



**SIMULASI DISTRIBUSI ALIRAN GAS CO DARI EMISI
CEROBONG MENGGUNAKAN SIMFLOW 3.1**

SKRIPSI

Oleh

Eka Febriyani

151810201034

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2019



**SIMULASI DISTRIBUSI ALIRAN GAS CO DARI EMISI
CEROBONG MENGGUNAKAN SIMFLOW 3.1**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi tugas akhir dan syarat untuk menyelesaikan studi pada
Program Studi Fisika (S-1) dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

Eka Febriyani

151810201034

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2019

PERSEMBAHAN

Assalamualaikum Wr Wb.

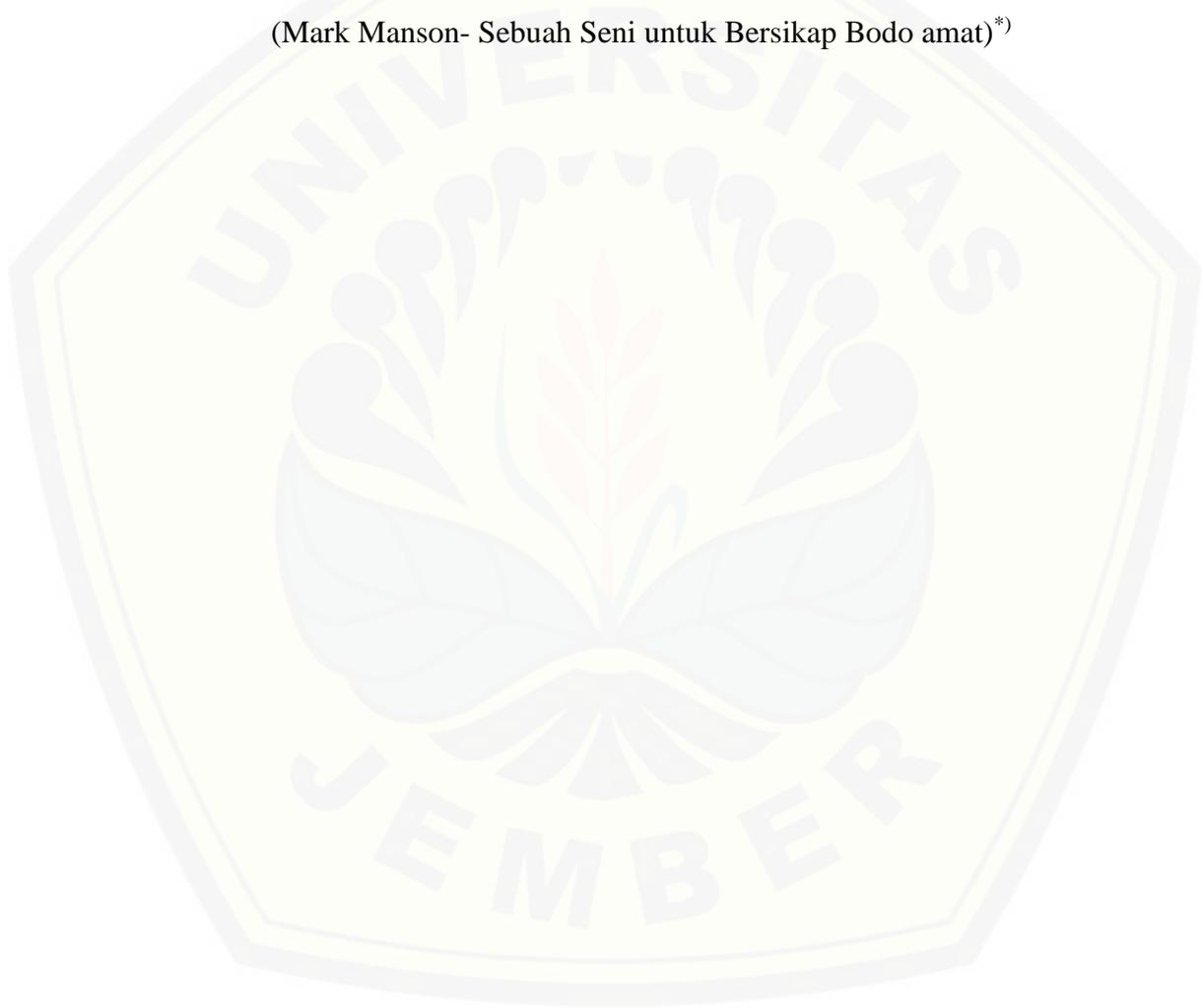
Alhamdulillah wasyukurillah aku panjatkan atas segala rahmat dan nikmat yang telah ALLAH SWT berikan kepadaku. Berkat kuasaNYA skripsi ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu. Skripsi ini saya persembahkan untuk semua keluargaku, terutama Abah Tono dan Ibu Yatemi atas segala do'a yang telah dipanjatkan, motivasi, nasihat, kepercayaan, dan kasih sayangnya yang tak terbatas. Semoga kalian selalu diberikan kesehatan, kebahagiaan, dan perlindungan Allah SWT. Tidak lupa saya persembahkan juga kepada teman – teman keluarga Ganessa Phi 15, teman – teman hijrah, teman – teman satu kosan yang telah ikut membantu dalam proses menyelesaikan skripsi dan juga saya persembahkan skripsi untuk Dosen – Dosen pembimbing yang senantiasa membimbing saya hingga terselesainya skripsi ini. Demikian saya ucapkan terimakasih banyak untuk teman – teman dan semua yang tidak bisa saya sebutkan satu – satu.

Wassalamualaikum Wr. wb

MOTO

“Derita adalah bagian dari proses. Penting untuk merasakannya. Karena jika anda hanya mengejar kesenangan di atas rasa sakit, membiarkan diri terlena dalam kepongahan dan pemikiran positif yang delusional, terus memanjakan diri dalam berbagai hal atau kegiatan, anda tidak akan pernah menemukan motivasi yang menjadi syarat untuk benar-benar berubah”.

(Mark Manson- Sebuah Seni untuk Bersikap Bodo amat)^{*)}



^{*)} Manson, Mark. 2019. Sebuah Seni Bersikap Bodo Amat. Jakarta: PT. Gramedia.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Eka Febriyani

NIM : 151810201034

Saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa karya ilmiah ini dengan judul “Simulasi Distribusi Aliran Gas CO dari Emisi Cerobong Menggunakan SIMFLOW 3.1” adalah benar hasil karya saya sendiri, kecuali kutipan – kutipan yang saya sebutkan berdasarkan sumber rujukan yang saya gunakan. Karya ilmiah ini juga belum pernah diajukan pada institusi manapun dan bukan merupakan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas semua kemurnian dan kebenaran dari isi skripsi ini. Hasil penelitian ini juga merupakan bagian dari penelitian bersama dengan dosen dan mahasiswa, sehingga hanya dapat dipublikasikan bersama nama dosen pembimbing saja. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun serta bersedia menerima sanksi akademik jika terdapat pernyataan yang tidak benar.

Jember, 11 Juli 2019

Yang menyatakan,

Eka Febriyani

NIM 151810201034

SKRIPSI

**SIMULASI DISTRIBUSI ALIRAN GAS CO DARI EMISI CEROBONG
MENGUNAKAN SIMFLOW 3.1**

Oleh:

Eka Febriyani

NIM 151810201034

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi Distribusi Aliran Gas CO dari Emisi Cerobong Menggunakan SIMFLOW 3.1”, karya Eka Febriyani 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. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si

NIP. 19811112005012001

NIP. 197208201998021001

Anggota II

Anggota III

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si

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

NIP. 197003271997022001

NIP. 196912251999031001

Mengesahkan

Dekan FMIPA Universitas Jember

Dr. Sujito, Ph.D.

NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Simulasi Distribusi Aliran Gas CO dari Emisi Cerobong Menggunakan SIMFLOW 3.1; Eka Febriyani, 151810201034; 2019; 67 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Cerobong merupakan tempat pembuangan asap atau gas buang yang berasal dari industri menuju atmosfer. Kebutuhan industri pengolahan pangan yang terus meningkat, sehingga dibutuhkan konstruksi tempat pembuangan gas diharapkan dapat menghasilkan gas dengan aliran fluida setinggi-tingginya. Hal ini diperlukan agar polutan tidak mudah mencemari daerah sekitar cerobong yang dekat dengan permukaan tanah. Melalui sebuah kegiatan simulasi, karakteristik aliran fluida dapat dikembangkan tanpa membutuhkan biaya eksperimen yang relatif besar. Di dalam penelitian ini, dilakukan simulasi karakteristik aliran fluida di bawah pengaruh variasi jarak dengan menggunakan metode *computational fluid dynamic* (CFD).

Kegiatan diawali dengan melakukan instalasi program SIMFLOW 3.1 pada komputer. Langkah selanjutnya adalah menyiapkan *file input* untuk kegiatan simulasi berupa data fisik dari cerobong. Setelah itu menyiapkan parameter komputasi yang digunakan yaitu nilai viskositas kinematik gas CO, dan solusi yang akan digunakan. Simulasi laju alir gas CO dilakukan pada jarak 10 m sampai 70 m. Data *output* yang diperoleh dari simulasi berupa nilai kecepatan dan tekanan gas dari beberapa variasi jarak. Data lain yang diperoleh adalah hubungan kecepatan terhadap tekanan sebagai fungsi jarak.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kecepatan yang diperoleh berpengaruh terhadap nilai tekanan gas yang didapatkan. Pola nilai kecepatan dapat dilihat dari pengamatan pada jarak 10 m sampai dengan 70 m. Pada hasil tersebut, diperoleh bahwa nilai kecepatan maksimal didapatkan pada jarak 40 m, sedangkan nilai kecepatan minimum terjadi pada jarak 20 m. Pada jarak 50 m sampai 70 m nilai kecepatan gas mengalami stagnasi atau relatif konstan. Nilai kecepatan pada arah x, y, dan z memiliki pola yang hampir sama. Setelah nilai kecepatan pada arah x, y, dan z didapatkan maka dapat dicari nilai kecepatan totalnya. Nilai kecepatan total ini akan dibandingkan dengan nilai tekanan yang didapatkan pada hasil simulasi. Nilai tekanan pada simulasi berbanding lurus dengan nilai kecepatan yang diperoleh. Apabila nilai kecepataannya naik maka tekanannya pun akan naik. Begitu juga dengan sebaliknya apabila nilai kecepataannya turun maka nilai tekanan gasnya pun akan ikut turun. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai kecepatan sangat dipengaruhi oleh nilai tekanan gas yang didapatkan.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas berkat, rahmat dan karuniaNYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Simulasi Distribusi Aliran Gas CO dari Emisi Cerobong Menggunakan SIMFLOW 3.1” Sholawat serta salam semoga selalu menuntun kita dalam menggapai ridhoNya. Skripsi ini saya susun untuk memenuhi tugas dan syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Penyusunan skripsi ini juga tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh sebab itu, saya sebagai penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Ibu Endhah Purwandari, S.Si., M.Si, selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu membimbing untuk terselesaikannya penulisan skripsi ini.
2. Ibu Nurul Priyantari, S.Si., M.S.i. dan Dr. Artoto Arkundanto, S.Si., M.Si selaku Dosen penguji yang senantiasa memberikan kritik dan saran terhadap penulisan skripsi ini
3. Bapak Dr. Lutfi Rohman, S.Si selaku Dosen Pembimbing Anggota dan Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama menjadi mahasiswa di jurusan fisika.
4. Serta segenap dosen – dosen jurusan fisika, dan semua teman teman Ganesha Phi 15, teman kost brantas, teman – teman semua yang senantiasa mendampingi dan memberikan saran atas penulisan skripsi ini.

