1 Karakteristik Aliran Fluida

Fluida merupakan suatu zat yang dapat mengalir dari tempat satu ke tempat lainnya. Zat yang dapat dikatakan fluida yaitu zat cair dan zat gas. Secara umum, jenis fluida yang banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari adalah zat gas. Gas tidak mempunyai bentuk volume yang tetap. Gas akan berkembang mengisi seluruh wadah. Zat cair juga memiliki sifat yang sama dengan zat gas. Zat cair dan zat gas memiliki sifat yang sama sehingga keduanya mempunyai kemampuan untuk mengalir dan dapat dikategorikan sebagai fluida (Olson, 1990). Salah satu cara untuk menjelaskan gerak suatu fluida adalah dengan cara membagi fluida menjadi elemen volume yang lebih kecil disebut partikel fluida. Aliran fluida dapat dikategorikan ke dalam banyak jenis antara lain, aliran laminar, aliran transisi, aliran turbulen, aliran *incompressible*, aliran *compressible*, aliran *steady*, aliran *unsteady (transient)*. Berdasarkan variasi parameter aliran terhadap waktu, jenis aliran fluida dapat dikategorikan sebagai berikut (Olson, 1990) :

1. Aliran tunak (*steady*) adalah suatu aliran dimana kecepatannya tidak berpengaruh terhadap perubahan waktu sehingga kecepatannya konstan di setiap titik (tidak mempunyai percepatan).
2. Aliran tidak tunak (*unsteady*) adalah suatu aliran dimana terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu. Aliran *unsteady* juga disebut aliran *transient*.

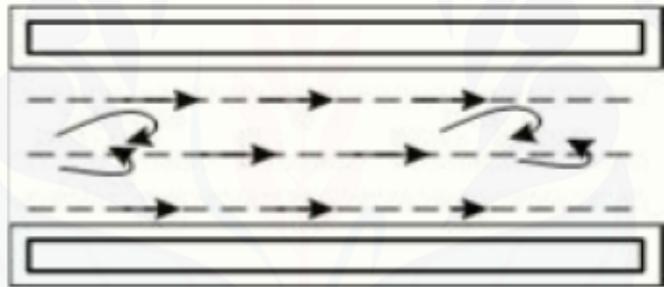
Berdasarkan pergerakan fluida, aliran fluida dapat dikategorikan menjadi tiga yaitu (Triatmodjo, 1991):

1. Aliran laminar adalah aliran fluida yang bergerak dalam lapisan dengan satu lapisan meluncur secara lancar seperti pada Gambar 2.1. Viskositas dalam aliran laminar berfungsi untuk meredam kecenderungan terjadinya gerakan relatif antar lapisan. Kecepatan pada aliran laminar lebih rendah dan fluida bergerak menurut garis lurus kontinu.



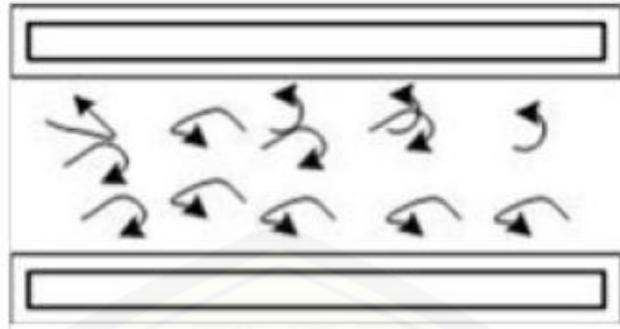
Gambar 2.1 Aliran Laminar (Sumber :Triatmodjo, 1991)

2. Aliran transisi adalah aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Gambaran aliran transisi dapat dilihat pada Gambar 2.2. Peralihan ini tergantung pada viskositas fluida, kecepatan dan lain-lain yang menyangkut geometri aliran.



Gambar 2.2 Aliran Transisi (Sumber :Triatmodjo, 1991)

3. Aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel-partikel fluidanya bergerak secara tidak menentu karena mengalami pencampuran serta putaran partikel antar lapisan seperti pada Gambar 2.3. Keadaan aliran turbulen membangkitkan tegangan geser yang merata di seluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian-kerugian aliran. Kecepatan aliran turbulen lebih tinggi daripada aliran laminar, dan pergerakan fluida saling tercampur satu sama lain.



Gambar 2.3 Aliran Turbulen (Sumber :Triatmodjo,1991)

Penentuan tipe aliran fluida ditentukan melalui beberapa parameter yang menyatakan karakteristik aliran fluida. Salah satu parameter yang menentukan tipe aliran fluida adalah bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang dapat membedakan suatu tipe aliran laminar, turbulen maupun transisi. Secara matematis rumus bilangan Reynolds dapat diuraikan sebagai berikut (Charles, 2007) :

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

Keterangan :

Re = Bilangan Reynolds

V = Kecepatan fluida (m/s)

D = Diameter pipa (m)

ρ = Rapat massa fluida (kg/m^3)

μ = Viskositas Dinamik fluida (kg/ms) atau (N.s/m^2)

Aliran fluida dapat dikategorikan sebagai aliran laminar jika memiliki bilangan Reynolds kurang dari 2300 ($Re < 2300$). Aliran fluida dapat dikategorikan sebagai aliran transisi jika memiliki bilangan Reynolds antara 2300-4000 ($2300 < Re < 4000$). Aliran fluida dapat dikategorikan sebagai aliran turbulen jika memiliki bilangan Reynolds lebih dari 4000 ($Re > 4000$) (Charles, 2007).

Berdasarkan kemampumampatannya, aliran fluida dikategorikan menjadi dua yaitu (Henry, 2008) :

1. Aliran *compressible* adalah aliran fluida yang massa jenisnya dapat berubah apabila diberikan suatu tekanan tertentu di sepanjang aliran. Aliran

compressible jika diberikan suatu tekanan maka dapat menyebabkan volume dari partikel-partikel fluida menjadi terkompres atau menjadi lebih kecil. Contoh aliran *compressible* adalah gas yang ada di dalam botol. Botol yang diberi tekanan maka menyebabkan volume dalam botol semakin kecil. Volume botol yang semakin kecil mengakibatkan perbandingan massa gas dan terhadap volume botol menjadi semakin besar.

2. Aliran *incompressible* adalah aliran fluida yang massa jenisnya konstan di sepanjang aliran. Aliran *incompressible* memiliki massa jenis yang konstan dikarenakan butuh tekanan yang sangat besar untuk mengubah massa jenisnya. Contoh aliran *incompressible* yaitu aliran gas tertentu pada sayap pesawat atau aliran air di sekitar kapal yang bergerak.

2.2 Sifat Fisis Fluida

Secara umum, fluida dibagi dua yaitu fluida statis dan fluida dinamis. Fluida statis adalah fluida yang berada dalam fase tidak bergerak (diam) atau fluida dalam keadaan bergerak tetapi tidak ada perbedaan kecepatan antar partikel fluida tersebut (Victor, 1988). Fluida dinamis adalah suatu fluida (berupa cair atau gas) yang bergerak dan memiliki kecepatan yang konstan terhadap waktu. Fluida dinamis meliputi beberapa parameter yaitu persamaan kontinuitas, persamaan Bernoulli, viskositas. Sifat fisis fluida antara lain kerapatan (*density*), tegangan permukaan, kapilaritas, viskositas, tekanan. Sifat fisis fluida dapat dijadikan sebagai parameter fluida statis dan fluida dinamis. Fluida statis meliputi beberapa parameter yaitu tekanan, tegangan permukaan, kapilaritas. Fluida dinamis meliputi beberapa parameter yaitu persamaan kontinuitas, persamaan Bernoulli, viskositas (Nasruddin, 2013).

2.2.1 Kecepatan atau Laju Alir Fluida

Laju alir fluida dapat diketahui dari laju alir massa. Laju alir massa dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut (Nasruddin, 2013):

$$\dot{m} = \frac{V \cdot A}{v} \quad (2.2)$$

Keterangan :

\dot{m} = laju aliran massa (kg/s)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

v = volume jenis (m^3/kg)

A = luas penampang pipa (m^2)

Laju aliran adalah volume fluida yang dikeluarkan tiap detiknya. Laju aliran dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut (Nasruddin, 2013) :

$$Q = V \cdot A \quad (2.3)$$

Keterangan :

Q = debit aliran (m^3/s)

V = kecepatan aliran (m/s)

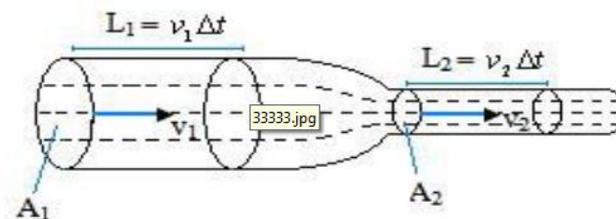
A = Luas penampang (m^2)

Laju aliran melalui A_1 dan A_2 harus sama, dengan demikian dapat dilihat pada persamaan di bawah (Nasruddin, 2013) :

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2 \quad (2.4)$$

Persamaan 2.4 disebut persamaan kontinuitas. Nilai $\rho_1 = \rho_2$, maka persamaan kontinuitas secara matematis menjadi persamaan 2.5 dan gambar penjelasan kontinuitas dapat dijelaskan pada Gambar 2.4 (Nasruddin, 2013) :

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (2.5)$$



Gambar 2.4 Aliran fluida pada pipa (Sumber : Munson, 2003)

Keterangan :

L_1 = panjang lintasan pada silinder 1 (m)

v_1 = kecepatan fluida pada silinder 1 (m/s)

Δt = waktu

A_1 = luas penampang silinder 1 (m^2)

L_2 = panjang lintasan pada silinder 2 (m)

v_2 = kecepatan fluida pada silinder 2 (m/s)

A_2 = luas penampang silinder 2 (m^2)

2.2.2 Kerapatan (density)

Kerapatan dapat dinyatakan dalam bentuk massa jenis, volume jenis, berat jenis, dan *specific gravity*. Massa jenis merupakan ukuran suatu konsentrasi zat tertentu dan dinyatakan dalam massa per satuan volume. Massa jenis berfungsi untuk menentukan zat. Setiap zat memiliki massa jenis yang berbeda. Satuan SI massa jenis yaitu kg/m^3 . Secara matematis, massa jenis dapat dituliskan ke persamaan berikut (Giles, 1997) :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

Keterangan :

m = Massa (kg atau gr)

V = Volume (m^3)

