

# Simulasi Dispersi Gas Polutan dari Cerobong ke Lingkungan dengan Pendekatan *Computational Fluid Dynamics* ( CFD )

Agus Ghautsun Niam<sup>a)</sup>, Kudang Boro Seminar<sup>b)</sup>, Arief Sabdo Yuwono<sup>c)</sup>

<sup>a)</sup>Alumni Departemen Teknik Pertanian Fateta IPB  
[niam@ipb.ac.id](mailto:niam@ipb.ac.id)

<sup>b)</sup>Departemen Teknik Pertanian Fateta IPB  
[kseminar@ipb.ac.id](mailto:kseminar@ipb.ac.id)

<sup>c)</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fateta IPB  
[arief\\_sabdo\\_yuwono@yahoo.co.id](mailto:arief_sabdo_yuwono@yahoo.co.id)

## Abstrak

Studi simulasi dispersi gas polutan dari sebuah cerobong merupakan upaya pengembangan sektor industri yang ramah lingkungan. Prediksi sebaran emisi gas polutan terhadap udara ambien dilakukan untuk mengantisipasi dampak negatif yang ditimbulkan dari suatu kegiatan industri. Simulasi dispersi gas polutan dilakukan dengan menggunakan program *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang berbasis metode finite volume. Proses komputasi dengan metode finite volume dipresentasikan dengan software *Engineering Fluid Dynamics* (EFD), dimana hasil proses komputasi fluida dinamik yang terjadi diharapkan dapat menjadi sarana untuk melihat aliran dispersi konsentrasi gas polutan ( $SO_2$ ,  $H_2S$ , dan  $CO$ ) dari cerobong ke lingkungan.

Software EFD digunakan sebagai support simulator atau tools yang memiliki kemampuan untuk membuat model geometri, batasan lingkungan simulasi atau domain, meshing model geometri yang akan disimulasikan, solver atau pencarian solusi dengan menyediakan fleksibilitas mesh otomatis berbentuk tetrahedral yang dapat diatur mudah kerapatan meshnya. Software ini mampu menghitung persamaan fluida dinamik dengan menggunakan metode finite volume, sehingga dapat mempresentasikan data dan memvisualisasikan berbagai kasus aplikasi dinamika fluida secara detail.

Parameter input dalam simulasi yaitu laju emisi gas polutan yang diemisikan dari cerobong, kecepatan udara di sekitar sumber emisi, faktor stabilitas atmosfer hingga titik acuan, dan sifat karakteristik kimia gas polutan. Sedangkan parameter output yang diharapkan adalah visualisasi sebaran konsentrasi gas polutan berupa bidang 2 dimensi berbentuk kontur yang dilengkapi dengan nilai konsentrasinya terhadap jarak dari sumber emisi. Representasi hasil visualisasi simulasi dengan program CFD memberikan gambaran bahwa gas polutan yang paling besar memberikan dampak pencemaran terhadap permukaan tanah di lingkungan sekitar cerobong adalah gas  $SO_2$ , dimana nilai konsentrasi yang paling tinggi terdapat pada jarak 60 m dari cerobong, yaitu sebesar 10721,6 ppm. Sedangkan gas  $CO$  mencemari permukaan tanah pada jarak di atas 300 m dari cerobong dan gas  $H_2S$  dari hasil simulasi tidak mencemari permukaan tanah karena bergerak ke atmosfer.

**Kata kunci** : Dispersi, CFD, metode finite volume, meshing

## 1. PENDAHULUAN

Industri merupakan salah satu sektor yang dominan mempengaruhi stabilitas perekonomian suatu negara. Perkembangan di sektor industri, telah mengakibatkan regulasi pemerintah dalam hal pemberdayaan sumber daya alam (SDA) dan lingkungan semakin ketat. Hal ini dilakukan untuk mengarahkan para pelaku industri agar berorientasi pada industri yang berteknologi ramah lingkungan dan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan SDA yang dikelolanya. Sehingga pemberdayaan SDA dapat dioptimalkan secara berkelanjutan.