Penulis mengucapkan terimakasih atas semua dukungan pihak terkait sehingga skripsi dapat tersusun dengan baik meskipun masih jauh dari sempurna. Penulis akan senantiasa menerima saran dan kritik untuk lebih menyempurnakan penulisan skripsi ini.

Jember, 10 Juli 2019

Penulis

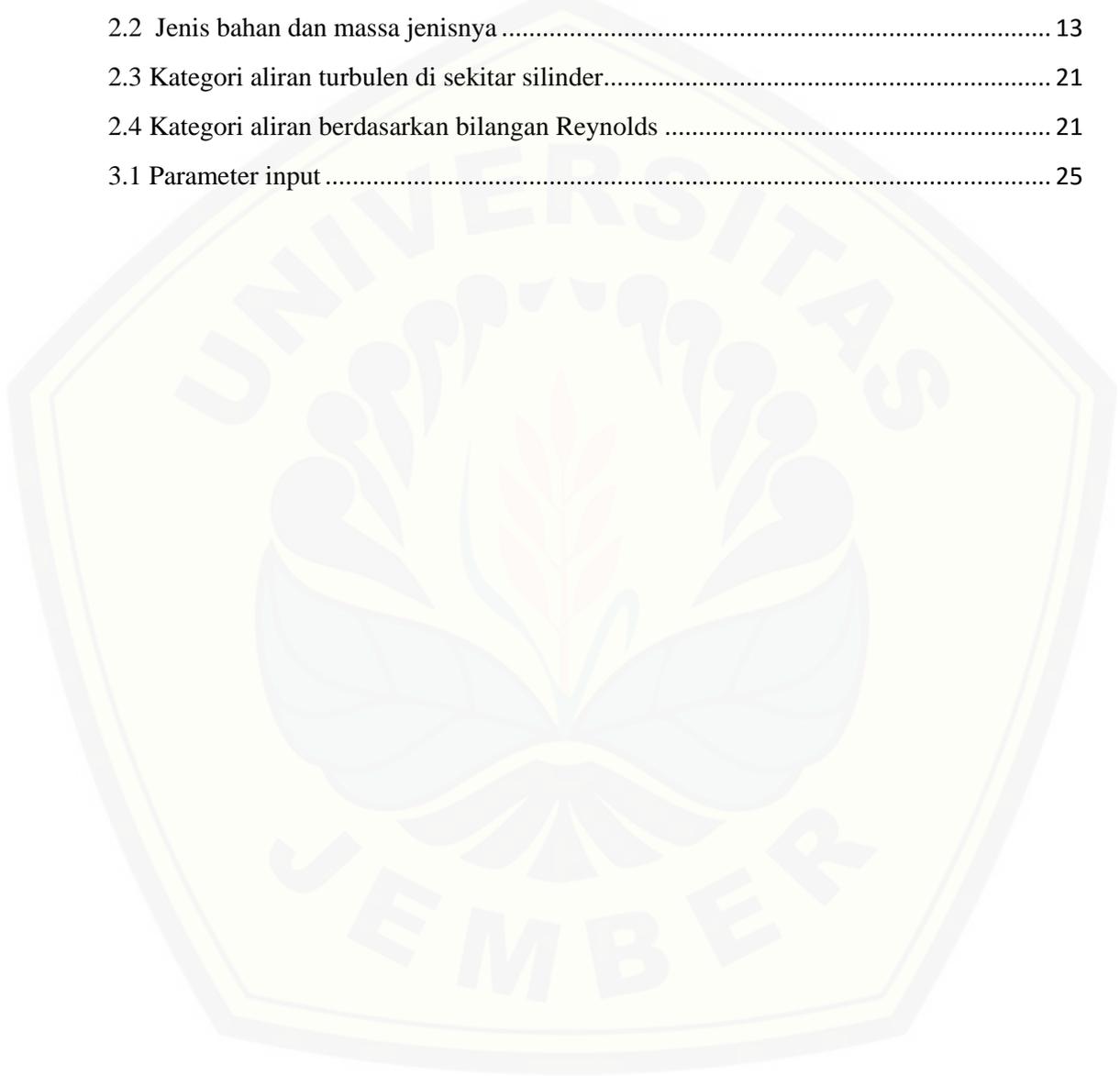
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	vi
HALAMAN RINGKASAN	vii
HALAMAN PRAKATA	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pencemaran Udara	6
2.1.1 Sumber dan Jenis Pencemaran Udara	6
2.1.2 Karakteristik Karbon Monoksida (CO)	7
2.1.3 Faktor yang mempengaruhi pencemaran udara	9
2.2 Cerobong Asap	11
2.3 Mekanika Fluida	11
2.3.1 Fluida Statis dan Dinamis	11
2.3.2 Sifat Dasar Fluida	12
2.4 Aliran Fluida	13
2.4.1 Klasifikasi Aliran Fluida	13
2.4.2 Kecepatan dan Kapasitas Aliran Fluida	13
2.4.3 Jenis Aliran Fluida	14
2.5 Computational Fluid Dynamic (CFD)	15
2.5.1 Sejarah CFD	16
2.5.2 Proses Perhitungan CFD	16

2.6 Metode Numerik	17
2.6.1 Metode Beda Hingga (<i>Finite Difference</i>)	17
2.6.2 Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element</i>)	17
2.6.3 Metode Volume Hingga (<i>Finite Volume Method</i>)	17
2.7 Simflow	17
2.8 Pendekatan Model	19
2.8.1 Persamaan Navier-Stokes	19
2.8.2 Persamaan Kontinuitas.....	20
2.8.3 Persamaan Turbulensi	20
BAB 3. METODE PENELITIAN	22
3.1 Rancangan Penelitian	22
3.2 Jenis dan Sumber Data	23
3.3 Definisi Operasional Variabel	23
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah	23
3.6 Metode Analisis Data	29
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Analisis Kecepatan pada Variasi Jarak Sebaran	32
4.2 Analisis Tekanan pada Variasi Jarak	35
BAB 5. PENUTUP	38
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Baku mutu faktor fisika dan faktor kimia	8
2.2 Jenis bahan dan massa jenisnya	13
2.3 Kategori aliran turbulen di sekitar silinder.....	21
2.4 Kategori aliran berdasarkan bilangan Reynolds	21
3.1 Parameter input	25

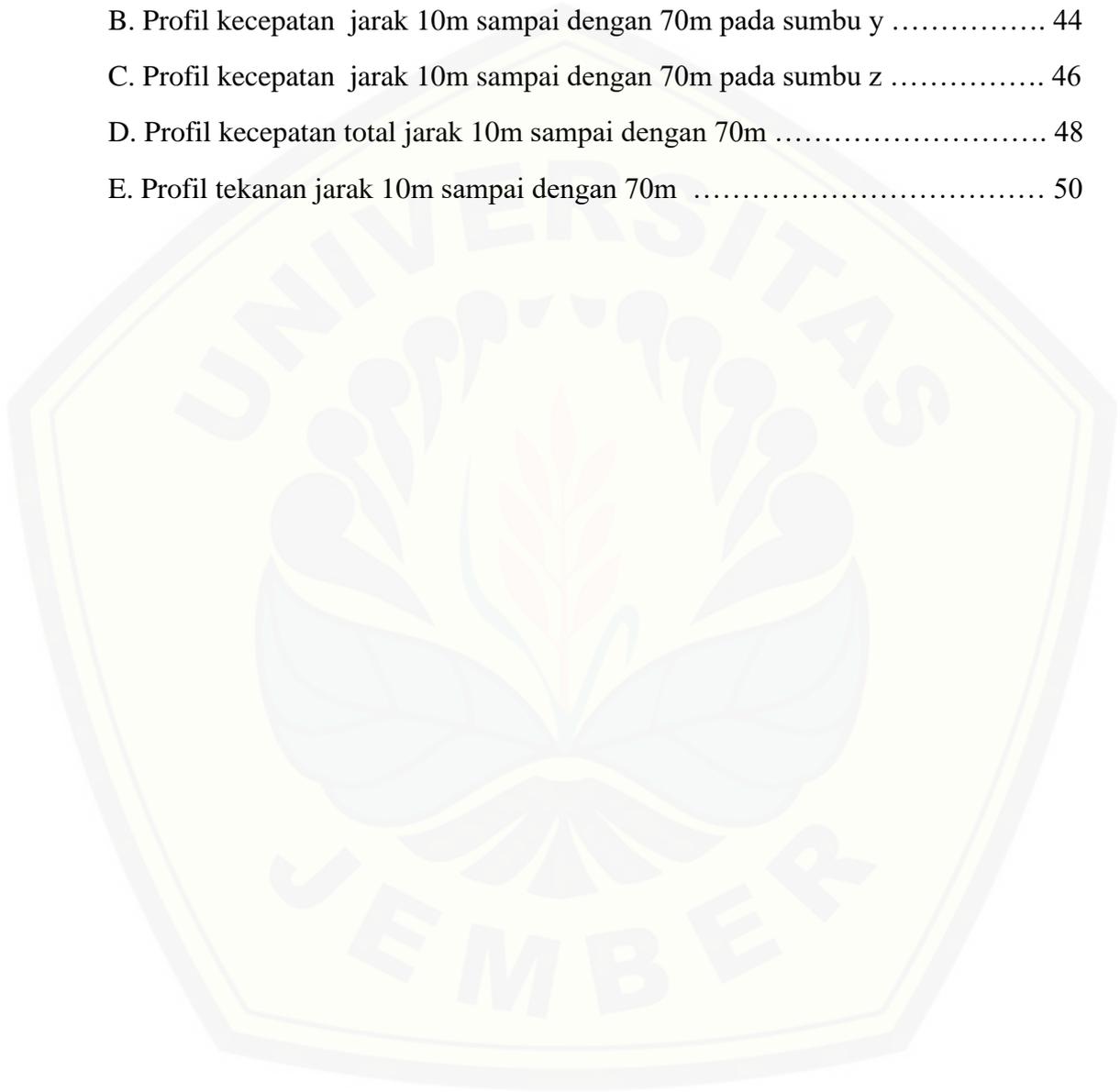


DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2. 1 Bentuk Kepulan dari sumber titik (a) <i>looping</i> (b) <i>coning</i> (c) <i>fanning</i> (d) <i>lofting</i> (e) <i>fumigattion</i>	10
2. 2 Profil kecepatan aliran tertutup	14
2. 3 SimFlow 3.1	18
3. 1 Diagram Alir Penelitian	24
3. 3 Proses hex meshing	26
3. 4 Penentuan kondisi batas	27
4. 1 Profil kecepatan dalam arah x (U_x) sebagai fungsi jarak.	32
4. 2 Profil kecepatan dalam arah y (U_y) sebagai fungsi jarak	33
4. 3 Profil kecepatan dalam arah z (U_z) sebagai fungsi jarak	34
4. 4 Profil Profil variasi kecepatan resultan (U_R).....	335
4. 5 Profil variasi tekanan sebagai fungsi jarak.....	36
4. 6 Hubungan tekanan dengan kecepatan pada pengamatan 80 s.....	37