ρ = Massa Jenis (kg/m^3 atau gr/cm^3)



Jenis beberapa bahan dan massa jenisnya dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut (Giles,1997) :

Tabel 2.1 Jenis bahan dan massa jenisnya

Bahan	Massa Jenis (g/cm ³)	Bahan	Massa Jenis (g/cm ³)
Air	1,00	Gliserin	1,26
Aluminium	2,7	Kuningan	8,6
Baja	7,8	Perak	10,5
Benzena	0,9	Platina	21,4
Besi	7,8	Raksa	13,6
Emas	19,3	Tembaga	8,9
Es	0,92	Timah Hitam	11,3
Etil Alkohol	0,81	Udara	0,0012
Carbon	3,51	CO ₂	0,00198
Belerang (S)	2,07	SO ₂	0,00263
Nitrogen	0,00117	NO ₂	2,62

Sumber : Streeter, 1993

Volume jenis (v) adalah kebalikan dari massa jenis atau volume yang ditempati oleh satuan massa zat. Voume jenis dapat dijelaskan dengan persamaan matematis sebagai berikut (Triatmodjo, 1991) :

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (2.7)$$

Berat jenis adalah gaya gravitasi terhadap massa yang terkandung dalam satuan volume zat. Berat jenis dapat dijelaskan dengan persamaan matematis (Triatmodjo, 1991) :

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.8)$$

Keterangan :

γ = berat jenis (kg/m² s²)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Spesific gravity (*s.g*) adalah sifat yang digunakan untuk memperbandingkan kerapatan suatu zat dengan kerapatan air. Kerapatan suatu zat cair bergantung pada temperatur dan tekanan, serta temperatur air dijadikan sebagai acuan, sehingga *specific gravity* dapat dirumuskan sebagai berikut (Nasruddin, 2013) :

$$s.g = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (2.9)$$

Keterangan :

$s.g$ = *specific gravity*

ρ_w = kerapatan air (kg/m^3)

2.2.3 Tekanan

Fluida (cair atau gas) yang berada dalam keadaan tenang, maka akan memberikan gaya yang tegak lurus ke seluruh permukaan kontakannya. Tekanan dapat didefinisikan sebagai gaya normal per satuan luas. Satuan SI tekanan adalah pascal dimana 1 pascal = 1 Pa = 1 N/m². Secara umum, tekanan dapat dirumuskan sebagai berikut (Triatmodjo, 1991) :

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (2.10)$$

Keterangan :

P = tekanan (Pa)

F = gaya normal (N)

A = luas (m^2)

Tekanan atmosfer adalah tekanan atmosfer bumi dimana tekanan ini berubah berdasarkan perubahan cuaca dan ketinggian. Tekanan atmosfer normal adalah 1 atmosfer(atm) tepatnya 101.325 Pa. Tekanan hidrostatis adalah tekanan yang terjadi di bawah air. Tekanan hidrostatis disebabkan oleh fluida tak bergerak. Tekanan hidrostatis yang dialami oleh suatu titik di dalam fluida diakibatkan oleh gaya berat fluida yang berada di atas titik tersebut. Persamaan tekanan oleh fluida dituliskan sebagai berikut (Giles, 1997):

$$P = \rho V g / A \quad (2.11)$$

Volume fluida di dalam bejana merupakan hasil perkalian antara luas permukaan bejana (A) dan tinggi fluida dalam bejana (h). Persamaan tekanan hidrostatik di dasar bejana akibat fluida setinggi h dapat dituliskan sebagai berikut (Giles, 1997):

$$P_h = \frac{\rho(Ah)g}{A} = \rho gh \quad (2.12)$$

Keterangan :

P_h = tekanan hidrostatik (N/m^2)

A = Luas permukaan (m^2)

h = tinggi bejana (m)

g = gravitasi (m/s^2)

2.2.4 Viskositas

Viskositas adalah ukuran ketahanan suatu fluida terhadap deformasi atau perubahan-perubahan bentuk. Viskositas zat cair cenderung menurun seiring dengan naiknya temperatur. Hal ini disebabkan gaya-gaya kohesi pada zat cair bila dipanaskan akan mengalami penurunan viskositas dari zat cair tersebut. Viskositas dibagi menjadi dua yaitu (Streeter, 1993):

1. Viskositas Dinamik

Viskositas dinamik atau viskositas mutlak adalah sifat fluida yang menghubungkan tegangan geser dengan gerakan fluida. Viskositas dinamik merupakan rasio antara tegangan geser dengan gradien kecepatan. Secara matematis viskositas dinamik dapat dituliskan sebagai berikut (Streeter, 1993)

:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (2.13)$$



Keterangan :

- μ = viskositas dinamik (kg/m.s)
 τ = tegangan geser (N/m²)
 du/dy = gradient kecepatan ((m/s)/m)

Viskositas dinamik untuk beberapa jenis gas dapat dilihat pada Tabel 2.2 :

Tabel 2.2 Viskositas dinamik gas

No	Gas	Viskositas Dinamik (μ) (kg/m.s)
1	Ar	15,9
2	BF ₃	12,3
3	He	15,1
4	Kr	17,4
5	NO	13,8
6	N ₂	12,9
7	N ₂ O	10,0
8	Ne	24,1
9	O ₂	14,7
10	SO ₂	8,6
11	Xe	15,7
12	CO	12,9

(Sumber : May dan Moldover, 2007)

2. Viskositas Kinematik

Viskositas kinematik adalah perbandingan antara viskositas dinamik dengan kerapatan fluida. Viskositas kinematik secara matematis dapat dituliskan ke dalam persamaan (Streeter, 1993) :

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

Keterangan :

- v = viskositas kinematik (m²/s)

μ = viskositas dinamik (kg/m.s)

ρ = kerapatan fluida (kg/m³)

2.3 Pengertian Emisi Gas Buang

Emisi gas buang adalah sisa hasil pembakaran bahan bakar di dalam mesin yang dikeluarkan melalui sistem pembuangan mesin (Wardana, 2001). Sisa hasil pembakaran berupa air (H₂O), gas CO atau disebut juga karbon monoksida yang beracun, CO₂ atau disebut juga karbon dioksida yang merupakan gas rumah kaca, NO_x senyawa nitrogen oksida, ketidaksempurnaan proses pembakaran. Kandungan udara yang terdapat pada atmosfer bumi utamanya terdiri Oksigen (O₂) =21% volume, Nitrogen (N) =78% volume dan sisanya 1% terdiri dari bermacam-macam gas diantaranya : Argon (AR)=0.94% volume dan karbon dioksida (CO₂) (Erwin, 2006). Jenis gas yang sangat bermanfaat, misalnya O₂ berguna untuk manusia dan CO₂ untuk tumbuh-tumbuhan. Beberapa jenis gas yang menyebabkan polusi udara yaitu gas karbon monoksida (CO), *Oxide of Nitrogen* (NO_x), Sulfur Diodida (SO₂) dan lain-lain (Soemirat, 1994). Gas-gas tersebut diperoleh dari gas buang kendaraan, asap pabrik dan pesawat terbang maka udara kita menjadi kotor. Emisi gas buang terjadi karena adanya proses pembakaran yang tidak sempurna di dalam mesin, artinya tidak semua bahan bakar yang masuk ke dalam mesin terbakar habis. Bahan bakar yang tidak terbakar ini keluar bersama gas buang melalui sistem pembuangan ke udara bebas.

2.3.1 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida merupakan senyawa gas beracun yang terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna dalam proses kerja motor. Gas CO merupakan gas yang relatif tidak stabil dan cenderung bereaksi dengan unsur lain. CO dapat diubah dengan mudah menjadi karbon dioksida (CO₂) dengan bantuan sedikit oksigen dan panas. CO diukur dalam satuan % per volume atau dalam ppm tetapi dalam industri otomotif sesuai dengan alat ukur yang digunakan sering diukur dalam satuan % per volume (Weller,1989).

Karbonmonoksida (CO) akan menyebabkan berkurangnya kemampuan darah dalam menyerap oksigen yang dibutuhkan organ tubuh. CO pada kadar

konsentrasi yang rendah sampai sedang akan dapat menimbulkan efek penyakit serta ancaman yang serius bagi penderita penyakit jantung. Efek menghirup CO pada konsentrasi sedang sampai tinggi dapat menyebabkan langsung gangguan pada penglihatan, kemampuan konsentrasi dalam bekerja, (Soemirat,2004). Kadar CO yang besar diakibatkan oleh perbandingan campuran antara bahan bakar bensin dan udara tidak sesuai. Kandungan bahan bakar bensin terlalu banyak tetapi juga masih dapat terbakar sehingga menghasilkan emisi CO yang besar, CO besar dapat disebabkan oleh filter udara yang kotor sehingga dapat mengurangi jumlah udara yang masuk kedalam silinder (Wardana, 2001).

2.3.2 Nitrogen Oksida (NO)

NO juga merupakan senyawa gas beracun yang ditimbulkan dari proses pembakaran yang tidak sempurna serta juga diakibatkan oleh suhu pembakaran diruang bakar yang cukup tinggi (Robert, 1993). NO adalah gas toksik bagi manusia, pada konsentrasi berkisar 50 – 100 ppm dan terpapar dalam waktu beberapa saja orang dapat terkena peradangan paru-paru, pada fase ini orang masih sembuh kembali dalam waktu 6 hingga 8 minggu, pada konsentrasi 150 – 200 ppm dapat menyebabkan pemampatan *broncholi* dan disebut *bronchilitis fibrosis obliterans*, orang dapat meninggal dunia dalm waktu 3 – 5 minggu setelah pemaparan, konsentrasi 500 ppm dapat mematikan dalam waktu 2 – 10 hari (Soemirat, 2004).

2.3.3 Sulfur Dioksida (SO₂)

Pembakaran bahan bakar, gas dan batubara mengandung sulfur tinggi, dan hampir seluruhnya berasal dari buangan industri serta kendaraan bermotor. Peningkatan kadar sulfur yang tinggi dapat memproduksi lebih banyak SO₂ dari pada sumber alamiah. Sulfur dioksida didalam udara mengalami reaksi fotokimia dan berubah menjadi berbagai macam senyawa sebelum jatuh ke permukaan bumi, jumlah SO₂ dalam udara sangat bervariasi dengan musim maupun dengan keadaan cuaca sehingga didapat varisasi yang tidak menentu (Soemirat, 2004).