Salah satu masalah yang terjadi di lingkungan industri adalah penurunan kualitas udara ambien yang

diakibatkan oleh emisi gas polutan dari cerobong (*stack*). Tingginya konsentrasi polutan di udara ambien akan berdampak terhadap penerima khususnya manusia, hewan, tumbuhan dan material atau benda yang ada di lingkungan sumber pencemar. Data World Resource Institute (2006) menyebutkan bahwa kondisi atmosfer Indonesia berada pada peringkat ke-14 di dunia berdasarkan nilai *absolute emissions*, setelah Meksiko. Hal ini menunjukkan emisi polutan yang terjadi di Indonesia cukup tinggi dan mempengaruhi dampak terhadap perubahan iklim global di atmosfer.

Salah satu upaya dalam menyikapi perubahan iklim global yang terjadi agar sejalan dengan pengembangan industri adalah dengan studi simulasi dispersi gas polutan dari sebuah cerobong ke lingkungan. Studi simulasi tersebut dapat memprediksi sebaran emisi

gas polutan di udara ambien. Prediksi sebaran emisi gas polutan perlu dipelajari dalam upaya pengelolaan lingkungan hidup untuk mengantisipasi dampak negatif yang ditimbulkan dari suatu kegiatan industri. Analisis studi simulasi dispersi gas polutan dapat dilakukan dengan pendekatan program *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

### 1.1 Tujuan Penelitian

Beberapa tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan simulasi dispersi gas polutan (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S dan CO) dari cerobong ke lingkungan dengan menggunakan program CFD.
2. Menghitung konsentrasi gas polutan (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S dan CO) di permukaan tanah berdasarkan simulasi CFD.

### 1.2 Ruang Lingkup Penelitian

1. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder dan data fiktif sesuai dengan skenario rancangan penulis. Penentuan data fiktif dilakukan dengan perkiraan terhadap keadaan di beberapa industri.
2. Lingkungan wilayah yang disimulasikan merupakan wilayah disekitar cerobong dengan luasan volume disesuaikan dengan kemampuan kapasitas memori alat komputer yang digunakan.
3. Gas polutan yang disimulasikan terdiri dari tiga jenis yaitu *sulfur dioxide* (SO<sub>2</sub>), *hydrogen sulfide* (H<sub>2</sub>S), dan *carbon monoxide* (CO).

### 1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu mensimulasikan aliran konsentrasi gas polutan dari cerobong sebagai akibat dari aktivitas industri, sehingga dapat memprediksi dampak lingkungan yang ditimbulkan sekaligus menjadi pertimbangan atau data penunjang dalam penentuan kebijakan pengembangan suatu wilayah industri.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Pendekatan Permasalahan

Dalam melakukan simulasi, model yang dikembangkan idealnya harus dapat memberikan tanggap dinamik sesuai dengan yang sebenarnya. Maka dari itu, dibutuhkan pemodelan matematis yang tepat dan intuisi serta pertimbangan-pertimbangan yang matang dalam melakukan simulasi. Intuisi yang baik dibutuhkan untuk menentukan asumsi dasar, korelasi antara variabel-variabel kunci serta pendekatan awal sebuah model simulasi. Sedangkan pertimbangan dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan antara tingkat ketelitian dan kelengkapan terhadap batasan yang tersedia, baik dari segi biaya maupun kompleksitasnya.

Konsep simulasi yang dibangun dipengaruhi oleh parameter laju emisi gas polutan dari cerobong, kecepatan

udara di sekitar sumber emisi, sifat karakteristik kimia dari gas polutan, dan menentukan batasan kondisi yang didefinisikan ke dalam *software* EFD. Oleh karena itu, parameter tersebut dijadikan sebagai parameter input dalam simulasi ini. Sedangkan output yang diharapkan adalah visualisasi sebaran konsentrasi gas polutan berupa bidang 2 dimensi. Visualisasi ini dapat digunakan untuk menganalisa karakteristik aliran sebaran konsentrasi gas polutan yang terdispersi.