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Profil kecepatan jarak 10m sampai dengan 70m pada sumbu x	42
B. Profil kecepatan jarak 10m sampai dengan 70m pada sumbu y	44
C. Profil kecepatan jarak 10m sampai dengan 70m pada sumbu z	46
D. Profil kecepatan total jarak 10m sampai dengan 70m	48
E. Profil tekanan jarak 10m sampai dengan 70m	50



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat bahwa pertumbuhan ekonomi di Indonesia tahun 2018 naik 4,07% dibandingkan pada tahun 2017. Kenaikan tersebut terjadi hampir di semua lapangan usaha, kecuali di bidang industri komputer dan barang elektronik. Pertumbuhan ekonomi industri pengolahan hanya naik sebesar 8,54% pada tahun 2018 padahal industri pengolahan merupakan sumber yang besar sebagai tulang punggung perekonomian. Berdasarkan penjelasan tersebut industri merupakan suatu hal yang memiliki peran penting dalam kemajuan hidup manusia. Pengolahan dari industri menghasilkan berbagai produk yang sangat bermanfaat bagi kelangsungan hidup manusia, namun disisi lain kegiatan industri tersebut memiliki dampak negatif berupa pencemaran lingkungan yang dapat menghambat siklus kelangsungan hidup sebagaimana mestinya. Pencemaran tersebut bisa berupa cair, padat, ataupun gas buang berupa asap yang berasal dari cerobong pembuangan dari pabrik. Asap pabrik terdiri dari berbagai polutan yang dapat menyebabkan pencemaran udara. Bahan polutan yang terdapat pada asap tersebut meliputi gas karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO) dan sulfur dioksida (SO_2). Bahan-bahan tersebut dapat menyebabkan degradasi lingkungan yang dapat memicu terjadinya *global warming*. Dampak buruk polutan bagi kesehatan manusia salah satunya adalah kandungan karbon monoksida (CO).

Pencemaran udara dapat dipengaruhi dari berbagai hal, salah satunya adalah kendaraan bermotor. Kendaraan bermotor menghasilkan polutan ke atmosfer berupa gas CO, NO_x , hidrokarbon, SO_2 , dan tetraethyl lead (Soedomo, 2001). Karbon monoksida memiliki banyak sumber pencemar, sumber pencemar gas CO yang terbesar berasal dari pemakaian bahan bakar fosil (minyak dan batubara) pada mesin penggerak transportasi (Hadihardaja, 2007). Sektor transportasi ini merupakan sumber pencemaran yang bergerak. Sumber pencemaran bergerak meliputi semua sumber pencemaran udara yang bergerak seperti mobil, truk, bus, motor, pesawat, kapal (Cooper dan Alley, 2002). Penyebab lain dari pencemaran

adalah pencemaran yang berasal dari gas buang berupa asap yang berasal dari cerobong pembuangan dari industri rumah tangga. Cerobong juga memiliki bentuk yang berbeda tergantung dengan industrinya. Bentuk geometri dari cerobong juga sangat berpengaruh terhadap sebaran polutan terhadap lingkungan. Pane (2014) telah melakukan penelitian tentang pengembangan tungku gasifikasi arang. Hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa bentuk geometri cerobong gas bakar memiliki peranan penting terhadap performa dari tungku tersebut.

Karakteristik aliran gas polutan CO yang dihasilkan oleh berbagai bentuk cerobong gas menjadi menarik untuk dianalisis. Konstruksi tempat pembuangan gas diharapkan dapat menghasilkan gas dengan aliran fluida setinggi-tingginya. Hal ini diperlukan agar polutan tidak mudah mencemari daerah sekitar cerobong yang dekat dengan permukaan tanah. Melalui sebuah kegiatan simulasi, karakteristik aliran fluida dapat dikembangkan tanpa membutuhkan biaya eksperimen yang relatif besar. Di dalam penelitian ini, akan dilakukan simulasi karakteristik aliran fluida di bawah pengaruh variasi jarak dengan menggunakan metode *computational fluid dynamic* (CFD).

Karakteristik aliran fluida (gas) yang dianalisis pada bentuk saluran gas tertentu telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Dengan menggunakan *software* ANSYS CFD FLUENT, Fathoni (2018) menganalisis karakteristik fluida pada pipa circular dengan jenis aliran turbulen. Edo (2018) melakukan penelitian tentang prediksi erosi partikel pasir menggunakan pemodelan CFD dengan aplikasi ANSYS *student version* 19.0. Prediksi erosi dalam aliran gas turbulen dilakukan dengan memvariasi ukuran partikel dan kecepatan fluida. Hasil simulasi menunjukkan bahwa CFD mampu memprediksi laju erosi secara baik. Berdasarkan penjelasan dari beberapa peneliti dilakukan kembali penelitian aliran fluida pada cerobong asap industri rumah tangga menggunakan metode CFD dengan menggunakan *software* SIMFLOW 3.1. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasi ukuran jarak sebaran polutan dari gas CO pada cerobong asap yang dilakukan pada titik tertentu. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan tambahan pelajaran tentang sebaran polutan sebab di Indonesia model untuk simulasi penyebaran polutan belum banyak digunakan sementara kebutuhan industri pangan ataupun listrik

semakin meningkat sehingga perlu ada kajian lebih mengenai penelitian ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu penyelesaian masalah apabila ada dari salah satu pabrik yang melakukan kesalahan dalam pembuangan gas CO yang sampai pada pemukiman warga yang seharusnya dibuang setinggi-tingginya agar tidak jatuh ke pemukiman warga.

Pemodelan pada simulasi ini menggunakan model matematis yang dapat menjelaskan aliran fluida, guna mendapatkan hasil untuk menjelaskan kecepatan dan tekanan dari aliran gas CO yang dihasilkan oleh cerobong asap dari rumah tangga. Adapun solusi dari permasalahan matematis dalam fluida yang dimodelkan diselesaikan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD), yang mempelajari prediksi aliran fluida dan perpindahan panas dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika. CFD sudah banyak digunakan pada berbagai permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida salah satunya adalah dispersi polutan (Tang *et al.* 2006). CFD merupakan suatu sistem yang dapat menjelaskan tentang aliran fluida, perpindahan panas dan yang berhubungan dengan reaksi kimia dengan simulasi menggunakan komputer (Versteeg, 1995).

Penyelesaian permasalahan aliran fluida cerobong asap ini membutuhkan bantuan perangkat lunak untuk memudahkan dalam pengerjaannya. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah SIMFLOW berbasis CFD. Perangkat ini sering digunakan dalam berbagai hal yang berhubungan dengan *engineering* karena pengaplikasiannya yang cukup mudah. Aplikasi ini tidak membutuhkan berbagai bahasa pemrograman yang rumit sehingga lebih memudahkan. Permasalahan mengenai aliran fluida yang semakin kompleks menjadi latar belakang pembuatan model untuk simulasi penyebaran polutan, dengan CO sebagai jenis polutan yang akan dipelajari.

Kegiatan simulasi yang akan dilakukan dapat diklasifikasikan ke dalam tiga tahapan pekerjaan. Ketiga tahapan tersebut meliputi *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*. *Preprocessing* merupakan tahap pembuatan model geometri sesuai dengan ukuran yang akan diteliti, diikuti dengan penentuan jumlah grid atau mesh dan kondisi batas dari geometri tersebut. Di dalam tahap ini, ditentukan pula model transport dari jenis gas yang akan dipelajari, dengan beberapa parameter spesifik

gas yang sudah tersimpan pada software SIMFLOW. *Solving* merupakan proses penghitungan solusi dari persamaan-persamaan yang terdapat dalam model CFD , yang diselesaikan dengan menggunakan bantuan program komputer sesuai dengan kondisi-kondisi yang telah ditentukan pada saat *preprocessing* sebelumnya. Langkah terakhir dalam kegiatan simulasi adalah *postprocessing*. Di dalam tahap ini, seluruh hasil perhitungan/solusi yang didapatkan dari langkah sebelumnya diinterpretasikan ke dalam beberapa bentuk diantaranya adalah grafik, kurva, animasi, gambar 2D maupun 3D.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi jarak sebagai pola sebaran polutan cerobong terhadap aliran gas CO menggunakan metode CFD.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Karakteristik aliran fluida gas polutan yang disimulasikan hanya meliputi kecepatan dan tekanan dari aliran gas CO.
2. Jenis aliran gas yang digunakan diasumsikan bersifat laminar.

1.4 Tujuan

Tujuan dari kegiatan penelitian tugas akhir ini adalah mengetahui pengaruh variasi jarak terhadap sebaran polutan cerobong dari aliran gas CO menggunakan metode CFD.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat mempelajari aplikasi penggunaan metode CFD dalam mendeskripsikan karakteristik aliran gas. Disamping itu, hasil

penelitian dapat digunakan sebagai bahan referensi mengenai karakteristik aliran gas CO pada cerobong asap



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Udara

Pencemaran udara adalah hadirnya beberapa zat yang tidak diinginkan di atmosfer, baik alami ataupun akibat aktivitas manusia yang melebihi ambang batas dan membahayakan bagi manusia, hewan, tumbuhan, atau material disekitarnya (Seinfeld 1986; Never 2000). Pencemaran udara dapat disebabkan dari alam ataupun kegiatan manusia. Pencemaran yang berasal dari alam berupa, debu akibat vulkanik, kebakaran hutan, dan pancaran garam dari laut. Sumber yang paling sering dijumpai adalah sumber pencemar dari aktivitas manusia. Sumber pencemaran udara yang ditimbulkan akibat aktivitas manusia antara lain akibat industri, transportasi, pembangunan, dan pertambangan (Soedomo, 2001). Berdasarkan definisi tersebut, semua partikel atau zat yang berupa padat, cair, ataupun gas yang melebihi dari ambang batas yang dapat membahayakan makhluk hidup dapat disebut sebagai zat pencemar atau polutan.

2.1.1 Sumber dan Jenis Pencemaran Udara

Sumber pencemaran dapat disebabkan oleh dua sumber, yaitu alam (*biogenic*) dan aktivitas manusia (*anthropogenic*). Sumber pencemaran udara menurut Soedomo (2001) adalah sebagai berikut :

- a. Sumber titik pencemaran udara contohnya adalah cerobong asap dari suatu pabrik.
- b. Sumber garis contohnya adalah transportasi yang bergerak sehingga emisinya berbentuk garis, deretan pabrik di sepanjang sungai atau jalan.
- c. Sedangkan sumber area contohnya adalah suatu kota, dimana terdapat berbagai macam jenis pencemar seperti industri, dan transportasi.

Menurut Soenarmo (1999), sumber yang dapat memancarkan zat pencemar ke udara (atmosfer) ada tiga macam, yaitu :

1. Sumber titik kontinyu, meliputi cerobong asap dari pabrik tenaga listrik yang memancarkan zat pencemar ke dalam udara

2. Sumber garis, meliputi emisi yang dikeluarkan oleh kendaraan bermotor yang bergerak
3. Sumber bidang atau area, merupakan sumber pencemar yang terpancar dari suatu daerah, seperti perkotaan atau kawasan industri.