Soemirat (2004) menyatakan bahwa SO₂ dikenal sebagai gas yang tidak berwarna bersifat iritan yang kuat bagi kulit dan lendir, pada konsentrasi 6 – 12



ppm SO_2 mudah diserap oleh selaput lendir saluran pernapasan. Sulfur dioksida (SO_2) juga berpengaruh terhadap tanaman, hewan dan gedung-gedung yang mempunyai arti sejarah, patung-patung bernilai seni dapat rusak karena SO_2 mudah menjadi H_2SO_4 yang bersifat korosif, demikian juga yang terjadi pada knalpot kendaraan seringkali terjadi korosi (keropos) yang tidak disadari oleh para pemilik kendaraan.

2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Sejarah CFD berawal pada tahun 60-an dan mulai terkenal pada tahun 70-an, awalnya pemakaian konsep CFD hanya digunakan untuk aliran fluida dan reaksi kimia, namun seiring dengan berkembangnya industri di tahun 90-an membuat CFD semakin dibutuhkan pada berbagai aplikasi lain. Contohnya sekarang ini banyak sekali paket-paket software CAD menyertakan konsep CFD yang dipakai untuk menganalisa tegangan yang terjadi pada desain yang dibuat. Pemakaian CFD secara umum dipakai untuk memprediksi: Aliran fluida dan panas, transfer massa, perubahan fasa seperti pada proses melting, pengembunan dan pendidihan, reaksi kimia seperti pembakaran, gerakan mekanis seperti piston, tegangan dan tumpuan pada benda solid, gelombang elektromagnet (Versteeg, 1995).

Computational fluid dynamics (CFD) dalam bahasa Indonesia disebut sebagai komputasi dinamika fluida yang dapat dibagi menjadi dua istilah, yaitu *computational* dan *fluid dynamics*. *Fluid dynamics* mengartikan bahwa kita membahas dinamika fluida (sifat-sifat aliran fluida dan transfer panas) itu sendiri, sedangkan istilah *computational* mengartikan bahwa dinamika fluida dihitung dan disimulasikan dengan seperangkat metode numerik dengan bantuan komputer. Kata 'simulasi' mengindikasikan bahwa perangkat yang digunakan berupakan komputer untuk menyelesaikan sekumpulan hukum (atau persamaan-persamaan fisis) yang mengatur peristiwa pergerakan fluida dimana geometrinya telah dimodelkan pula dengan bantuan komputer. Kelebihan metode CFD dapat membuat *prototipe*, dianalisa, dievaluasi, serta dioptimasi suatu sistem semisal

blok mesin, pesawat terbang, terowongan angin, sistem perpipaan, dan lain sebagainya (Versteeg, 1995).

CFD adalah perhitungan yang mengkhususkan pada fluida, mulai dari aliran fluida, *heat transfer* dan reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Prinsip metode CFD adalah suatu ruang yang berisi fluida akan dilakukan penghitungan dengan cara membagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan *meshing*. Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan yang akan dilakukan oleh perangkat lunak berbasis CFD. Kontrol-kontrol penghitungan ini beserta kontrol-kontrol penghitungan lainnya merupakan pembagian ruang yang disebut *meshing*. Setiap titik kontrol penghitungan akan dilakukan penghitungan oleh perangkat lunak dengan batasan *domain* dan *boundary condition* yang telah ditentukan. *Boundary condition* adalah kondisi dimana kontrol-kontrol perhitungan didefinisikan sebagai definisi awal yang akan dilibatkan ke kontrol-kontrol penghitungan yang berdekatan melalui persamaan-persamaan yang terlibat. Prinsip ini banyak dipakai pada proses penghitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer (Tuakia, 2008).

2.4.1 Proses CFD

Secara umum proses penghitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama antara lain (Sun, 2007) :

1. *Pre-processing* adalah tahap dimana data diinput mulai dari pendefinisian *domain* serta pendefinisian kondisi batas atau *boundary condition*. Tahap *pre-processor* ini menganalisa sebuah benda atau ruangan yang dibagi-bagi dengan jumlah grid tertentu atau sering disebut juga dengan *meshing*.
2. *Processing* adalah proses kedua dari *CFD*, dimana dalam tahap ini akan dilakukan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) dan pemilihan metode inisiasi. Beberapa parameter yang dibutuhkan dalam penentuan kondisi batas antara lain :

a. *Velocity inlet*

Parameter untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel.

b. *Mass flow inlet*

Kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperature fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan *gauge* pada sisi masuk, arah aliran, dan besaran turbulensi.

c. *Pressure inlet*

Pressure inlet akan dimasukkan data tekanan total (*absolute*), tekanan *gauge*, temperatur, arah aliran, dan besaran turbulen.

d. *Pressure outlet*

Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya. Kondisi batas ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*), dan besaran turbulen aliran balik.

e. *Outflow*

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar.

f. Dinding (*wall*)

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.

g. *Symmetry* dan *axis*

Kondisi batas simetri digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliranviskos. Kondisi batas *axis* digunakan sebagai garis tengah (*centerline*) untuk kasus 2D *axisymmetry*.



3. *Post processing* adalah tahap dimana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu. Hal yang paling mendasar mengapa konsep CFD banyak sekali digunakan dalam dunia industri adalah dengan CFD dapat melakukan analisa terhadap suatu sistem dengan mengurangi biaya eksperimen dan tentunya waktu yang panjang dalam melakukan eksperimen tersebut. Tahap proses design engineering yang harus dilakukan menjadi lebih pendek. Hal lain yang mendasari pemakaian konsep CFD adalah pemahaman lebih dalam mengenai karakteristik aliran fluida dengan melihat hasil berupa grafik, vektor, kontur dan bahkan animasi.

2.4.2 Persamaan Umum Aliran Fluida

Secara umum proses perhitungan yang digunakan untuk aliran fluida antara lain persamaan energi, persamaan kontinuitas dan momentum. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes adalah bentuk diferensial dari hukum kedua Newton tentang pergerakan dari suatu fluida. Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan dalam momentum partikel-partikel fluida hanya bergantung pada gaya viskos internal dan gaya viskos tekanan eksternal yang bekerja pada fluida. Persamaan Navier-Stokes ditemukan oleh G.G Stokes di Inggris dan M. Navier di Perancis sekitar awal tahun 1880. Persamaan Navier-Stokes mencakup persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi. Ketiga persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Versteeg, 1995) :

a. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

b. Persamaan Momentum

Momentum ke arah sumbu x :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R_r} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2.16)$$

Momentum ke arah sumbu y :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \frac{-\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R_r} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

Momentum ke arah sumbu z :

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{R_r} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (2.18)$$

c. Persamaan Energi

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(E_r)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_r)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_r)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_r)}{\partial z} \\ &= \frac{-\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \\ & - \frac{1}{R_r Pr_r} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\ & + \frac{1}{R_r} \left(\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Keterangan :

- x = Koordinat sumbu X
- y = Koordinat Sumbu Y
- z = Koordinat Sumbu Z
- u = Komponen Kecepatan U
- v = Komponen Kecepatan V
- w = Komponen Kecepatan W
- t = Waktu
- ρ = Densitas

- E_t = Energi Total
 p = Tekanan
 q = Heat Flux
 Re = Bilangan Reynold
 Pr = Bilangan Prandtl

2.4.3 Metode Diskritisasi CFD

Beberapa metode diskritisasi yang digunakan untuk memecahkan persamaan-persamaan diferensial parsial menurut Versteeg (1995) adalah:

1. Metode Beda Hingga (*finite difference method*)

Area aliran dalam metode ini dipisahkan menjadi satu set poin *grid* dan fungsi kontinu (kecepatan, tekanan, dan lainnya) didekati dengan nilai-nilai diskrit dan fungsi-fungsi ini dihitung pada titik-titik *grid*. Turunan dari fungsi didekati dengan menggunakan perbedaan antara nilai fungsi pada titik lokal *grid* dibagi dengan jarak *grid*.

2. Metode Elemen Hingga (*finite element method*)

Metode ini membagi masalah besar menjadi lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Persamaan sederhana yang memodelkan seluruh kasus kemudian disusun menjadi sebuah sistem persamaan yang lebih luas. Persamaan konservasi kekekalan massa, momentum, dan energi ditulis dalam bentuk yang tepat untuk setiap elemen, dan hasil dari set persamaan aljabar untuk bidang aliran diselesaikan secara numerik.

3. Metode Volume Hingga (*finite volume method*)

Finite volume method adalah metode untuk mewakili dan mengevaluasi persamaan diferensial parsial dalam bentuk aljabar. Metode ini sama seperti *finite difference method* dan *finite element method*, nilai-nilai dihitung di tempat terpisah pada geometri yang di *mesh*. Metode ini mengacu pada volume kecil disekitar *node* pada *mesh*. Volume integral dalam persamaan diferensial yang

memiliki istilah divergensi dikonversi ke *surface integrals* menggunakan teori divergensi.

2.4.4 Jenis-jenis Solver CFD

Adapun jenis dari metode solusi adalah sebagai berikut (Anderson, 1995) :

1. SIMPLE

SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation*) merupakan metode yang menggunakan hubungan antara kecepatan dan tekanan untuk mendapatkan nilai konservasi massa dan nilai bidang tekan. Persamaan kecepatan dalam metode ini dikoreksi untuk menghitung satu set baru fluks konservatif. Persamaan momentum yang telah terdiskritisasi dan koreksi kecepatan diselesaikan secara implisit dan koreksi kecepatan diselesaikan secara eksplisit, hal ini adalah alasan disebutnya “Semi-Implisit Metode”

2. SIMPLEC

SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation-Consistent*). merupakan modifikasi dari metode SIMPLE, metode ini merupakan prosedur numerik yang biasa digunakan dalam CFD untuk memecahkan persamaan Navier Stokes. Pada metode SIMPLEC metode SIMPLE sedikit dilakukan variasi dimana persamaan momentum dimanipulasi untuk memungkinkan koreksi kecepatan SIMPLEC dihilangkan untuk menghilangkan nilai yang kurang penting, pada dasarnya SIMPLEC mencoba untuk mencegah efek *dropping velocity* dan faktor koreksi lainnya.