### 2.2 Pendekatan Numerik

Dalam proses numerik baik meshing maupun iterasi, persamaan-persamaan yang digunakan adalah persamaan atur fluida, dimana berawal dari hukum kekekalan fisika seperti konservasi massa, momentum dan energi. Persamaan-persamaan tersebut antara lain :

#### 1. Persamaan Kontinuitas 3 Dimensi

Dalam metode *finite control volume*, perubahan spesies massa pada fenomena aliran fluida terjadi sejalan dengan adanya pergerakan elemen massa fluida sebagai fungsi waktu ke dalam suatu volume terbatas [1], sehingga persamaan tersebut dapat dituliskan :

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (1)$$

#### 2. Persamaan Momentum 3 Dimensi

Persamaan momentum yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes yang dikembangkan dalam bentuk metode *finite volume* [2] :

Arah sumbu x

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

Arah sumbu y

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

Arah sumbu z

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.c)$$

### 3. Persamaan Energi 3 Dimensi

Persamaan energi diturunkan dari hukum pertama termodinamika yang menyatakan bahwa laju perubahan energi partikel fluida = laju penambahan panas ke dalam partikel fluida ditambahkan dengan laju kerja yang diberikan pada partikel [1].

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] + u \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] + v \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + w \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] + \rho f \cdot V \quad (3)$$

### 4. Persamaan Spesies Transport Material Fluida

Persamaan spesies transport dapat digunakan untuk memprediksi fraksi massa masing-masing spesies material yang memiliki karakteristik kimiawi berbeda dengan pendekatan prinsip difusi-konveksi masing-masing material [3].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

dimana,  $Y_i$  merupakan fraksi massa masing-masing spesies  $i$ ,  $R_i$  adalah nilai net spesies hasil reaksi kimia dan  $S_i$  adalah nilai net spesies yang disebarkan ke dalam sistem simulasi yang didefinisikan oleh user. Selain itu, nilai fluks difusi massa dari masing-masing spesies material dipengaruhi oleh tipe aliran yang terjadi dalam sistem, yaitu laminar atau turbulen, dimana secara berturut-turut dituliskan:

$$\bar{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (5)$$

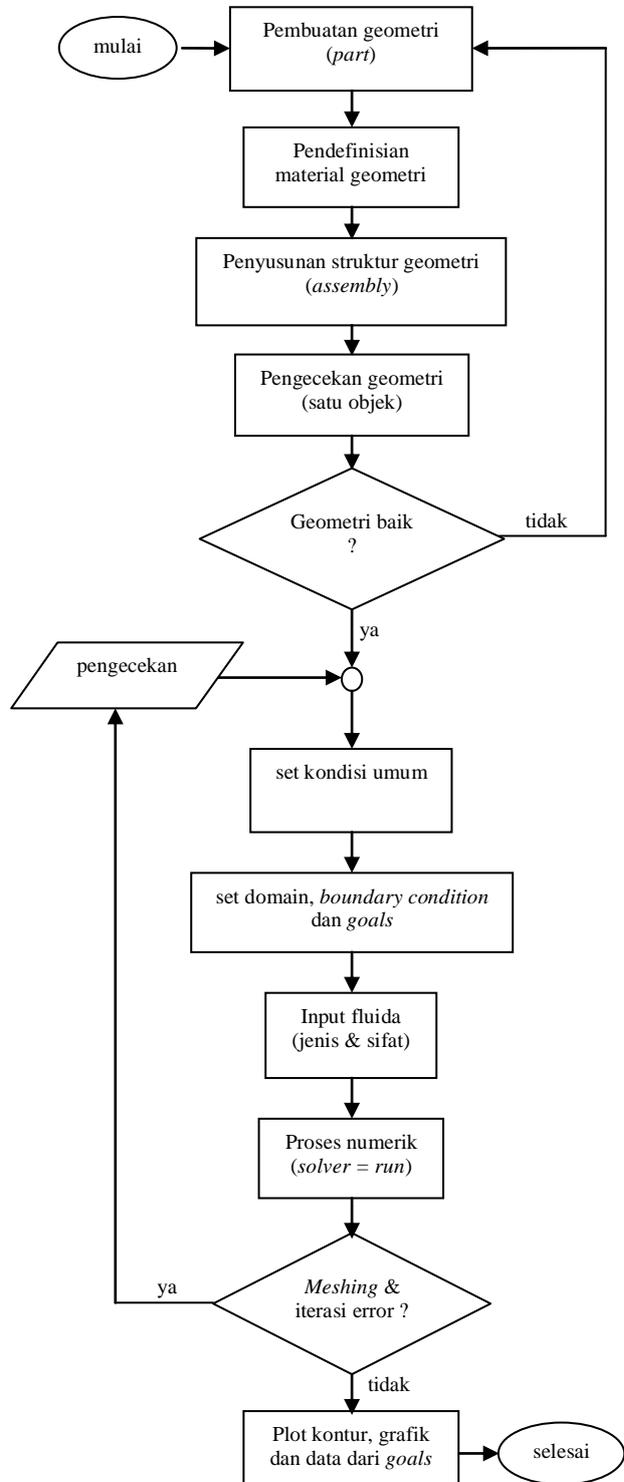
$$\bar{J}_i = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (6)$$

dimana,  $D_{i,m}$  adalah difusivitas massa masing-masing spesies material dan  $Sc_t$  merupakan nilai angka Schmidt.