Penggolongan sumber pencemaran udara yang lain berdasarkan PP No. 41 tahun 1999 adalah :

- a. Sumber bergerak adalah sumber pencemaran udara yang emisinya bergerak atau tidak tetap pada suatu tempat yang berasal dari kendaraan bermotor.
- b. Sumber bergerak spesifik merupakan sumber yang hampir sama dengan sumber bergerak namun berasal dari pesawat, kereta api, dan kapal laut.
- c. Sumber tidak bergerak adalah sumber yang emisinya tetap yang berada pada suatu tempat. Contohnya adalah sumber dari cerobong asap suatu industri.
- d. Sumber tidak bergerak spesifik adalah sumber yang berasal dari kebakaran hutan dan pembakaran sampah.
- e. Sumber gangguan adalah sumber yang menggunakan media udara atau padat sebagai media penyebaran. Contoh dari sumber gangguan ini adalah bau, dan kebisingan.

Menurut Riyadi (1982) polutan diudara dapat dibedakan berdasarkan asal mula dan kelanjutan perkembangannya yaitu polutan primer dan sekunder. Polutan primer merupakan polutan yang berasal dari aktivitas manusia atau proses alami. Polutan primer meliputi karbon monoksida (CO), CO₂, SO₂, MO, NO₂, dan partikulat. Polutan sekunder adalah polutan yang terbentuk akibat hasil reaksi dari perpaduan polutan primer dengan komponen yang lain.

2.1.2 Karakteristik Karbon Monoksida (CO)

Menurut Fardiaz (1992), gas CO berasal dari alam seperti aktivitas gunung berapi, emisi gas alam, dan pancaran dari kilat. Gas CO yang berasal dari alam tidak sebesar yang berasal dari aktivitas manusia. Gas karbon monoksida merupakan gas yang sebagian besar berasal dari proses pembakaran gas alam. Sumber emisi gas CO akibat aktivitas manusia adalah transportasi, industri, dan pembakaran sampah serta sisa hasil pertanian. Gas CO juga terbentuk dari beberapa proses, yaitu

pembakaran yang tidak sempurna, reaksi karbon dioksida dengan karbon yang terjadi pada suhu tinggi, dan penguraian karbon dioksida pada suhu tinggi.

Karbon monoksida adalah unsur polutan yang paling banyak dibandingkan dengan polutan lain di atmosfer. Persebaran CO banyak dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang ada di suatu daerah. Persebaran ini dapat dihilangkan oleh mikroorganisme yang ada di tanah. Tanah terbuka yang sudah jarang saat ini menyebabkan jumlah gas CO semakin meningkat. Karbon monoksida merupakan sumber pencemar primer. Polutan ini berperan dalam perubahan iklim global, terutama *global warming*. Karbon monoksida merupakan polutan yang berbahaya. Kadar gas CO yang tinggi dapat menyebabkan kematian pada manusia. Konsentrasi yang lebih rendah dari gas CO juga berpengaruh pada kesehatan manusia, karena reaksi antara CO dengan Hemoglobin (Hb) di dalam darah (Kaufman dan Cleveland, 2008).

Menurut Akmal (2009) karbon monoksida (CO) yang terhisap ke dalam paru-paru akan ikut peredaran darah dan akan menghalangi masuknya oksigen yang dibutuhkan tubuh. Hal ini dapat terjadi karena gas CO bersifat racun metabolisme, sehingga ikut bereaksi secara metabolisme dengan darah. Kadar konsentrasi gas CO yang sangat tinggi dapat menyebabkan kematian (Syahputra, 2005). Berdasarkan PER.13/MEN/X/2011 tentang faktor fisika dan faktor kimia di tempat kerja dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.1 Baku mutu faktor fisika dan faktor kimia

No.	Parameter	NAB (ppm)
1.	Karbon dioksida	5000
2.	Karbon disulfide	10
3.	Karbon monoksida	25
4.	Nitrogen	25
5.	Gasolin	300

Sumber : web.ipb.ac.id

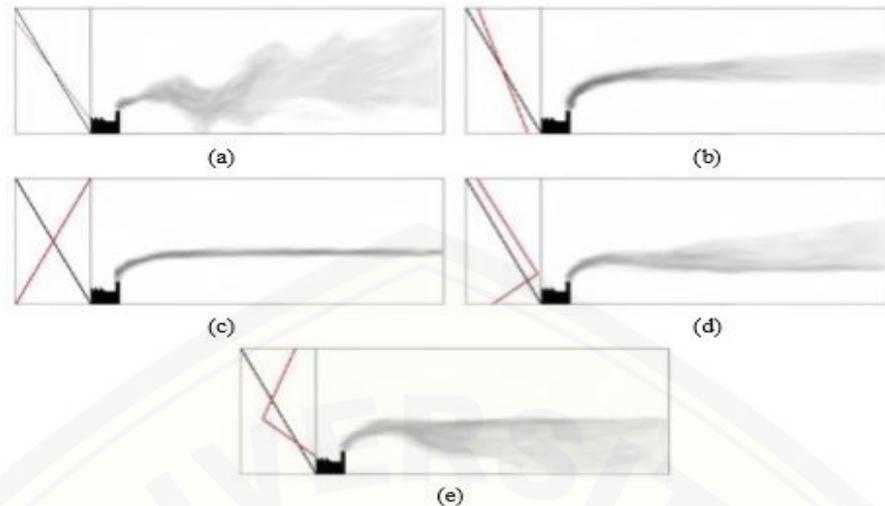
Ahmad (2004) menjelaskan bahwa, karbon monoksida terdiri dari satu atom karbon yang secara kovalen berikatan dengan satu atom oksigen. Ikatan ini

membentuk dua ikatan kovalen dan satu ikatan kovalen koordinasi. Molekul CO memiliki daya ikat 0,1128 nm hal ini disebabkan karena orbital molekul yang terenuhi paling tinggi memiliki energi yang lebih dekat dengan orbital p karbon menyebabkan rapatan elektron yang lebih besar dekat yang lebih baur.

Akibat karbon monoksida bagi kesehatan tidak mengiritasi namun sangat berbahaya / beracun makannya diberi sebutan “*silent killer*”. Gas CO sangat berbahaya apabila terhirup oleh manusia gas itu akan menggantikan posisi oksigen yang berkaitan dengan haemoglobin dalam darah. Reaksi gas CO dengan haemoglobin 200 kali lebih berbahaya dibandingkan reaksi oksigen dengan haemoglobin (Lindell, 2009).

2.1.3 Faktor yang mempengaruhi pencemaran udara

Menurut Soenarmo (1999), faktor–faktor yang mempengaruhi mekanisme pencemaran udara adalah sumber emisi dan atmosfer lokal. Sumber emisi sendiri dapat diartikan sebagai tempat atau lubang dikeluarkannya zat pencemar menuju ke dalam atmosfer. Sumber tersebut memiliki karakteristik dan bentuk fisik yang berbeda mulai dari bentuk, luas dan tinggi lubang. Karakteristik dari sumber emisi adalah laju pancaran (Q), kecepatan, geometri sekitar emisi, dan bahan bakar yang digunakan. Faktor lain yang mempengaruhi mekanisme pencemaran udara adalah stabilitas atmosfer. Stabilitas atmosfer ini dapat mempengaruhi pergerakan polutan secara vertikal dan mempengaruhi bentuk kepulan dari cerobong. Bentuk kepulan dari cerobong secara umum ada lima, yaitu *looping*, *coning*, *fanning*, *lofting*, dan *fumigation* (Oke, 1978).



Gambar 2.1 Bentuk Kepulan dari sumber titik (a) *looping* (b) *coning* (c) *fanning* (d) *lofting* (e) *fumigation* (Saperaud, 2005)

Pada Gambar 2.1 dapat dilihat berbagai bentuk keputan. Bentuk keputan *looping* (Gambar 2.1a) memiliki pengaruh turbulensi yang cukup besar. Kondisi ini terjadi saat keadaan atmosfer tidak stabil biasanya terjadi pada siang hari terik. Bentuk ini lebih menguntungkan karena polutan tersebut konsentrasinya lebih rendah akibat pencampuran dengan udara sekitar. Bentuk keputan *coning* (Gambar 2.1b) terbentuk saat kondisi atmosfer mendekati netral biasanya pada keadaan mendung. Pencampuran secara vertikal dan turbulensi sehingga polutan cenderung lebih tersebar secara horizontal. Bentuk *fanning* (Gambar 2.1c), konsentrasi polutan cukup tinggi karena pencampuran secara vertikal dan turbulensi hampir tidak ada. Hal tersebut menyebabkan polutan terkonsentrasi dan terpusat dengan bentuk seperti garis tebal yang konstan di atmosfer. Bentuk *lofting* (Gambar 2.1d), terbentuk pada sore hari menjelang malam ketika didekat kondisi atmosfer stabil sedangkan di atasnya atmosfer tidak stabil hal ini mengakibatkan bagian atas keputan terlihat terjadi turbulensi dibandingkan yang bawah. Bentuk keputan yang terakhir yaitu *fumigation* (Gambar 2.1e), merupakan bentuk paling buruk. Menjelaskan bahwa polutan yang berada dibawah tidak dapat terdispersi keatas melewati daerah yang stabil sehingga polutan bercampur ke daerah dekat permukaan.

2.2 Cerobong Asap

Cerobong asap merupakan struktur untuk ventilasi panas gas buang atau asap dari boiler, kompor, tungku atau perapian ke luar atmosfer. Cerobong asap biasanya berbentuk vertikal, untuk memastikan bahwa aliran gas lancar. Ruang di dalam cerobong asap disebut asap. Cerobong asap dapat ditemukan pada bangunan, lokomotif uap dan kapal di Amerika Serikat, cerobong asap istilah (bahasa sehari-hari, *stack*) juga digunakan ketika mengacu pada cerobong asap lokomotif. Cerobong asap biasanya juga ditemukan pada industri penghasil tenaga listrik ataupun pabrik produksi (Muhammad,Rusdi:2012).

2.3 Mekanika Fluida

Mekanika fluida merupakan cabang ilmu pengetahuan yang mengkaji tentang perilaku dari zat cair dan gas dalam keadaan bergerak ataupun diam. Pada mekanika fluida mempelajari beberapa perilaku fluida, yaitu fluida dalam keadaan diam dan bergerak (dinamika fluida). Pada fluida dalam keadaan diam (statistika fluida) tidak ada tegangan geser yang bekerja pada partikel fluida (Fadhili,2016).

Tekanan terhadap permukaan solid mempengaruhi fluida yang bergerak pada suatu bidang dengan kecepatan U . Tekanan terhadap permukaan solid memiliki persamaan $\tau \cdot A$, dimana τ merupakan tegangan geser sedangkan A merupakan luas permukaan yang dialiri fluida (Fletcher,2006).

2.3.1 Fluida Statis dan Dinamis

a. Fluida Statis

Fluida statis merupakan fluida yang tidak bergerak atau diam, seperti air dalam gelas. Pada fluida statis kita mempelajari beberapa hukum dasar, seperti tekanan hidrostatis, hukum archimedes, kapilaritas dan tegangan permukaan.

b. Fluida Dinamis

Fluida dinamis adalah fluida yang bergerak. fluida ini dipelajari dalam mekanika fluida terutama air dan gas. Permasalahan dinamika fluida dapat diselesaikan dengan melibatkan perhitungan dari sifat fluida, seperti suhu, tekanan, kecepatan dan kepadatan sebagai fungsi ruang dan waktu. Dinamika fluida

memiliki aplikasi yang cukup luas. Contoh aplikasi dari dinamika fluida adalah menghitung momen dan gaya pesawat, *mass flow rate* dari petroleum dalam jalur pipa dan perkiraan cuaca (Fadhili, 2016).