3. PISO

Metode ini didasarkan pada tingkatan yang lebih tinggi dari hubungan pendekatan antara faktor koreksi tekanan dan kecepatan. Metode PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) menggunakan dua faktor koreksi tambahan, yaitu *neighbor correction* dan *skewness correction* untuk meningkatkan efisiensi perhitungan. *Neighbor correction* adalah proses iterasi yang disebut sebagai koreksi momentum atau *neighbor correction*. Dengan tambahan *neighbor*

correction maka *Control Processing Unit (CPU)* pada komputer mengalami penambahan waktu untuk melakukan proses solver iterasi, akan tetapi akan menurunkan nomor iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi. *Skewness correction* adalah proses penghitungan ulang untuk gradien koreksi tekanan yang digunakan untuk memperbaiki koreksi fluks massa.

4. PIMPLE

PIMPLE adalah kombinasi dari PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) dan SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation*). Semua algoritma ini adalah pemecah iteratif tetapi PISO dan PIMPLE keduanya digunakan untuk kasus *transient* sedangkan SIMPLE digunakan untuk kasus dalam *steady-state*. Algoritma PIMPLE sama halnya dengan algoritma SIMPLE untuk setiap langkah waktu (*time step*), dimana korektor luar adalah iterasi, dan secara konvergen akan beralih ke *time step* berikutnya hingga solusi selesai. Solver PIMPLE memiliki stabilitas yang lebih baik daripada PISO terutama ketika menggunakan *time step* yang besar di mana jumlah bilangan Courant maksimum mungkin secara konsisten di atas 1 atau ketika sifat dari solusi secara inheren tidak stabil. Jumlah korektor luar dari algoritma PIMPLE, seperti yang disebutkan di atas, menentukan berapa banyak iterasi luar yang harus dilakukan yaitu, berapa kali sistem persamaan dilakukan sebelum dipaksa untuk pindah ke *time step* berikutnya, terlepas dari apakah itu *time step* sudah konvergen atau belum. Jumlah korektor luar tidak berarti bahwa ia akan melakukan semua iterasi ini; itu hanya akan beralih sampai konvergensi langkah waktu tercapai, dan beralih ke *time step* berikutnya. Kriteria untuk konvergensi *time step* didefinisikan sebagai toleransi absolut solver, yang secara default 1×10^{-5} . Hal ini menyebabkan perhitungan cepat ketika stabil tetapi memberikan ruang untuk banyak iterasi ketika terjadi ketidakstabilan.



2.5 SimFlow

Asal usul simFlow dimulai sejak tahun 2012, kemudian SIMFLOW pertama kali dirilis pada tahun 2013. SimFlow adalah perangkat lunak CFD serba guna yang sederhana dengan keunggulan pustaka OpenFOAM® open-source. Keunggulan simFlow yaitu dapat membuat dan impor jala, mendefinisikan kondisi batas, parameterisasi kasing, menjalankan simulasi, menghitung secara paralel dengan hanya satu klik, melihat hasil pasca-proses dengan ParaView. SimFlow menawarkan fungsionalitas untuk menangani fenomena seperti aliran fluida kompresibel dan tidak kompresif, aliran turbulen, perpindahan panas, termasuk perpindahan panas konjugat, aliran multifase, kavitasi, dan reaksi kimia. Proses-proses ini dapat dimodelkan dalam frame referensi stasioner atau menggunakan mesh dinamis (Teknologi SIMFLOW, 2012).

Fenomena yang dapat disimulasikan menggunakan simFlow antara lain fenomena aerodinamika, perpindahan panas, dan pembakaran. Fenomena aerodinamika yang disimulasikan dengan SimFlow dapat mengamati aliran eksternal dan internal dalam berbagai macam aplikasi seperti kendaraan jalan, pesawat terbang, kereta api, bangunan, fasilitas industri dan banyak lainnya. Perangkat lunak simFlow dapat menggunakan model turbulensi yang canggih, skema diskritisasi dan metode numerik. Hasil simulasi yang diperoleh dapat menentukan kecepatan, tekanan turun dan gaya angkat. Pengetahuan tentang aerodinamika dalam simulasi menggunakan simFlow berguna untuk mengoptimalkan desain sebelum produksi fisik dan pengujian prototipe (Teknologi SIMFLOW, 2012).

Fenomena perpindahan panas sangat penting disimulasikan menggunakan simFlow karena proses perpindahan panas banyak digunakan di bidang industri seperti aeronautika, teknik tenaga, metalurgi, dan elektronik. Studi perpindahan panas yang dilakukan dalam simFlow dapat mencakup antara lain konduksi, konveksi alami dan paksa, radiasi dan perpindahan panas konjugasi antara zat padat dan cairan. Hasil simulasi yang diperoleh dapat memberi pengetahuan tentang suhu di lokasi kritis atau berfungsi sebagai input untuk analisis tegangan. Fenomena pembakaran yang diimplementasikan dalam simFlow memungkinkan

simulasi api yang tidak terpaku, terpaku, dan terpaku sebagian. Berdasarkan banyaknya aplikasi potensial, kemampuan simFlow dapat digunakan untuk memperkirakan efisiensi reaktor kimia, dan memprediksi emisi polutan dari berbagai sistem pembakaran (Teknologi SIMFLOW, 2012).



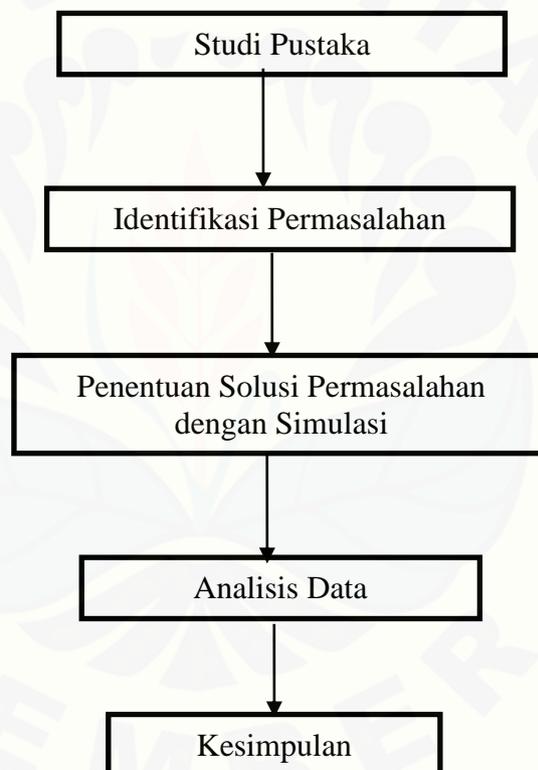
BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan untuk mengetahui karakteristik laju alir gas berbagai polutan menggunakan simulasi CFD. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fisika Komputasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Waktu penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Januari tahun 2019 sampai selesai. Adapun komputer yang digunakan memiliki sistem operasi Windows 8 dan tipe sistem 64 bit. Spesifikasi komputer yang digunakan yaitu RAM 2 GB dan *processor* Intel® Core™ i3-4170 CPU @3.70GHz. Perangkat lunak CFD yang digunakan yaitu simFlow 3.1 untuk menjalankan simulasi.

Penelitian ini diawali dengan beberapa penelitian sebelumnya yang telah dilakukan. Referensi dari beberapa penelitian tersebut juga diperoleh dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku, skripsi. Tahap selanjutnya yaitu menentukan topik penelitian yang akan dilakukan. Software yang akan digunakan yaitu simFlow dimana *software* berbasis CFD. Tahap pertama yaitu download *software* simFlow dan melakukan penginstalan simFlow pada komputer dengan sistem operasi Windows 8. SimFlow merupakan *software* yang berfungsi untuk menjalankan proses simulasi dengan metode *finite volume*. SimFlow juga dilengkapi dengan *ParaView* yang digunakan untuk melihat hasil visualisasi dari pergerakan gas pada geometri ruang berupa silinder. Simulasi CFD secara umum dilakukan dengan tiga tahap antara lain *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Simulasi diawali dengan proses *pre-processing* yaitu mengimport file (.STEP) yang berisi desain dan ukuran geometri ruang silinder. Tahap *processing* yaitu melakukan tahap *hex meshing* sebelum mesh awal dilakukan dan dilanjutkan proses *meshing*. Penentuan solver dan model fisik dari suatu aliran untuk melakukan proses simulasi. Hal lain yang harus ditentukan sebelum pada tahap *processing* antara lain menentukan jenis dan sifat material, menentukan metode diskritisasi yang akan dilakukan, menentukan kondisi batas dari model yang

dibuat, menentukan input pada panel kontrol, melakukan proses perhitungan (iterasi). Tahap *post processing* yaitu melakukan *post processing* dengan menampilkan nilai, grafik dan gambar kontur yang diperlukan. Data yang akan dihasilkan pada hasil simulasi ini berupa grafik residual yang menyatakan hubungan antara tekanan dan laju alir gas berbagai polutan pada arah x, y dan z terhadap waktu, dan visualisasi pola laju alir gas berbagai polutan. Output dari simulasi ini akan dianalisis. Hasil analisis yang diperoleh dapat menghasilkan kesimpulan. Rancangan penelitian yang digunakan dalam simulasi ini dapat dilihat pada diagram alir sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang akan diperoleh dari penelitian ini yaitu data kuantitatif. Data kuantitatif merupakan data berupa hasil perhitungan dari simulasi yang akan dilakukan pada penelitian ini. Data kuantitatif yang diperoleh berupa nilai laju