### 2.3 Alat Bantu Penelitian

Simulasi yang akan dibangun menggunakan alat bantu berupa perangkat lunak *software Engineering Fluid Dynamics (EFD)*, yaitu *software engineering* yang mampu mensimulasikan dan menganalisis berbagai kasus

aliran fluida beserta sifat-sifat fisik dan sifat material fluida yang disimulasikan, juga dapat membangun geometri atau desain teknik struktur dari kasus yang akan disimulasikan, sehingga *software* ini mempermudah pengguna (*user*) dalam memecahkan masalah yang akan dikaji. Karena dalam *software* ini sudah terintegrasi



Gambar 1. Diagram alir tahapan dalam penggunaan CFD.

menjadi satu paket antara perangkat untuk membangun penggambaran geometri dan perangkat untuk menganalisa kasus aliran fluida tersebut, sehingga dapat memvisualisasikan distribusi fluida secara numerik.

#### 2.4 Tahapan Penelitian

Tahap ini merupakan tahap mendefinisikan kasus dinamika fluida ke dalam komputerisasi sehingga aliran fluida berikut sifat-sifat fisik serta bahan materialnya dapat dipresentasikan secara visual, baik animasi, grafik kontur maupun data. Persamaan-persamaan yang dibangun dalam CFD diselesaikan secara iteratif. Diagram alir tahapan dalam penggunaan CFD diilustrasikan pada Gambar 1.

#### 2.5 Desain Model Sistem

##### 1. Model Geometri

Pembuatan geometri dilakukan pada tahap awal dengan pola 3 dimensi (3D) yaitu dalam bentuk sebuah cerobong yang memiliki dimensi diameter luar cerobong di titik permukaan tanah sebesar 4 m, sedangkan ketebalan dinding cerobong sebesar 10 cm. Sudut kemiringan dinding cerobong terhadap titik pusat silinder (mengerucut) sebesar 1 derajat dan tinggi cerobong adalah 20 m. Cerobong tersebut dibuat tertancap pada suatu area permukaan tanah dengan ukuran luas area sebesar 100 x 320 m. Luas area tersebut ditentukan berdasarkan pertimbangan kapasitas memori dan efisiensi kinerja *software* yang digunakan, dimana luasan area yang dibentuk mempengaruhi luasan domain yang akan dianalisis aliran fluidanya serta kondisi kandungan fluida di dalam domain tersebut sehingga kecepatan kerja *software* dalam melakukan proses *meshing* domain dan proses iterasi (penghitungan) akan semakin berat. Selain itu, kerumitan dari geometri yang dibangun juga dapat mempengaruhi kecepatan kinerja *software*.

Geometri untuk permukaan tanah dibuat setebal 10 cm. Hal ini diperlukan agar batas permukaan tanah terhadap atmosfer dapat didefinisikan sebagai material padat, sehingga fluida yang dialirkan di atas permukaan tersebut dapat dikatakan bahwa fluida tersebut mengalir di atas permukaan (*surface*) tanah atau lantai yang padat.