2.3.2 Sifat Dasar Fluida

Fluida adalah suatu zat apabila dalam keadaan setimbang tidak dapat menahan gaya dan tegangan geser. Fluida sangat mudah mengikuti bentuk ruang karena ketahanan fluida terhadap perubahan bentuk sangat kecil. Berdasarkan wujudnya, fluida dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

- a. Fluida cair, adalah fluida dengan partikel yang rapat sehingga menyebabkan gaya tarik antara molekulnya sangat kuat serta memiliki permukaan bebas dan cenderung mempertahankan volumenya.
- b. Fluida gas, adalah fluida memiliki partikel yang renggang karena gaya tarik antara molekul sejenis sangat lemah dan ringan sehingga dapat melayang dengan bebas dengan volume yang tidak menentu.

Menurut Gazali (2018), Fluida memiliki beberapa sifat dasar, yaitu berat jenis, kerapatan, tekanan, kekentalan dan temperatur.

- a. Berat jenis (*specific weight*) dapat dilambangkan dengan γ (gamma) yang didefinisikan sebagai berat tiap satuan volume.
- b. Kerapatan fluida dapat didefinisikan sebagai massa tiap satuan volume pada suatu temperatur dan tekanan tertentu. Kerapatan dapat dilambangkan dengan ρ . Kerapatan ini bervariasi bergantung jenis fluidanya. Kerapatan atau massa jenis berguna untuk menentukan jenis zat. Secara matematis massa jenis dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.1)$$

Keterangan :

m= massa jenis (kg)

V = volume (m³)

ρ = massa jenis/ kerapatan (kg/m³)

Beberapa massa jenis beserta bahannya dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 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,1988

- c. Tekanan dapat didefinisikan sebagai gaya (F) pada tiap satuan luas (A).
- d. Kekentalan dapat diartikan sebagai tahanan internal terhadap aliran, dapat juga didefinisikan sebagai gesekan dari fluida. Pengertian sederhana dari kekentalan adalah bahwa semakin kecil nilai viskositas maka semakin mudah fluida untuk bergerak.

2.4 Aliran Fluida

2.4.1 Klasifikasi Aliran Fluida

Jenis aliran dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

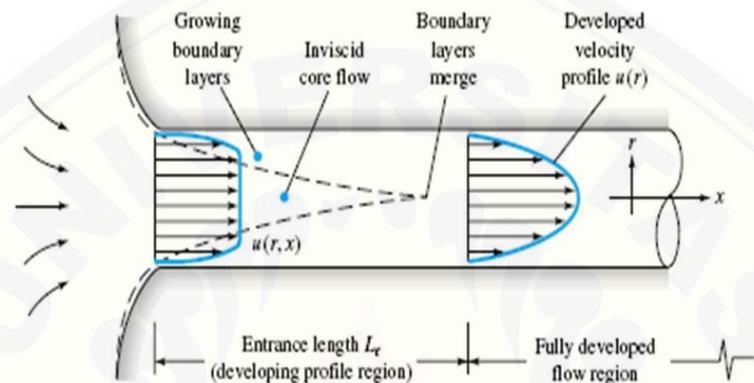
- a. Aliran Tunak (*steady*) merupakan suatu aliran dimana kecepatannya tidak terpengaruh oleh perubahan waktu, sehingga kecepatan konstan pada setiap titik.
- b. Aliran tidak Tunak (*unsteady*) merupakan suatu aliran dimana terjadi perubahan kecepatan setiap waktu

2.4.2 Kecepatan dan Kapasitas Aliran Fluida

Pengukuran kecepatan merupakan fase yang sangat penting dalam menganalisa suatu aliran fluida karena dapat membantu dalam menentukan besarnya kapasitas aliran. Kecepatan dapat diperoleh dengan melakukan

pengukuran terhadap waktu yang dibutuhkan suatu partikel untuk bergerak sepanjang jarak yang telah ditentukan (Fadhili, 2016).

Kecepatan biasanya sudah cukup untuk menempatkan kekeliruan yang wajar dalam masalah aliran fluida. Besar kecepatan aliran fluida akan mendekati nol pada dinding pipa dan mencapai maksimum pada tengah-tengah pipa.



Gambar 2. 2 Profil kecepatan aliran tertutup

Jumlah dari aliran fluida dapat dinyatakan dalam volume, berat atau massa fluida dengan masing-masing laju aliran yang ditunjukkan sebagai laju aliran volume (m^3/s), laju aliran massa (kg/s) dan laju aliran berat (N/s).

2.4.3 Jenis Aliran Fluida

a. Aliran Laminar

Aliran laminar merupakan aliran dengan fluida bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran memiliki nilai bilangan Reynold kurang dari 2300.

b. Aliran Transisi

Aliran transisi adalah aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Keadaan peralihan ini bergantung pada viskositas fluida, kecepatan dan yang menyangkut geometri aliran. Nilai bilangan Reynold pada aliran transisi ini adalah 2300 sampai 4000.

c. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran yang pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami perputaran antar partikel dan pencampuran yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Nilai bilangan Reynold pada aliran turbulen lebih besar dari 4000.

2.5 Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD merupakan suatu sistem yang dapat menjelaskan tentang aliran fluida, perpindahan panas dan yang berhubungan dengan reaksi kimia dengan simulasi menggunakan komputer (Versteeg, 1995). CFD pada perhitungannya menggunakan menggunakan metode perhitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume yang memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan tiap-tiap elemen pembagiannya. Perhitungan ini menggunakan prinsip mekanika fluida (Ahmad, 2007).

Persamaan yang ada di CFD sangatlah beragam dan cukup kompleks sehingga untuk menyelesaikannya dibutuhkan bantuan *software* (perangkat lunak). Beberapa perangkat lunak berbasis CFD yang sering digunakan diantaranya adalah *Engineering Fluid Dynamics* (EFD), CFX, Flow-3D, Phoenix, Stared, Numeca, Fluent dan yang terbaru adalah Simflow.

CFD ini mempelajari prediksi aliran fluida dan perpindahan panas dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika. CFD sudah banyak digunakan pada berbagai permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida salah satunya adalah dispersi polutan (Duffin *et al.* 2006 dan Tang *et al.* 2006). CFD bisa digunakan dalam penyelesaian fenomena lain dengan menyelesaikan persamaan matematika yang ada. Menurut Tuakia (2008) CFD memiliki berbagai kegunaan yaitu :

1. Bidang arsitektur, seperti mendesain ruangan yang aman dan nyaman
2. Aerodinamika, seperti mendesain kendaraan untuk meningkatkan efisiensi
3. Olahraga, seperti mencari rahasia tendangan melengkung pada sepak bola

4. Kesehatan, seperti cara mengobati penyakit arterial (*computational hemodynamics*) dan ahli keamanan dalam mengurangi resiko kesehatan akibat radiasi
5. Militer, meliputi perkembangan persenjataan dan menganalisa seberapa besar kerusakan yang ditimbulkannya.

2.5.1 Sejarah CFD

Sejarah CFD diawali pada tahun 60-an dan sampai pada tahun 70-an, awalnya konsep CFD hanya digunakan untuk aliran fluida dan reaksi kimia, namun seiring berkembangnya industri pada tahun 90-an membuat CFD menjadi banyak dikenal dan diaplikasikan dalam banyak hal. Contoh pada saat ini banyak paket-paket *software CAD (Computer Aided Design)* yang menyertakan konsep CFD untuk menganalisa *stress* yang terjadi pada desain yang dibuat (Amal,2018). CFD dapat digunakan untuk memprediksi penyelesaian beberapa permasalahan yaitu :

- a. Aliran dan panas
- b. Transfer massa
- c. Perubahan fasa seperti pada proses melting, pengembunan dan pendidihan
- d. Reaksi kimia seperti pembakaran
- e. Gerakan mekanis seperti piston dan fan

2.5.2 Proses Perhitungan CFD

Proses simulasi dalam CFD umumnya terbagi menjadi tiga tahapan, yaitu *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*. *Preprocessing* merupakan langkah awal dalam simulasi yaitu membuat suatu persiapan dengan membangun model geometri yang sesuai dalam bentuk CAD (*Computer Aided Design*), membuat *grid* atau *mesh*, dan menentukan kondisi batas dari geometri tersebut. *Solving* merupakan proses penghitungan dan persamaan-persamaan yang terdapat dalam model CFD tersebut diselesaikan dengan menggunakan bantuan program komputer sesuai dengan kondisi-kondisi yang telah ditentukan pada saat *preprocessing* sebelumnya. Langkah terakhir adalah *postprocessing* yaitu hasil penghitungan dari langkah sebelumnya diinterpretasikan ke dalam beberapa bentuk diantaranya adalah grafik, kurva, animasi, gambar 2D maupun 3D (Fadhili,2016).

2.6 Metode Numerik

Konsep CFD sebenarnya mengganti persamaan-persamaan differensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang awalnya kontinu diubah menjadi diskrit. Solusi numerik memiliki tiga teknik untuk aliran yang berbeda, yaitu *finite difference*, *finite element*, dan *finite volume methods*. Metode diskritisasi ini dipilih untuk menentukan kestabilan program yang dibuat. Beberapa metode diskritisasi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan adalah :

2.6.1 Metode Beda Hingga (*Finite Difference*)

Pada metode ini area aliran dipisahkan menjadi satu *set point grid* dan fungsi kontinyu (kecepatan, tekanan, dan lainnya) didekati dengan nilai diskrit serta fungsi ini dihitung pada titik *grid*. Turunan dari fungsi didekati dengan menggunakan perbedaan antara nilai fungsi pada titik lokal *grid* dibagi dengan jarak *grid*.

2.6.2 Metode Elemen Hingga (*Finite Element*)

Cara kerja metode ini adalah dengan membagi masalah besar menjadi masalah yang lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Persamaan sederhana yang digunakan untuk memodelkan seluruh kasus disusun menjadi satu sistem persamaan yang lebih luas. Penyelesaian dari persamaan ini ditulis dalam bentuk yang tepat untuk setiap elemen, kemudian hasil dari set persamaan aljabar dapat diselesaikan secara numerik.

2.6.3 Metode Volume Hingga (*Finite Volume Method*)

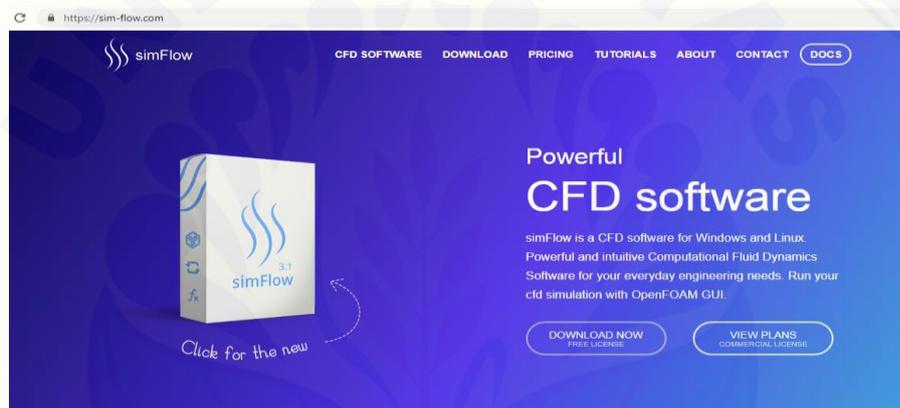
Metode volume hingga adalah metode untuk mewakili dan mengevaluasi persamaan differensial parsial dalam bentuk aljabar. Nilai-nilai dihitung pada tempat terpisah pada geometri yang di *mesh*. Metode ini mengacu pada sekitar node yang memiliki volume kecil diproses mesh. Dalam metode ini *volume integral* dikonversi ke *surface integral* dengan menggunakan teori divergensi.