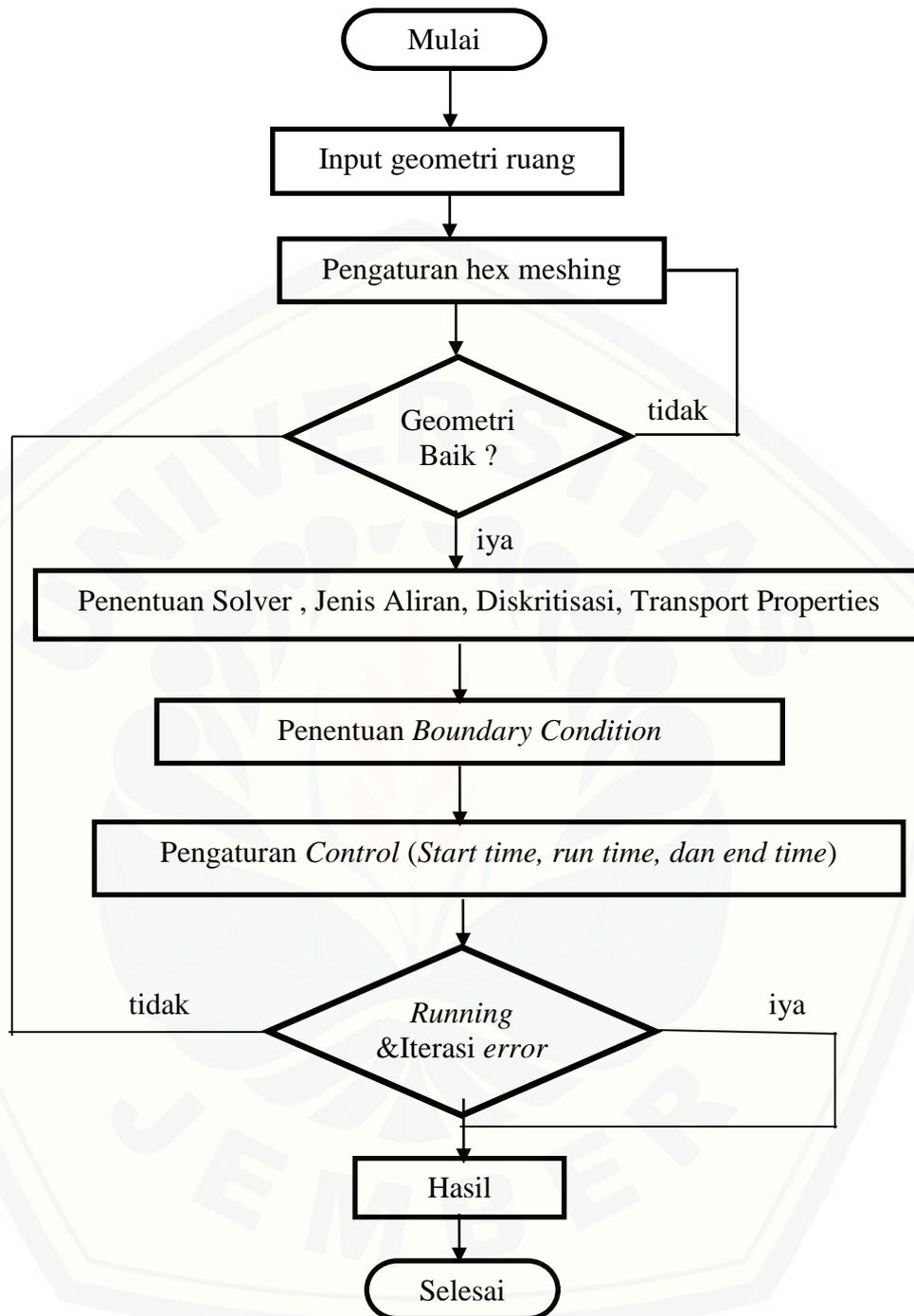
alir gas, dan tekanan gas yang dihasilkan dari geometri berbentuk silinder menggunakan simulasi CFD. Sumber data penelitian ini diperoleh dari data primer. Data primer merupakan data yang diambil langsung dari hasil simulasi CFD yang dilakukan pada penelitian ini.

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel penelitian terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi atau yang menyebabkan terjadinya perubahan. Variabel bebas yang digunakan adalah jenis gas polutan meliputi SO_2 , CO , NO yang didefinisikan menggunakan nilai input berupa viskositas kinematik dari gas polutan. Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas atau faktor-faktor yang diamati dalam penelitian untuk menentukan ada tidaknya pengaruh dari variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan adalah laju alir gas dan tekanan. Variabel kontrol adalah variabel kendali yang diupayakan tetap konstan dalam suatu penelitian. Variabel kontrol yang digunakan adalah geometri ruang berbentuk silinder.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Kerangka pemecahan masalah dalam penelitian ini yaitu berupa tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam menentukan solusi dari permasalahan. Secara ringkas, tahapan penyelesaian masalah ditunjukkan oleh diagram alir proses simulasi pada Gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram alir proses simulasi

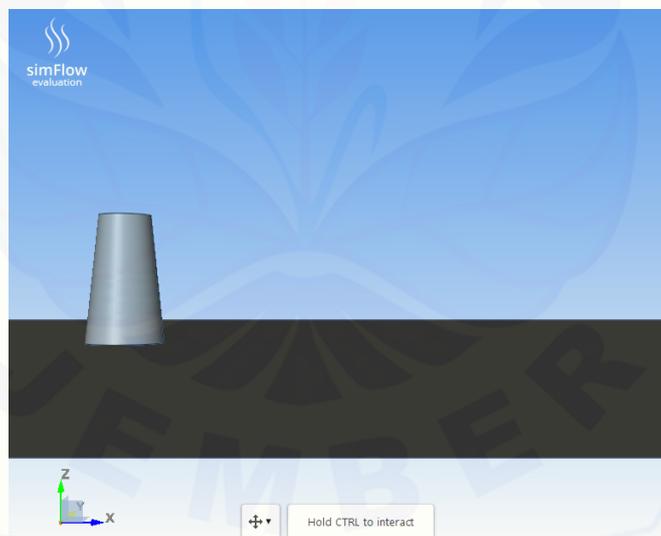
3.5 Prosedur Simulasi CFD

Penelitian ini diawali dengan menginputkan geometri ruang berupa silinder dalam bentuk format file *.STEP* ke perangkat lunak *simFlow*. *File* tersebut berisi *script* yang mendefinisikan geometri berupa silinder. *File* tersebut diperoleh dari hasil download di *website* *simFlow*. Cara menampilkan *file script* yang telah di download yaitu dengan menginputkan *file script* ke *simFlow* seperti Gambar 3.3.



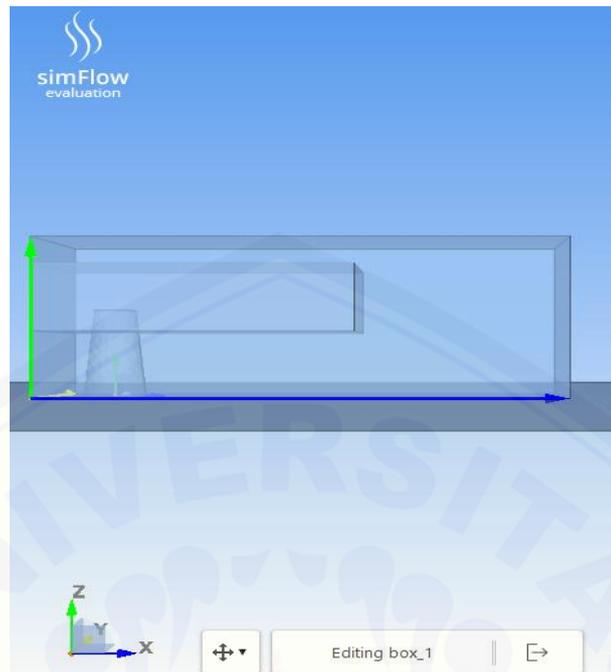
Gambar 3.3 Cara input *file script* ke *simFlow*

File yang telah diinput di *simFlow* maka akan menampilkan geometri ruang berupa silinder. Desain geometri ruang dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Desain geometri ruang berupa silinder

Geometri ruang yang telah dilakukan perlu ditambah geometri tambahan berupa balok untuk menyempurnakan proses *mesh*. Penambahan geometri yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 berupa 2 geometri balok dengan ukuran yang berbeda. Box 1 dibuat dengan ukuran (x,y,z) adalah (50,12,18). Box 2 dibuat dengan ukuran (x,y,z) adalah (30,12,7.5).

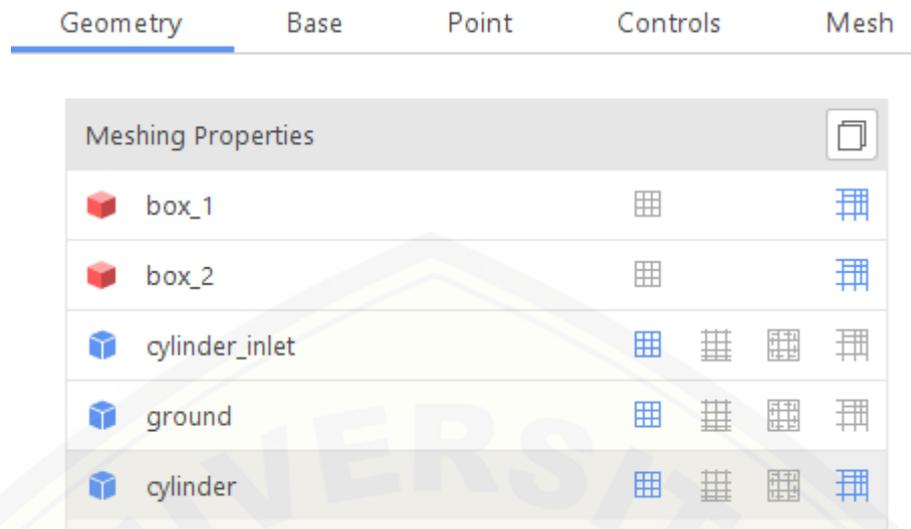


Gambar 3.5 Desain geometri ruang berupa balok

Berdasarkan geometri yang telah dibuat, maka dapat menentukan geometri sebagai alat pemotong sel melalui proses *meshing*. Proses *meshing* juga digunakan untuk menentukan parameter *meshing* untuk menciptakan geometri. Pengaturan *meshing* dilakukan pada *meshing properties* dan melakukan penyempurnaan geometri untuk mengontrol penyempitan pada permukaan geometri. Pengaturan *meshing* pada geometri ruang dilakukan berdasarkan tabel 3.1 dan dapat dilihat pada Gambar 3.6 :

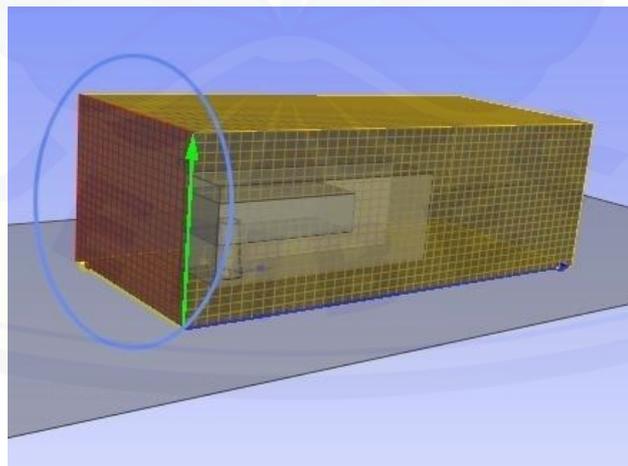
Tabel 3.1 Pengaturan *meshing* pada geometri ruang

Geometri Ruang	<i>Mesh Geometry</i>	<i>Refine Geometry</i>
<i>Cylinder_inlet</i>	✓	
<i>Cylinder</i>	✓	✓
<i>Box 1</i>		✓
<i>Box 2</i>		✓
<i>Ground</i>	✓	



Gambar 3.6 Pengaturan *meshing* pada geometri ruang

Ukuran geometri yang dijadikan sebagai alat potong juga ditentukan untuk melakukan proses *meshing*. Pengaturan *meshing* yang perlu dilakukan pada *geometry base* antara lain mengatur nilai divisi, mengatur ukuran pada nilai minimum dan maksimum sebagai ukuran sel-sel pada mesh awal. Ukuran nilai divisi ditentukan pada arah $(x, y, z) = (45, 20, 20)$. Nilai minimum pada arah $(x, y, z) = (-20, -20, -1)$ dan nilai maksimum pada arah $(x, y, z) = (75, 20, 30)$ seperti pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8. Gambar 3.7 menjelaskan bahwa penentuan ukuran balok *mesh* ditentukan sesuai arah x , y , dan z .