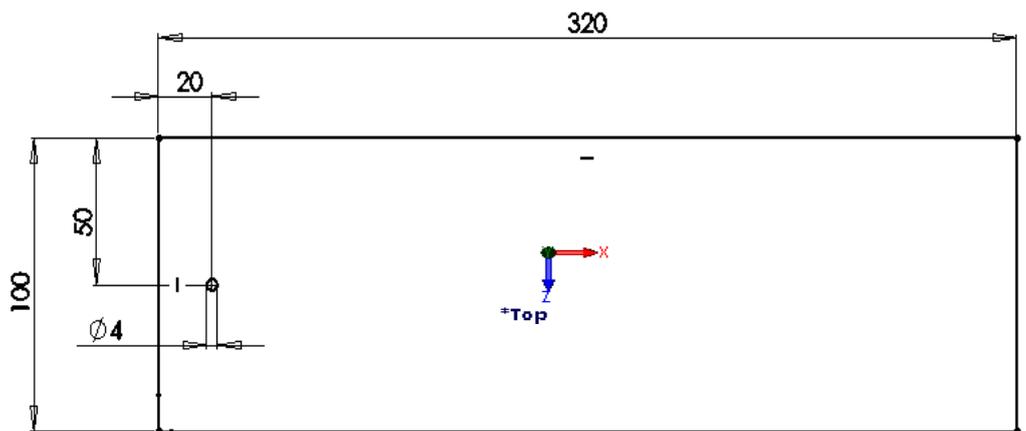
Material padatan yang digambar dalam geometri tidak didefinisikan secara spesifik mengenai jenis bahan struktur benda tersebut, karena pengaruh dari perbedaan jenis bahan serta karakteristik bahan tersebut terhadap aliran fluida disekitarnya dianggap tidak begitu nyata atau diabaikan. Bentuk dimensi geometri secara jelas dapat dilihat pada Gambar 2.

##### 2. Data Input

Data input dalam simulasi ini menggunakan data fiktif sesuai dengan skenario rancangan penulis, namun untuk data emisi gas polutan yang diinput diambil dari hasil perhitungan kasus di beberapa industri yang berbeda. Penentuan data fiktif dilakukan dengan perkiraan terhadap keadaan di beberapa industri. Beberapa data input yang akan disimulasikan terdapat pada Tabel sebagai berikut :

Tabel 1. Data input fiktif.

No.	Parameter	Satuan	Kuantitas
1	Kecepatan angin	<i>m/s</i>	2
2	Temperatur lingkungan	$^{\circ}C$	27
3	Temperatur emisi di cerobong	$^{\circ}C$	200
4	Tekanan udara	<i>Pa</i>	101325
5	Jarak-x	<i>m</i>	-20 s.d. 300
6	Jarak-y	<i>m</i>	0 s.d. 100
7	Jarak-z	<i>m</i>	-50 s.d. 50
8	Dimensi cerobong		
	tinggi	<i>m</i>	20
	diameter luar	<i>m</i>	4
	diameter dalam	<i>m</i>	3,8
	kemiringan permukaan dinding	<i>deg</i>	1



Gambar 2. Dimensi geometri batasan wilayah simulasi.

Tabel 2. Input aliran gas polutan (*mass flow rate*) dari cerobong

No	Parameter	Satuan	Kuantitas
1	Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	kg SO <sub>2</sub> /s	25,236
2	Hydrogen Sulfide (H <sub>2</sub> S)	kg H <sub>2</sub> S/s	0,2240
3	Carbon Monoxide (CO)	g CO/s	0,6048

Sumber : <sup>1</sup> US-EPA Standard AP-42 Chapter 5, Petroleum Refineries, Emission Faktor for Flaring.  
<sup>2</sup> Ref. Madura BD Amended Plan Development  
<sup>3</sup> Data konsumsi bahan bakar PLTU Cilacap 2007. EPA, US., 2006. Source: <http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42.htm>

Tabel 3. Nilai spesifik sifat kimia masing-masing senyawa fluida

No	Parameter	MW (g/mol)	Dynamic viscosity $\mu$ (kg/m.s)	Thermal Conductivity (W/m.K)*
1	Udara	28,97	0,00001789	0,02394
2	Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	64,06	0,00001158	0,00858
3	Carbon Monoxide (CO)	28,01	0,00001695	0,023027
4	Hydrogen Sulfide (H <sub>2</sub> S)	34,08	0,00001179	0,01298

Sumber : The National Institute of Standards and Technology (NIST) USA. 2008  
 \*) <http://encyclopedia.airliquide.com>

Tabel 4. Nilai densitas dan koefisien difusivitas massa masing-masing spesies.

No	Parameter	Angka Schmidt $S_c$ *	Koefisien difusivitas massa $D_i$ (m <sup>2</sup> /s)	Density pada titik didih (kg/m <sup>3</sup> )**
1	Udara (air)	0,7	7.99E-01	3.2
2	Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	1,24	3.06E-01	3.049
3	Carbon Monoxide (CO)	0,77	5.05E-01	4.355
4	Hydrogen Sulfide (H <sub>2</sub> S)	0,94	6.50E-01	1.93

Sumber : <sup>\*)</sup> The CRC Handbook of Mechanical Engineering by Frank Kreith, 1998.  
<sup>\*\*)</sup> The National Institute of Standards and Technology (NIST) USA., 2008.