2.7 Simflow

Simflow adalah perangkat lunak CFD serbaguna yang sangat kuat. simFlow merupakan salah satu perangkat lunak CFD yang menggunakan metode hingga (*finite volume method*) dan menyediakan fleksibel *mesh* yang lengkap sehingga

kasus aliran fluida dapat diselesaikan. Jenis *mesh* yang didukung oleh Simflow antara lain 2D dan 3D. Perangkat ini sering digunakan dalam berbagai hal yang berhubungan dengan *engineering* karena pengaplikasiannya yang cukup mudah. Aplikasi ini tidak membutuhkan berbagai bahasa pemrograman yang rumit sehingga lebih memudahkan.

Perangkat lunak ini diluncurkan pertama kali pada tahun 2013. Perangkat lunak ini berkembang dengan cepat karena peminatnya yang sangat banyak. Berdasarkan peminat yang banyak dilahirkan rapid CFD, OpenFOAM yang sepenuhnya porting pertama kali di GPU. Setelah itu generasi ketiga dari Simflow muncul dengan kemampuan integrasi yang lebih luas dengan dukungan HPC.



Gambar 2. 3 SimFlow 3.1
(sumber : <http://sim-flow.com>)

Simflow memiliki fungsi yang dapat menyelesaikan berbagai fenomena sebagai alat numerik yang komprehensif yaitu :

1. Aliran fluida kompresibel dan tidak kompresif
2. Aliran turbulen
3. Perpindahan panas, termasuk perpindahan panas konjugat
4. Aliran multifase
5. Kavitasi
6. Reaksi kimia

Simflow memiliki model turbulensi yang canggih, dengan skema diskritisasi dan metode numerik. Hasil simulasi dapat membantu Anda dalam menentukan kecepatan dan tekanan turun (SimFlow, 2013).

2.8 Pendekatan Model

2.8.1 Persamaan Navier-Stokes

Persamaan Navier- Stokes menggambarkan kekekalan momentum pada suatu fluida dengan menerapkan hukum II Newton tentang pergerakan fluida. Persamaan Navier-Stokes tidak memberikan hasil yang cukup bagus pada aliran turbulen karena untuk mendapatkan hasil yang bagus harus melakukan *mesh* yang sangat halus sehingga membutuhkan waktu komputasi yang lama. Masalah tersebut dapat diselesaikan menggunakan persamaan *time- averaged* seperti *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) dalam aplikasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Persamaan Navier-Stokes untuk fluida *incompressible*, *unsteady* dan *viscous* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot uu + \nabla P = \frac{1}{Re} \nabla^2 u = \nabla u = 0 \quad (2.2 a)$$

dimana,

u adalah vektor kecepatan berupa (x,y)

P adalah tekanan

Re adalah bilangan Reynolds

Menurut Galdi (2011), Navier-Stokes memperhatikan perubahan komponen u dan v yang sesuai dengan arah x dan y juga waktu t . Kecepatan u dapat ditemukan dengan menggunakan turunan parsial menjadi :

$$\delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y + \frac{\partial u}{\partial t} \delta t \quad (2.2 b)$$

dibagi δt menjadi,

$$\frac{\delta u}{\delta t} = \frac{\partial u \delta x}{\partial x \delta t} + \frac{\partial u \delta y}{\partial y \delta t} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.2 c)$$

$\frac{\delta u}{\delta t}$ adalah komponen kecepatan u .

Persamaan tersebut dikombinasikan dengan persamaan kekekalan massa akan memberikan gambaran dari aliran fluida, sehingga persamaannya menjadi untuk arah x :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.2d)$$

untuk arah y,

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.2e)$$

2.8.2 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas merupakan persamaan matematis yang menyatakan jumlah massa yang masuk ke dalam sistem sama dengan jumlah massa yang keluar sistem. Persamaan kontinuitas dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$v \cdot A = \text{konstan} \quad (2.3 a)$$

atau,

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 A_2 \quad (2.3 b)$$

keterangan :

v = kecepatan aliran (m/s)

A = luas penampang (m^2)

Persamaan kontinuitas dalam bentuk differensial adalah :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3 c)$$

2.8.3 Persamaan Turbulensi

Menurut Sumer dan Fredsoe (2006), aliran turbulen disekitar silinder dapat dikategorikan kembali ke dalam beberapa kriteria (Tabel 2.2). Besar nilai bilangan

Reynolds berpengaruh terhadap terjadinya turbulensi pada aliran tersebut. Turbulensi memiliki peranan yang penting dalam penyebaran dan pencampuran polutan di udara karena dengan adanya turbulensi, polutan akan lebih cepat bercampur dengan udara kemudian tercampur dan terdispersi sehingga konsentrasi konsentrasi polutannya menjadi lebih rendah. Bilangan Reynolds sangat berpengaruh pada pola aliran yang terbentuk di sekitar permukaan silinder yaitu cerobong.

Tabel 2.3 Kategori aliran turbulen di sekitar silinder

Bilangan Reynolds	Kategori Aliran
$300 < Re < 3 \times 10^5$	<i>Subcritical Critical</i>
$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$	<i>(Lower Transition)</i>
$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$	<i>Supercritical Upper</i>
$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$	<i>Transition</i>
$4 \times 10^6 < Re$	<i>Transcritical</i>

Sumber : Fredsoe 2006

Aliran disekitar benda dikatakan turbulen apabila bilangan Reynolds (Re) > 4000 (Frisch, 1995). Persamaan matematis yang digunakan untuk menentukan bilangan Reynolds adalah sebagai berikut :

$$Re = \frac{V}{\frac{\mu}{\rho D}} = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (2.4)$$

dengan V adalah kecepatan (rata-rata) fluida yang mengalir (m/s), μ adalah viskositas dinamik fluida (kg/m.s) , ρ adalah massa jenis fluida (kg.m^{-3}) dan D adalah diameter cerobong (m).

Tabel 2.4 Kategori aliran berdasarkan bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds	Kategori Aliran
$Re < 2300$	Laminar
$2300 < Re < 4000$	Transisi
$Re > 4000$	Turbulen

Sumber : Rott 1990

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Kegiatan penelitian ini dilakukan pada bulan Januari - Juni 2019. Penelitian yang dilakukan merupakan kajian tentang studi karakteristik laju aliran gas CO pada cerobong asap melalui simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Peralatan yang digunakan adalah komputer dengan sistem operasi Windows yang dapat menjalankan program SIMFLOW untuk melakukan simulasi aliran cerobong. Spesifikasi komputer yang digunakan yaitu RAM 3,8 GB, *processor* Intel^(R) CoreTM i3-3240 CPU @ 3,40GHz x 4 dan *system type* 64 bit. Program yang digunakan dalam simulasi ini adalah SIMFLOW versi 3.0 untuk membuat desain geometri dan simulasi aliran gas CO pada cerobong berbasis *Finite Element*.

Penelitian ini diawali dengan studi pustaka dari berbagai sumber berupa jurnal ilmiah, buku, skripsi dan tesis. Hal ini dilakukan sebagai bahan pembelajaran tentang studi karakteristik terhadap topik penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan penginstalan *software* pada komputer. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah SIMFLOW. SIMFLOW digunakan untuk melakukan pembuatan model dan simulasi aliran gas. penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* berlisensi *public* yaitu SIMFLOW versi 3.1 yang dapat dijalankan pada sistem operasi Windows. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode elemen hingga (*finite element method*). Metode elemen hingga memiliki konsep dasar yaitu menyelesaikan permasalahan dengan membagi objek analisa menjadi bagian kecil yang terhingga.

Simulasi *Computational Fluid Dynamic* pada aliran cerobong ini menggunakan persamaan Navier-Stokes pada persamaan 2.1 yang merupakan persamaan momentum sebagai fungsi waktu. Persamaan Navier-Stokes ini menggunakan pendekatan metode elemen hingga. Penggunaan metode elemen hingga ini dapat menyelesaikan permasalahan persamaan Navier-Stokes pada aliran cerobong yang dapat diselesaikan secara numerik.

3.2 Jenis dan Sumber Data

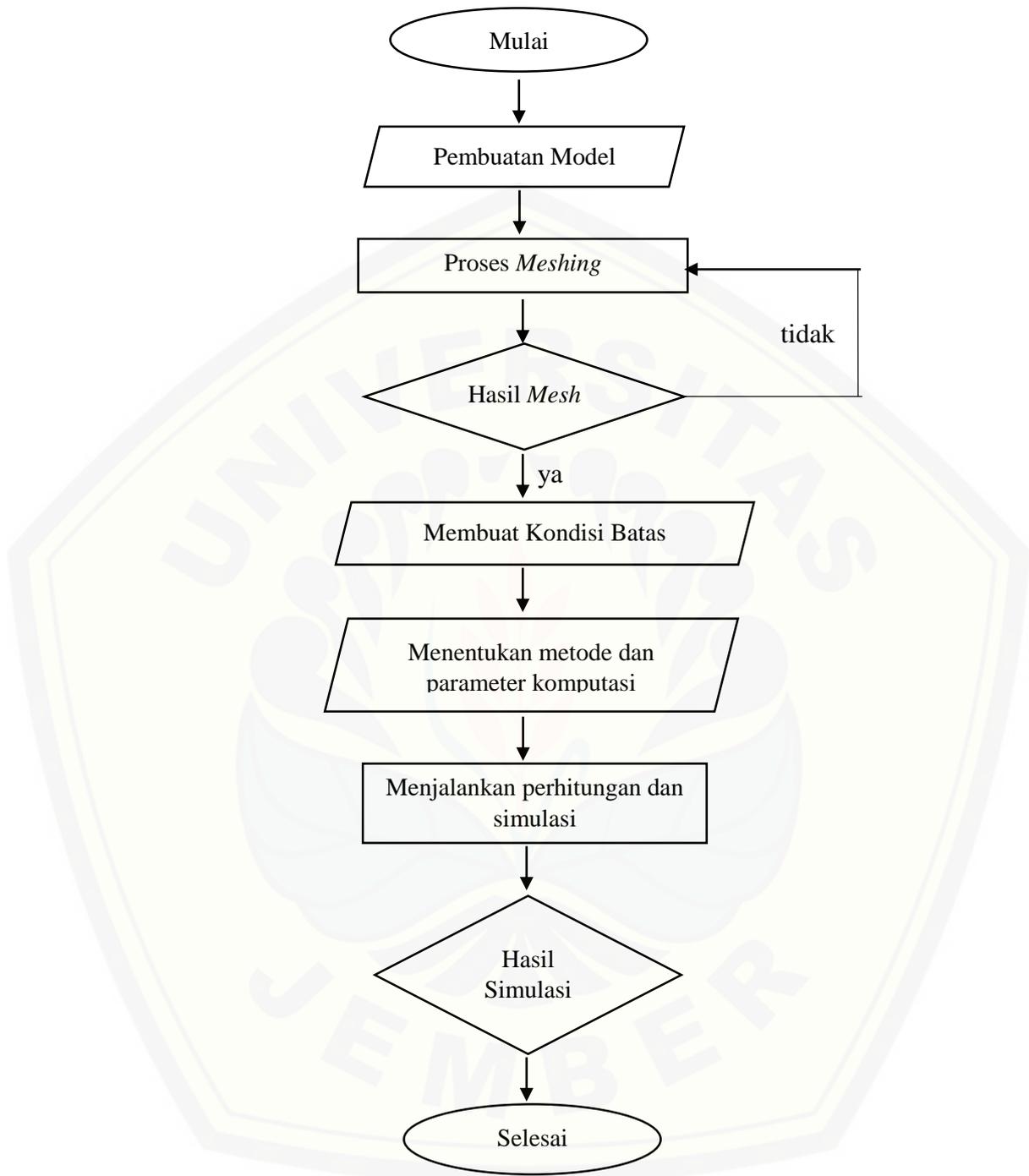
Jenis data yang terdapat pada penelitian ini adalah data kuantitatif. Data kuantitatif diperoleh dari hasil *running* simulasi. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder dan primer. Data sekunder yang digunakan berupa data fisik cerobong dan gas CO yang sudah tersedia pada *software* yang digunakan. Data primer yang digunakan berupa variasi jarak sebaran polutan. Adapun ide awal dari penelitian ini berasal dari penelitian yang dilakukan oleh Mahan tahun 2009.