Gambar 3.7 Desain balok *mesh*

Geometry **Base** Point Controls Mesh

Base Mesh Type

Box Cylinder Plate Wedge

Min [m] -20 -20 -1

Max [m] 75 20 30

Autosize

Mesh

Division 45 20 20

Grading 1 1 1

Cell Size [m] 2.1111 2 1.55

Gambar 3.8 Pengaturan nilai minimum, maksimum, nilai divisi pada balok *mesh*

Balok *mesh* yang telah dibuat akan ditentukan batas-batas *mesh* awal pada sisi-sisi balok *mesh* yang harus menjadi batas masuk dan batas keluar. Pengaturan batas-batas *mesh* awal pada sisi-sisi balok *mesh* dapat dilihat pada Gambar 3.9 sebagai berikut :

Boundaries

X-	inlet	
X+	outlet	
Y-	left	
Y+	right	
Z-	boundaries	
Z+	top	

Gambar 3.9 Pengaturan batas-batas *mesh* pada sisi-sisi balok *mesh*

Proses *meshing* dapat dilakukan setelah melakukan penentuan nilai divisi dan nilai minimum dan maksimum pada *geometry base*. Hasil dari proses *meshing* akan

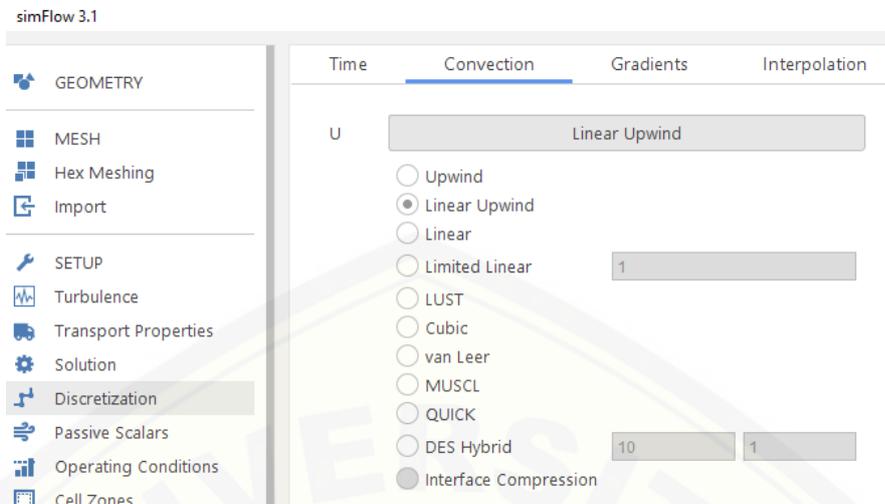


menghasilkan batas-batas *domain* pada kotak *mesh* arah x, y, z yang dapat diatur berdasarkan Tabel 3.2 :

Tabel 3.2 Pengaturan batas-batas *domain*

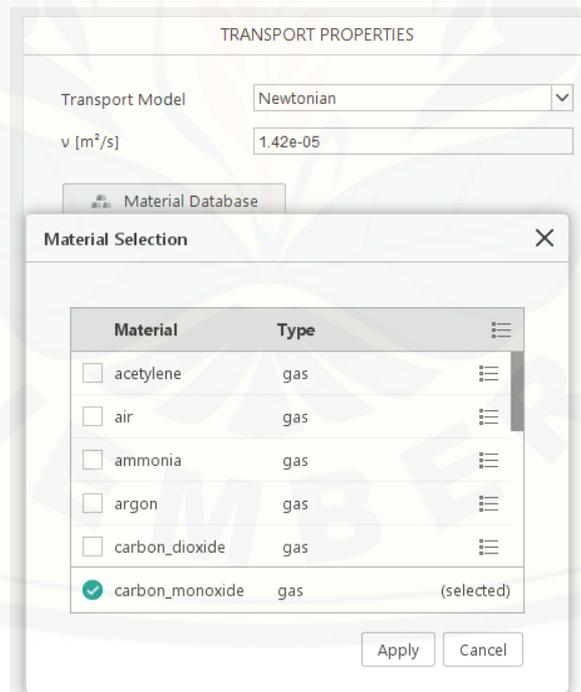
Batas <i>Domain</i>	Type Batas <i>Domain</i>
<i>Cylinder_slave_merged</i>	<i>Wall</i>
<i>Cylinder_inlet</i>	<i>Patch</i>
<i>Ground</i>	<i>Wall</i>
<i>Inlet</i>	<i>Patch</i>
<i>Outlet</i>	<i>Patch</i>
<i>Left</i>	<i>Symmetry</i>
<i>Right</i>	<i>Symmetry</i>
<i>Top</i>	<i>Patch</i>

Jenis aliran gas diasumsikan sebagai aliran *incompressible* dan pemilihan parameter aliran terhadap waktu dengan tipe *transient*. Berdasarkan jenis aliran gas dan tipe parameter aliran terhadap waktu yang digunakan, maka solver yang digunakan pada simulasi ini yaitu PIMPLE. Solver PIMPLE merupakan kombinasi dari solver PISO dan SIMPLE. Persamaan yang digunakan pada simulasi ini adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes dapat diselesaikan dengan metode numerik berupa diskritisasi. Metode diskritisasi merupakan metode yang digunakan untuk memecah *domain* atau menyelesaikan daerah perhitungan menjadi beberapa bagian-bagian kecil yang disebut sel. Metode diskritisasi dilakukan dengan memilih skema konveksi berupa *linear upwind*. Berdasarkan persamaan Navier-Stokes yang juga mencakup persamaan momentum, maka pemilihan skema konveksi berupa *linear upwind* pada metode diskritisasi. *Linear upwind* merupakan skema konveksi untuk persamaan momentum. Pengaturan metode diskritisasi dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pengaturan diskritisasi

Simulasi ini dilakukan dengan variasi beberapa jenis gas berbagai polutan. Penambahan jenis gas dilakukan dengan cara mengatur pada *transport properties*. Panel *transport properties* berfungsi untuk menentukan jenis material yang digunakan seperti pada Gambar 3.11.

Gambar 3.11 Pengaturan *transport properties*

Jenis material ditentukan dengan cara menginputkan nilai viskositas kinematik dari gas polutan (NO, SO₂, CO). Nilai viskositas kinematik diperoleh dari hasil perbandingan viskositas dinamik gas polutan terhadap massa jenis gas polutan.

Pengaturan *transport properties* untuk setiap jenis gas polutan dapat dilihat pada lampiran 3.1, 3.2 dan 3.3. Parameter input dari gas polutan dapat dilihat pada Tabel 3.3 :

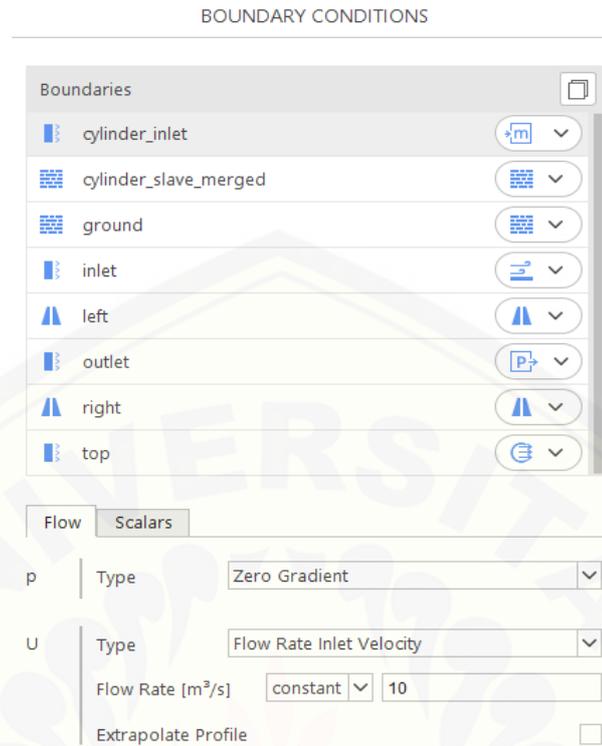
Tabel 3.3 Parameter input dari gas polutan

Gas	Densitas ρ (kg/m ³)	Viskositas dinamik μ (kg/m.s)	Viskositas kinematik ν (m ² /s)
NO	1,249	13,8 x 10 ⁻⁶	1,417 x 10 ⁻⁵
SO ₂	2,279	8,6 x 10 ⁻⁶	0,689 x 10 ⁻⁵
CO	1,165	12,9 x 10 ⁻⁶	1,420 x 10 ⁻⁵

Tipe kondisi tiap batas *domain* yang telah dihasilkan dapat digunakan untuk mengatur *boundary condition*. *Boundary condition* (kondisi batas) adalah kondisi yang mendefinisikan sebagai definisi awal yang akan dilibatkan ke kontrol perhitungan. Pengaturan *boundary condition* juga bertujuan untuk menentukan karakter kondisi tiap batas. Hal-hal yang harus dilakukan pada pengaturan *boundary condition* sebagai berikut :