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi jarak aliran gas, setelah keluar dari sumber. Variasi jarak sebaran polutan adalah 10 m sampai 70 m. Variasi ukuran tersebut dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh sebaran polutan dari cerobong ketika daerah diperbesar atau diperkecil. Daerah sebaran digambarkan dengan bentuk kotak. Variabel terikat yang terdapat dalam penelitian ini adalah kecepatan (v) dan tekanan (P) dari aliran. Variabel kontrol didefinisikan sebagai variabel yang dibuat sama selama proses simulasi. Variabel kontrol yang terdapat pada penelitian ini adalah kadar gas CO (karbon monoksida) dan debit. Nilai gas CO yang digunakan dalam penelitian ini sudah tersedia pada *software* yang digunakan. Simulasi dilakukan dengan waktu yang seragam dalam setiap variasi ukuran yaitu 200 s. Penentuan waktu simulasi ini dilakukan untuk menghindari proses *running* yang sangat lama, karena semakin lama waktu *running* yang digunakan maka proses simulasi pun akan semakin lama.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Tahapan pemecahan masalah dalam penelitian yang akan dilakukan, secara skematis digambarkan dalam diagram alir penelitian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* berlisensi *public* yaitu SimFlow versi 3.1 yang dapat dijalankan pada sistem operasi Windows. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode elemen hingga (*finite*

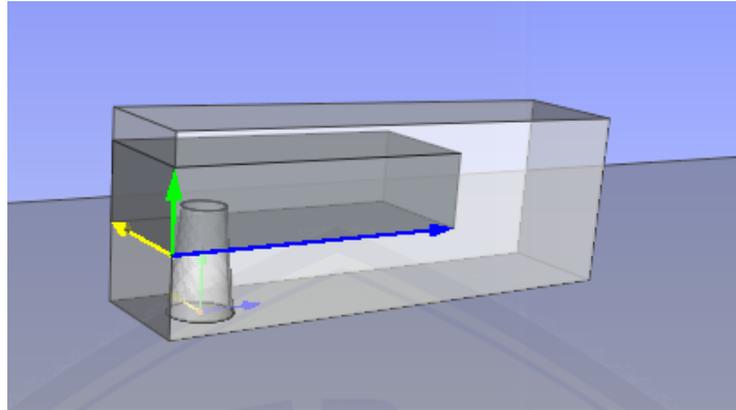
element method). Metode elemen hingga memiliki konsep dasar yaitu menyelesaikan permasalahan dengan membagi objek analisa menjadi bagian kecil yang terhingga. Penggunaan elemen hingga ini dapat menyelesaikan masalah aliran fluida dari sebuah sistem dengan mengkonversikan menjadi sistem diskrit sehingga memungkinkan diselesaikan secara numerik. Proses simulasi ini pada dasarnya dibagi menjadi dua tahapan, yaitu *Pre-Processing* dan *Processing*. Tahap *Pre-Processing* meliputi pembuatan model geometri dan *meshing*, pengidentifikasian batas pada *mesh* dan pengecekan mesh. *Processing* meliputi penentuan kondisi batas, penentuan metode dan parameter komputasi, serta menjalankan simulasi. Tahap kegiatan simulasi yang dilakukan untuk penelitian ini adalah:

a. *Pre-Processing*

Langkah awal yang dilakukan dalam simulasi ini adalah menginputkan geometri ruang berupa cerobong dengan format file.STEP ke perangkat lunak simFlow. Selanjutnya membuat pemodelan geometri daerah sebaran untuk menyempurnakan proses *mesh*. Daerah sebaran tersebut berbentuk balok berdimensi (x, y, z) dengan jarak sebaran 10 m sampai 70 m pada sumbu x. nilai y dan z dibuat sama pada berbagai variasi jarak yaitu 16 m dan 24 m. Balok berdimensi x, y dan z mendefinisikan panjang, lebar dan tinggi dari sebuah balok. Pada Gambar 3.2 panjang didefinisikan dengan warna biru, lebar didefinisikan dengan warna kuning dan tinggi didefinisikan dengan warna hijau. Dalam kotak penyempitan ada sebuah cerobong yang berbentuk silinder.

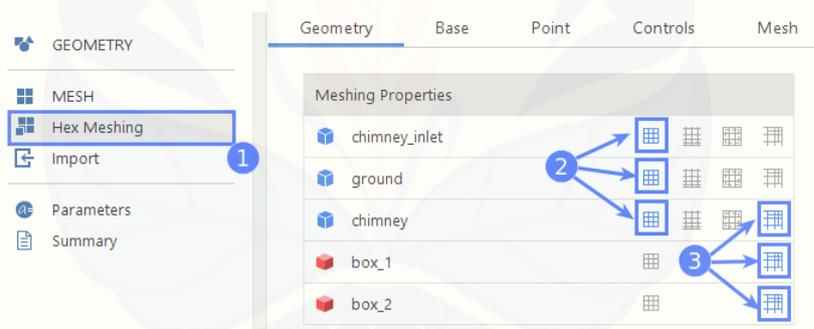
Tabel 3. 1 Parameter input

No.	parameter	Satuan	kuantitas
1.	Jarak x	M	(10 - 70)
2.	Jarak y	M	16
3.	Jarak z	M	24
4.	Gas CO	m ² s ⁻¹	1,42 x 10 ⁻⁵



Gambar 3.2 Desain daerah sebaran polutan

Sebelum dilakukan *mesh* desain geometri harus didefinisikan terlebih dahulu yang digunakan sebagai pemotong dan penyempitan pada *hex meshing*. Proses *hex meshing* ini dilakukan pada kotak sebaran dan desain cerobong yang akan di *mesh*. Pengaturan *hex meshing* dilakukan pada panel *meshing properties* (Gambar 3.3).

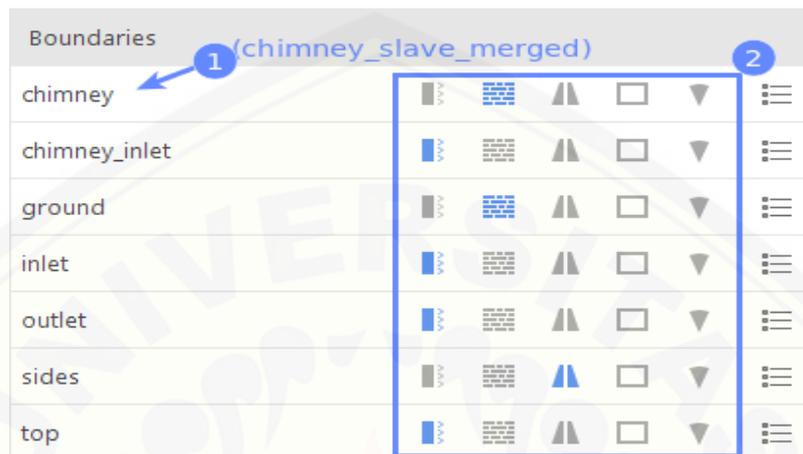


Gambar 3.3 Proses hex meshing

Setelah penentuan geometri dilanjutkan dengan penentuan nilai arah x,y,dan z sebagai ukuran pada *mesh* awal. Sebelum melakukan proses *mesh* nilai minimal dan maksimal dari geometri dasar ditentukan, yaitu nilai minimal (-20m x -20m x -1m) dan nilai maksimalnya (75m x 20m x 30m). Setelah geometri dasar ditentukan proses *mesh* dapat dijalankan. Apabila terjadi kesalahan dalam proses *mesh* akan dikembalikan dalam posisi awal yaitu pembuatan model. Hal tersebut dapat terjadi karena kesalahan pembuatan ukuran geometri ataupun geometri tidak sesuai dengan yang diinginkan.

b. Processing

Pada tahap ini dilakukan penentuan kondisi batas, penyelesaian (*solving*) dan menjalankan simulasi. Penentuan kondisi batas ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Penentuan kondisi batas

Setelah kondisi batas geometri ditentukan, proses berikutnya adalah penyelesaian menggunakan *solver tool*. *Solver* yang digunakan adalah *pimple foam* dengan aliran kompresibel dan dengan tipe waktu transien.

Solver Selection

Time : *transient*
Flow : *incompressible*
Available solver : *pimple foam*

Sebelum proses diskritisasi terlebih dahulu menentukan *transport propertion* yang akan digunakan. Rincian penentuan model dan persamaan dasar *transport propertion* pada simflow adalah sebagai berikut :

1. Persamaan Transpor spesies

Model : *newtonian*
Viskositas : $1,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
Material database : *carbon monoxide (CO)*

2. Persamaan momentum

Time : *convection*

U (kecepatan) : *linier upwind*

Persamaan tambahan : *passive scalars*

Skalar pasif merupakan persamaan tambahan untuk mendapatkan distribusi variabel di daerah asal. Variabel skalar pasif ini tidak berpengaruh pada bidang aliran. Langkah selanjutnya yaitu menentukan *boundary condition* atau kondisi batas untuk menentukan karakter dari kondisi tiap batas. Kondisi batas *Chimney_inlet* diatur menjadi *mass flow inlet* (aliran massa inlet) dengan debit konstan sebesar $10 \text{ m}^3/\text{s}$ dan tekanan gradien nol. Kondisi batas yang kedua yaitu tipe skalar pada *Chimney_inlet* diubah nilai *inlet_valuenya* menjadi 1. Hal ini berarti dapat beroperasi dalam kisaran 0-1. Nilai 1 menunjukkan bahwa variabel dapat beroperasi 100%. *Mass flow inlet* adalah daerah dimana tempat keluarnya emisi CO (daerah muka cerobong bagian atas). Pada kondisi batas ini akan dimasukkan nilai sesuai sebagai berikut :

a. Flow

P : tipe *zero gradient*

U (kecepatan)

Flow rate inlet velocity : $10 \text{ m}^3/\text{s}$

b. Scalars

Tipe : *inlet-outlet*

Inlet value : 1

Batasan *inlet* diatur kondisi batasnya pada tipe *atmospheric inlet* untuk mendefinisikan arus aliran. Penentuan kondisi *inlet* atmosfer juga sangat mempengaruhi karakteristik dari aliran gas pada cerobong. Kondisi ini menetapkan profil kecepatan *inlet* yang sesuai untuk lapisan batas atmosfer. Profil ini berasal dari kecepatan gesekan, arah aliran dan arah vertikal, dimana arah aliran merupakan arah yang menentukan vektor nilai dari sumbu x sistem koordinat. Adapun arah

vertikal merupakan vektor yang mendefinisikan sumbu vertikal sejajar dengan gaya gravitasi. Nilai-nilai yang akan dimasukkan pada kondisi batas *velocity inlet* adalah :

a. Flow

Kecepatan : *atmospheric inlet*

U_{ref} : 1 ms^{-1}

Z_{ref} : 1 ms^{-1}

b. Scalars

Tipe : *fixed value*

Value : 0

Kondisi batas selanjutnya yaitu mengubah batas top dengan karakter *outflow* (arus keluar). Kondisi batas *outlet* diatur pada tipe *pressure outlet* (tekanan outlet). Langkah selanjutnya adalah pengaturan kondisi awal dengan mengaktifkan *initialize potential flow*. Inisialisasi merupakan dugaan awal pada kondisi batas dimana kita akan memulai perhitungan. Pengaktifan ini dilakukan untuk menghitung kecepatan awal dan tekanan dengan menyelesaikan masalah aliran potensial sebelum simulasi yang sebenarnya. Solusi aliran potensial ini jauh lebih mudah diperoleh dan dapat memberikan nilai awal yang baik dari bidang kecepatan. Sebelum proses simulasi waktu diatur nilai *time step* menjadi 0,001 dengan batas waktu terakhir 200 s. Simulasi ini menggunakan interval waktu 1 dengan memilih tipe *adjustable run time* untuk menghemat data setiap interval dari waktu simulasi.

3.6 Metode Analisis Data

Karakteristik aliran yang dibahas dalam penelitian ini berupa parameter kecepatan dan tekanan. Berdasarkan hasil simulasi dihasilkan beberapa grafik tekanan dan kecepatan. Beberapa grafik tersebut mewakili dari jarak pola sebaran yang telah ditentukan.

Analisis kecepatan aliran terhadap jarak pengamatan dilakukan dengan membandingkan besarnya kecepatan dari beberapa variasi jarak sebaran. Hasil yang diperoleh akan memberikan informasi mengenai karakteristik besarnya kecepatan alir, pada sumbu x,y dan z (U_x, U_y, U_z) sebagai fungsi jarak, selama 200s yang akan diwakilkan pada beberapa waktu pengamatan. Dalam hal ini, U_x adalah kecepatan yang mengalir pada sumbu x, U_y adalah kecepatan yang mengalir pada sumbu y dan U_z adalah kecepatan yang mengalir pada sumbu z. Setelah nilai kecepatan dalam arah x, y, dan z diperoleh dapat ditentukan nilai kecepatan totalnya. Kecepatan total dapat diperoleh dengan mengakar kuadratkan nilai pada arah sumbu x, y, dan z. Secara matematis ditunjukkan pada persamaan 3.1

$$U_r \text{ (kecepatan total)} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (3.1)$$

Hasil perhitungan kecepatan total digunakan untuk membandingkan bagaimana hubungan kecepatan terhadap tekanan.

Analisis tekanan aliran gas terhadap jarak pengamatan diamati berdasarkan grafik tekanan sebagai fungsi jarak yang diperoleh dengan bantuan perangkat lunak *spread sheet*. Informasi yang diperoleh digunakan untuk menunjukkan karakteristik dari tekanan gas di suatu titik/posisi tertentu pada pengamatan selama 200s.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi distribusi aliran gas CO yang dianalisis pada variasi jarak sebaran, dapat disimpulkan bahwa :

1. Laju alir gas CO sebagai fungsi dari jarak sebaran, baik pada arah x, y, maupun z, memiliki pola sebaran yang sama untuk seluruh waktu pengamatan. Kecepatan minimum terjadi pada jarak 20 m, sedangkan kecepatan pada jarak 50 m sampai dengan 70 m relatif konstan.
2. Tekanan minimum gas CO dihasilkan pada jarak 20 m, sedangkan pada jarak 30m hingga 70 m tidak menunjukkan perubahan yang cukup besar. Besarnya tekanan gas CO berbanding lurus dengan besarnya kecepatan gas yang dihasilkan.

5.2 Saran

Saran pada penelitian selanjutnya yaitu perlu dilakukan pengembangan penelitian tentang distribusi aliran gas dari emisi cerobong dengan waktu simulasi yang lebih lama. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui bagaimana aliran gas pada pola penyebaran polutan. Sebaiknya penelitian selanjutnya menggunakan variasi ukuran yang lebih banyak. Hal ini digunakan untuk bahan referensi mengenai karakteristik aliran gas pada cerobong asap serta hasil perbandingan akan semakin baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, I. 2007. Analisa Aliran Fluida Dalam Pipa Spiral pada Vertikal Pitch Dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD). *Skripsi*. Depok : Universitas Gunadarma.
- Akmal. 2009. Dampak Gas CO terhadap Kesehatan. [http://vhatal\(Akmal\):dampakgas CO terhadap kesehatan.htm](http://vhatal(Akmal):dampakgasCOterhadapkesehatan.htm) [25 Januari 2019].
- Badan Pusat Statistik. 2018. *Perkembangan Perekonomian Indonesia*. Jakarta: BPS.
- Cooper, C. D and Alley, F. G. 1994. *Air Pollution Control A Design Approach*. Ed Ke-2. Illinois: Waveland Press, Inc.
- Cutler, J Cleveland, Kaufman, Robert K. 2008. *Environmental Science*. New York: Mcgraw-Hill.
- Fadhili F. 2016. Studi Numerik Sudden Expansion Meso Combustor Pada Micro Power Generator. *Skripsi*. Jember: Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Fathoni, W. 2018. Analisa Aliran Fluida (Fully Developed Flow) Pada Pipa Circular Dengan Menggunakan CFD Fluent. *Jurnal Teknik Mesin Untirta*. (IV No.2 Hal 43-49).
- Fletcher, C.A.J. 2006. *Computational Techniques for Fluid Dynamics 2-Spesific Techniques for Different Flow Categories*. Berlin : Springer-Verlag.
- Fredsoe, J and Sumer, B. 2006. *Hydrodynamics Round Cylindrical Structure*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Frisch, U. 1995. *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*. Uk: Cambridge University Press.

- Galdi, G. P. 2011. *An Introduction To The Mathematical Theory Of The Navier-Stokes Equations (Steady-State Problems) Second Edition*. New York: Springer.
- Gazali, A. A. 2018. Analisa Aliran Fluida Menggunakan CFD Dengan Variabel Viscosity Pada Preproses Injeksi Molding. *Skripsi*. Jember: Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Hadihardaja, J. 1997. *Rekayasa Lingkungan*. Depok: Universitas Gunadarma.
- Mahan, Victor. 2009. Simulasi Penyebaran Gas SO₂ Dari Emisi Cerobong Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD). *Skripsi*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Never, N. 2000. *Air Pollution Control Engineering*. Ed Ke-2. Michigan: Mcgraw-Hill.
- Oke, T. R. 1978. *Boundary Layer Climates*. London: Metheun & Co Ltd.
- Pane, E. A. 2014. Pengembangan Tungku Gasifikasi Arang Biomassa Tipe Natural Draft Gasification Berdasarkan Analisis Computational Fluid Dynamics (CFD). *Jurnal Keteknikan Pertanian*. Bogor: Teknik Mesin Dan Biosistem Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor.
- Pemerintah Daerah DKI Jakarta. 1999. PP 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.
- Prawiro, R. H. 1983. *Ekologi Lingkungan Pencemaran*. Semarang: Satya Wacana.
- Riyadi, S. 1982. *Pencemaran Udara*. Surabaya: Usaha Nasional.
- Rott, N. 1990. Note on the history of the Reynolds number. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 22:1-11.

Saperaud. 2005. Air pollution. [terhubung berkala].
http://commons.wikimedia.org/wiki/Air_pollution [22 Desember 2018].

Seinfeld, J. H. 1986. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Amerika Serikat: John Wiley & Sons, Inc.

Simflow. 2013. *Simflow 3.1 User's Guide*. Poland: SIMFLOW Technologies.

Soedomo, M. 2001. *Pencemaran Udara*. Bandung: ITB.

Soenarmo, S. H. 1999. *Diktat Kuliah Meteorologi Pencemaran Udara*. Bandung: ITB.

Streeter, Victor L. Wylie, E. Benjamin. 1998. *Mekanika Fluida Edisi Delapan Jilid 1*. Jakarta : Erlangga.

Syahputra, Benny. 2005. Telaah Studi AMDAL Pada Tahap Operasional Pabrik Peleburan Timah (Smelter) PT. Laba-Laba Multindo Pangkal Pinang-Bangka Belitung. *Skripsi*. Semarang : Fakultas Teknik UNISSULA.

Tang, W. Huber, A. Bell, B. Schwarz, W. 2006. Application Of CFD Simulations for Short-Range Atmospheric Dispersion Over Open Fields And Within Arrays of Buildings. *Proceeding of the symposium at the 14th on the applications of air pollution meteorology*. Atlanta. 30 Januari – 2 Februari.

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

Versteeg, H.K. Malalasekera, W. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*. New York: John Wiley & Sons.

Weaver, M. D. Lindell, K. 2009. Carbon Monoxide Poisoning. *The New England Journal of Medicine*. 360: 1217-25.

LAMPIRAN

Lampiran A. Profil kecepatan jarak 10m sampai dengan 70m pada sumbu x

A.1. Tabel data kecepatan pada sumbu x

T (s)	Data kecepatan x (10^{-3})						
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m
0,39	3,45	0,67	3,60	0,36	0,83	3,60	3,60
10	0,83	0,55	0,82	0,83	3,60	0,83	0,83
20	0,67	0,56	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
30	0,78	0,50	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
40	0,70	0,43	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
50	0,58	0,27	0,58	0,57	0,58	0,57	0,58
60	0,63	0,29	0,61	0,64	0,64	0,64	0,64
70	0,79	0,44	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
80	0,89	0,55	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
90	0,98	0,58	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
100	0,98	0,54	0,98	0,98	0,98	0,99	0,97
110	1,01	0,51	1,01	1,01	14,3	1,01	1,01
120	1,03	0,49	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
130	1,03	0,491	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
140	0,92	0,52	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91
150	0,82	0,51	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
160	0,95	0,50	0,95	0,94	0,95	1,08	0,95
170	1,11	0,37	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
180	1,25	0,38	1,25	1,24	1,23	1,24	1,23
190	1,24	0,49	1,24	1,24	1,24	1,24	1,23
200	1,13	0,56	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13