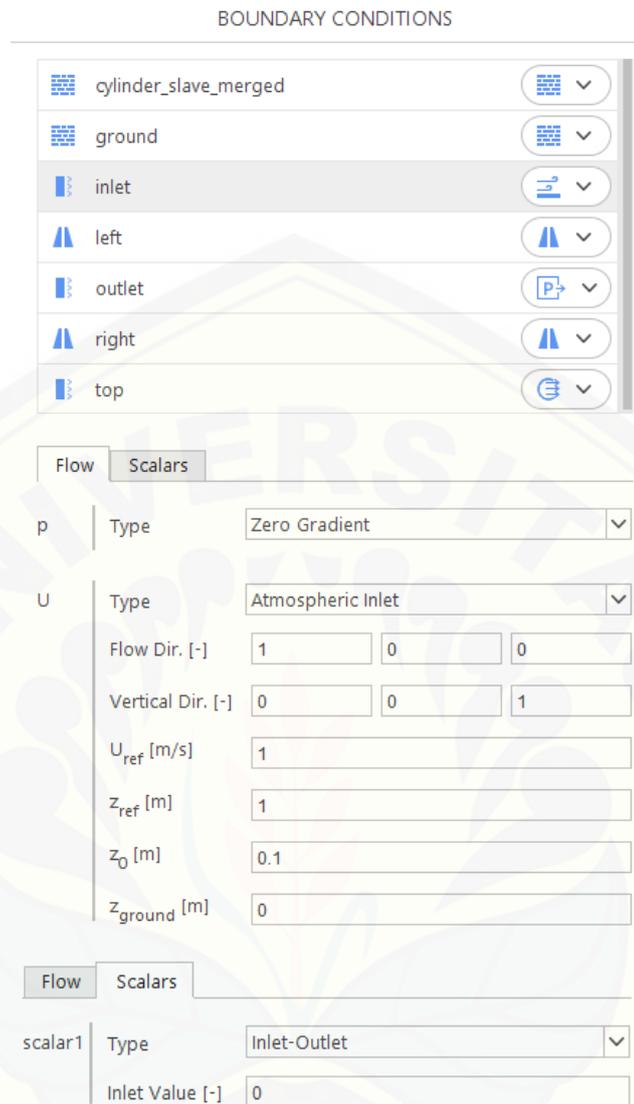
1. Batas *cylinder-inlet* diatur dengan tipe kondisi batasnya menjadi *mass flow_inlet* dengan mengatur debit secara konstan yaitu 10 m³/s. Jenis tekanan pada *cylinder_inlet* diatur menjadi *zero gradient*. Skalar pada *cylinder_inlet* juga diatur nilai *inlet-Value* menjadi 1 dengan tipe *inlet-outlet*. Variabel skalar harus beroperasi dengan nilai antara 0-1. Nilai 1 menunjukkan variabel beroperasi 100%. Pengaturan batas *cylinder_inlet* dapat dilihat pada Gambar 3.12 sebagai berikut :





Gambar 3.12 Pengaturan kondisi batas *cylinder_inlet*

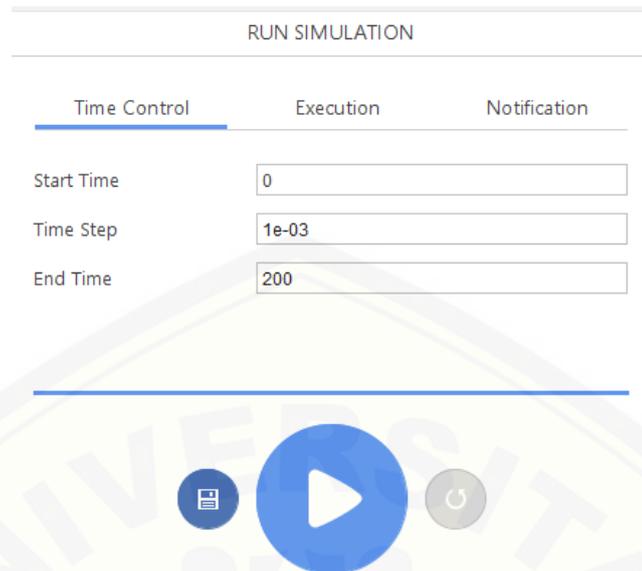
2. Batasan *inlet* diatur tipe kondisi batasnya menjadi *atmosphere inlet* dan diatur nilai kecepatan (U_{ref}) menjadi 1. Kondisi batas *inlet* atmosfer menetapkan profil kecepatan *inlet* yang sesuai untuk lapisan batas atmosfer. Profil ini berasal dari kecepatan gesekan, arah aliran dan arah vertikal, di mana U_{ref} mendefinisikan nilai kecepatan pada ketinggian referensi yang diatur pada angka. Pengaturan nilai skalar pada *inlet* diatur ke nilai 0, yang artinya skalar hanya ditujukan pada daerah batas *cylinder_inlet*. Pengaturan batas *inlet* dapat dilihat pada Gambar 3.13 sebagai berikut :



Gambar 3.13 Pengaturan komdisi batas *inlet*

3. Batasan *top* diatur dengan tipe kondisi batas menjadi *outflow*
4. Batasan *outlet* diatur dengan tipe kondisi batas menjadi *pressure outlet*.

Berbagai pengaturan *meshing* hingga *boundary condition* telah dilakukan sehingga dapat melakukan pengaturan *time control* yang bertujuan untuk mengontrol waktu berjalannya proses *running* simulasi dari awal hingga akhir. Pengaturan *time control* meliputi *start time* dengan nilai 0, *time step* dengan nilai 0,001, *end time* dengan nilai 200. Pengaturan *time control* dapat dilihat pada Gambar 3.14 berikut :



The image shows a software interface titled "RUN SIMULATION". It is divided into three columns: "Time Control", "Execution", and "Notification". Under the "Time Control" column, there are three input fields: "Start Time" with the value "0", "Time Step" with the value "1e-03", and "End Time" with the value "200". Below these fields, there are three circular buttons: a small blue button with a document icon, a large blue play button, and a grey button with a refresh icon.

Gambar 3.14 Pengaturan *time control*

Running simulasi dapat dimulai setelah pengaturan *time control*. Simulasi dijalankan dengan panel *Run* seperti pada Gambar 3.14. Proses selanjutnya yaitu *post-processing* dimana hasil simulasi yang telah ditentukan sebelumnya dapat di proses lebih lanjut lagi untuk melihat hasil visualisasi. Hasil perhitungan pada tahap sebelumnya diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik, bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu. Hasil *post-processing* akan berjalan sesuai yang diinginkan dan akan berhenti pada *end time=200* sekon.

3.6 Metode Analisis Data

3.6.1 Analisis Laju Alir pada Gas Berbagai Polutan

Laju alir gas disimulasikan pada arah x, y dan z atau dapat diungkapkan dengan simbol U_x , U_y , dan U_z . Gas yang divariasikan yaitu CO, NO dan SO₂. Hasil yang diperoleh berupa grafik residual yang menjelaskan hubungan laju alir terhadap waktu. *Output* dari grafik tersebut kemudian dianalisis melalui tabel pengamatan. Proses analisis dilakukan dengan cara mengamati setiap perubahan laju alir pada setiap jenis gas dengan arah x, y dan z. Perubahan laju alir pada setiap jenis gas diamati hingga waktu akhir yaitu 200 sekon. Berdasarkan perbedaan nilai laju alir pada setiap jenis gas dapat diketahui karakteristik laju alir pada gas berbagai polutan.



3.6.2 Analisis Tekanan Gas pada Gas Berbagai Polutan

Analisis tekanan gas dilakukan pada berbagai jenis gas polutan diantaranya CO, SO₂, NO. Aliran gas diasumsikan mengalir secara laminar dan dalam kondisi *transient* dengan nilai tekanan gas berbeda-beda yang bergerak secara vertikal sepanjang geometri ruang silinder. Kondisi *transient* digunakan agar dapat melihat perubahan tekanan terhadap waktu. Tekanan gas yang disimulasikan hanya pada satu arah saja untuk setiap jenis gas berbagai polutan. Tekanan gas yang dihasilkan juga dapat dilihat dari grafik residual yang akan dihasilkan dari proses simulasi. Visualisasi dari besar tekanan gas juga dapat dilihat melalui proses *post-processing* dengan *ParaView*. Visualisasi tekanan gas yang diamati dapat berupa animasi dan kontur pada hasil *post-processing* di *simFlow*.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan dari ketiga jenis gas polutan. Hasil simulasi CFD dapat menunjukkan nilai laju alir dan tekanan gas untuk mengetahui karakteristik gas berbagai polutan. Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Gas polutan (NO, SO₂ dan CO) menghasilkan resultan laju alir gas yang sama hingga detik ke 80 sekon. Pergerakan gas polutan di atas 80 detik hingga detik 200 sekon cenderung meningkat ke arah z. Laju alir gas CO mencapai nilai tertinggi pada 180 sekon sebesar 21,18 m/s. Laju alir gas NO mencapai nilai tertinggi pada 190 sekon sebesar 20,60 m/s. Gas SO₂ menghasilkan laju alir maksimum sebesar 19,72 m/s pada detik 140 sekon. Viskositas kinematik gas polutan yang semakin besar menyebabkan laju alir gas semakin cepat bergerak.
2. Tekanan gas yang dihasilkan oleh ketiga jenis gas polutan (NO,SO₂ dan CO) juga bergantung pada laju alir gas polutan. Tekanan yang dihasilkan oleh gas polutan memiliki hubungan yang linier terhadap laju alir gas polutan. Hal ini sesuai dengan profil laju alir gas polutan dimana saat laju alir gas besar,maka tekanan gas yang dihasilkan juga besar.

5.2 Saran

Pada penelitian berikutnya perlu dilakukan metode simulasi CFD laju alir gas dan tekanan gas dengan waktu simulasi yang lebih lama.Hal ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik gas berbagai polutan secara detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, JD. 1995. *Computational Fluid Dynamics: The Basic With Applications*. Singapura: McGraw-Hill. Inc.
- D. Darmansyah. 2006. Konservasi Energi di Kilang Gas Alam Cair /LNG Melalui Peningkatan Efisiensi Pembakaran pada Boiler. *Skripsi*. Medan : Universitas Sumatera Utara.
- Gholamalizadeh, Ehsan. 2018. *CFD Simulation of a Solar Chimney Power Plant. Proceeding of Academicsera 13th International Coference*. 23-24 Agustus 2018. Turkey.
- Giles, R. V. 1997. *Mekanika Fluida Dan Hidraulika*. Jakarta: Erlangga.
- Henry, Nasution. 2008. *Mekanika Fluida Dasar*. Padang : Bung Hatta University Press.
- Hirsch, Charles. 2007. *Numerical Computation of Internal xternal Flows, the Fundamental of Computational Fluid Dynamics, Second Edition*. USA : John Wiley Sons.
- Iwan, Kusnandar. 2011. Pengaruh Penambahan My Green Oil dalam Premium terhadap Emisi Gas Buang Karbon Monoksida (CO) pada Sepeda Motor Honda Supra X Tahun 2004. *Skripsi*. Jurusan Teknik dan Kejuruan. Surakarta : Universitas Sebelas Maret.
- Kusman dan M.S.K. Tony Suryo Utomo. 2017. Simulasi Persebaran Gas Buang dan Partikulat dari Cerobong Asap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Jepara Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan Variasi Kecepatan Udara. *Jurnal Teknik Mesin*. 5 (2) :106-114.
- May, E. F., Berg, R.F., and Moldover, M.R. *Reference Viscosities of H₂, CH₄, Ar and Xe at Low Densities*. 2007. *Int. J. Thermophys*. 28 : 1085.

Munson, B.R. 2003.*Mekanika Fluida*. Erlangga. Jakarta.

Nakayama, Y and R.F. Boucher. 1999. *Introduction to Fluid Mechanics*. Butterworth-Heinemann.

Nasruddin. 2013. *Fisika Dasar (Mekanik, Gelombang, Fluida, dan Panas)*. Penerbit: USU Press.

Olson, R.M. dan Wright, S.J. 1990.*Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik*. Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta : dalam John F.S dan Sinaga F.S 2013 [Jurnal]. Perancangan Alat Uji Gesekan Aliran di dalam Saluran. Jurusan Teknik Mesin, UNILA.

Praja, 2006.*Gas Penyebab Emisi Udara*. Yogyakarta : Kanisius.

Robert, 1993.*Automotive Band Book*, VDI Verlag Germany.P 108 -184.

Roy, K.A dan Khan, Moch Mohsin. 2016. *CFD Simulation of Windeffects on Industrial Chimneys*. Civil Engineering Conference-Innovation for Sustainability CEC : India.

Sitorus, H. R dan Anisya, D. 2008.*Ringkasan Fisika*. Bandung : Yrama Widya.

Soemirat, Slamet. 1994. *Kesehatan Lingkungan*. Yogyakarta : Universitas Gajah Mada.

Streeter, Victor L., Wylie, E Benjamin. 1993. *Mekanika Fluida Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.

Sun, Da-Wen. 2007. *Computational Fluid Dynamicsin Food Processing*. CRC Press. USA.

Sumarwoto, Otto. 1994. *Indonesia dalam Kancah Isu Lingkungan Global*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Halaman : 217-218.



Teknologi SIMFLOW, 2012. <https://sim-flow.com/about>. [Diakses pada 20 Januari 2019].

Triatmodjo, B., 1991. *Mekanika Fluida dan Hidraulika Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.

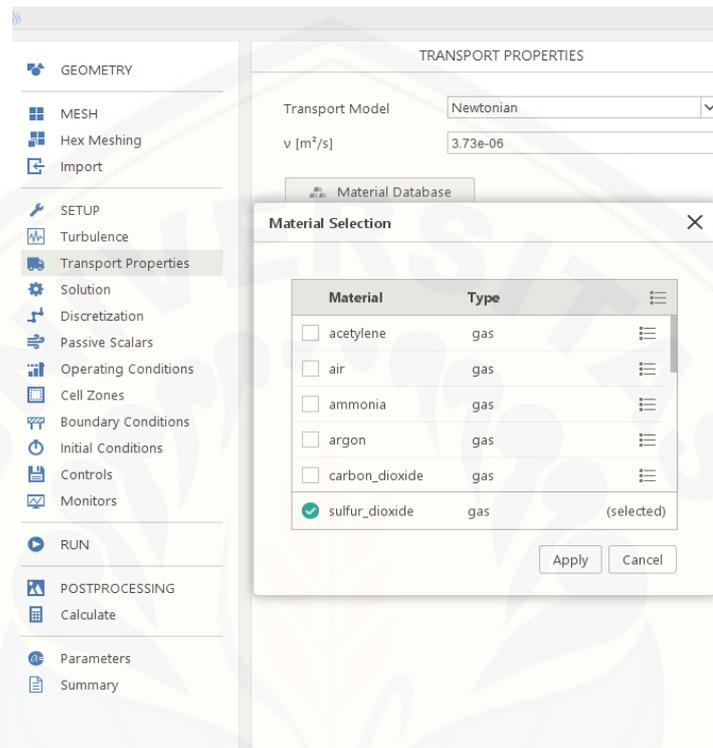
Tuakia, F. 2008. *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Bandung : Informatika Bandung.

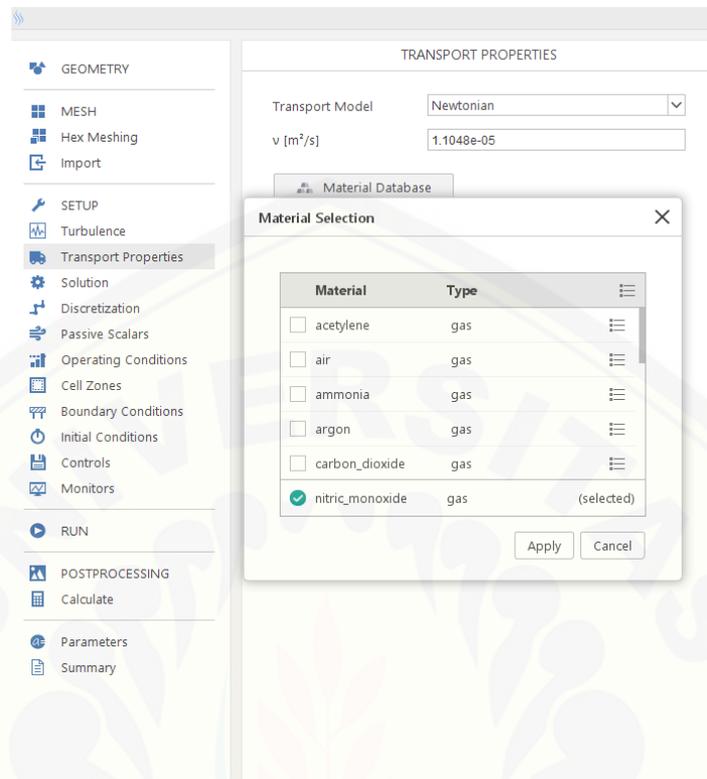
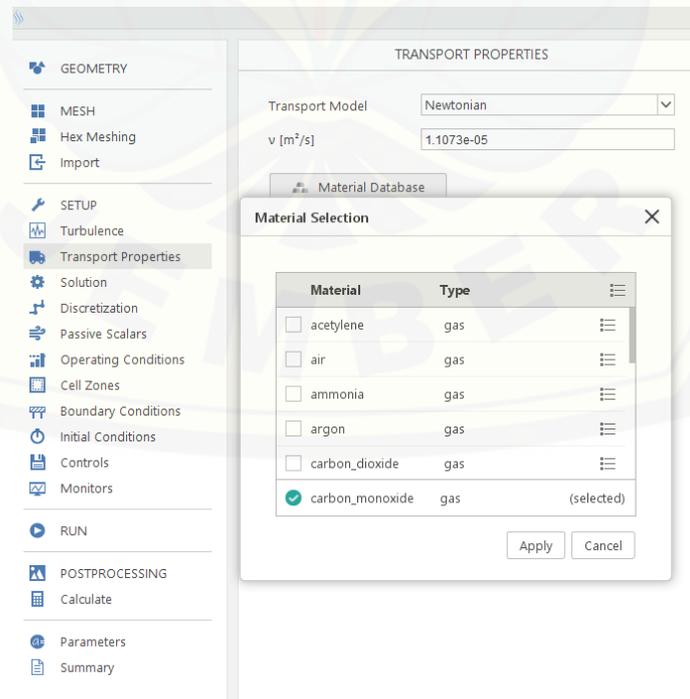
Versteeg, H.K and Malalasekera.1995. *An Introduction of Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*. New York : John Wiley Sons Inc.

Wardana.Wisnu Arya.2001. *Dampak Pencemaran Lingkungan*.Yogyakarta : Andi Offset.

White, 1994.*Mekanika Fluida*. Terjemahanm oleh Manahan Hariandja.Jilid 1.Jakarta : Erlangga.

LAMPIRAN

Lampiran 3.1 Pengaturan *Transport Properties* pada Gas SO₂

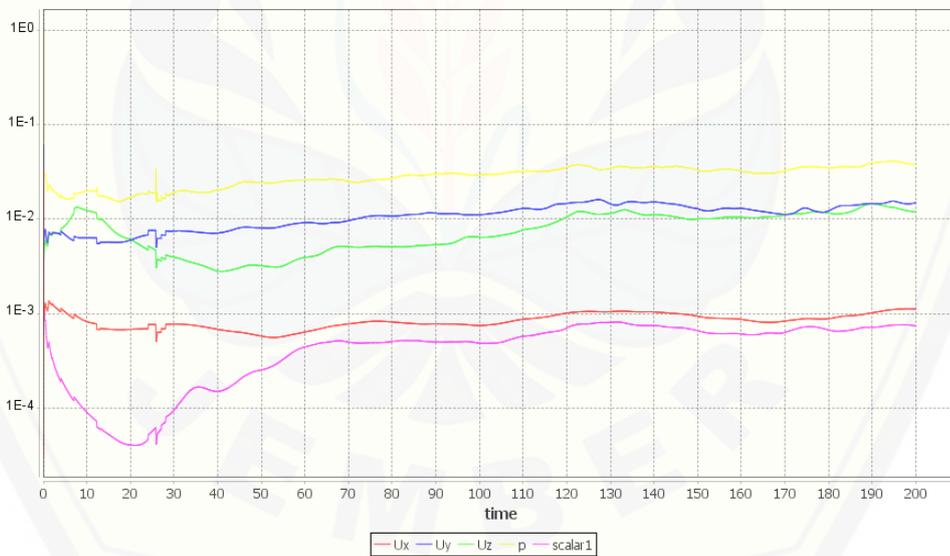
Lampiran 3.2 Pengaturan *Transport Properties* pada Gas NOLampiran 3.3 Pengaturan *Transport Properties* pada Gas CO



Lampiran 4.1 Grafik Laju Alir dan Tekanan Gas SO₂



Lampiran 4.2 Grafik Laju Alir dan Tekanan Gas NO





Lampiran 4.3 Grafik Laju Alir dan Tekanan Gas CO