## 2.6 Asumsi dalam Simulasi CFD

Asumsi yang digunakan dalam simulasi temperatur, kelembaban dan aliran udara yaitu sebagai berikut:

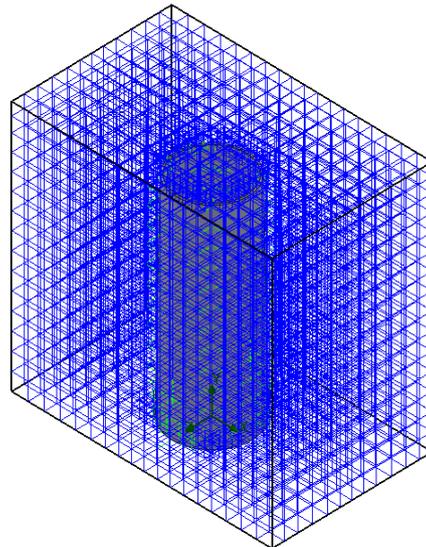
- Udara bergerak dalam kondisi *steady*
- Aliran udara dianggap seragam (*uniform*)

- Udara tidak tertekan (*incompressible*),  $p$  konstan
- Arah angin dalam lingkungan dianggap searah (*unidirectional*) selama simulasi berlangsung.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Pendefinisian Domain

Domain dapat didefinisikan sebagai batasan ruang gerak fluida dan dihitung dalam simulasi sehingga dapat dianalisa berbagai sifat fisik dan material dari fluida yang disimulasikan. Ukuran domain yang dibuat sebesar 320 m x 100 m x 100 m, dimana titik acuan dari dimensi domain tersebut adalah titik nol pada koordinat (x, y, z). Titik koordinat (0, 0, 0) terdapat pada titik pusat lingkaran silinder di permukaan tanah. Bangunan solid geometri juga berada dalam kolom domain. Hal ini dilakukan agar simulasi pergerakan fluida yang akan direpresentasikan dapat didefinisikan sebagai fluida yang mengalir di atas permukaan solid. Bentuk grid pada domain dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi grid hasil *meshing* domain dari geometri cerobong.

Secara prinsip, pada wilayah yang dekat dengan dinding solid fluida yang mengalir akan membentuk suatu lapisan yang disebut *boundary layer* akibat dari adanya tumbukan dan tegangan geser pada dinding. Perubahan parameter fisik fluida pada wilayah *boundary layer* terjadi secara fluktuatif. Oleh karena itu dibutuhkan media untuk menangkap peristiwa perubahan yang terjadi pada setiap parsel fluida yang bergerak agar dapat

dianalisa. Semakin halus grid yang terbentuk maka kualitasnya akan semakin bagus.

### 3.2 Kondisi Awal Udara Ambien

Kondisi awal udara ambien dalam simulasi diasumsikan tidak terdapat kontaminan. Jadi, jika fluida yang terdapat dalam udara ambien dianggap udara bersih dan murni, maka menurut NIST (*National Institute of Standards and Technology*) United State, memiliki nilai densitas sebesar  $3,2 \text{ kg/m}^3$  pada tekanan  $101,325 \text{ kPa}$  titik didih. Oleh karena itu, dalam *software* EFD konsentrasi udara murni pada kondisi awal dengan satuan ppm (*part per millions*) dituliskan  $10^6$  ppm dan gas kontaminannya  $0$  ppm. Kondisi udara tersebut bergerak seragam searah sumbu  $x$  dengan kecepatan tetap  $2 \text{ m/s}$ , sedangkan kecepatan pada arah sumbu  $y$  dan sumbu  $z$  dianggap nol. Udara mengalir dalam keadaan seragam di atas permukaan tanah dan membentur cerobong yang memiliki diameter  $4 \text{ m}$  dan tinggi  $20 \text{ m}$ . Hal ini yang mengakibatkan terjadi perubahan pola aliran di dalam sistem simulasi yang dibangun, mulai dari parameter kecepatan udara, tekanan dinamik dan turbulensi.

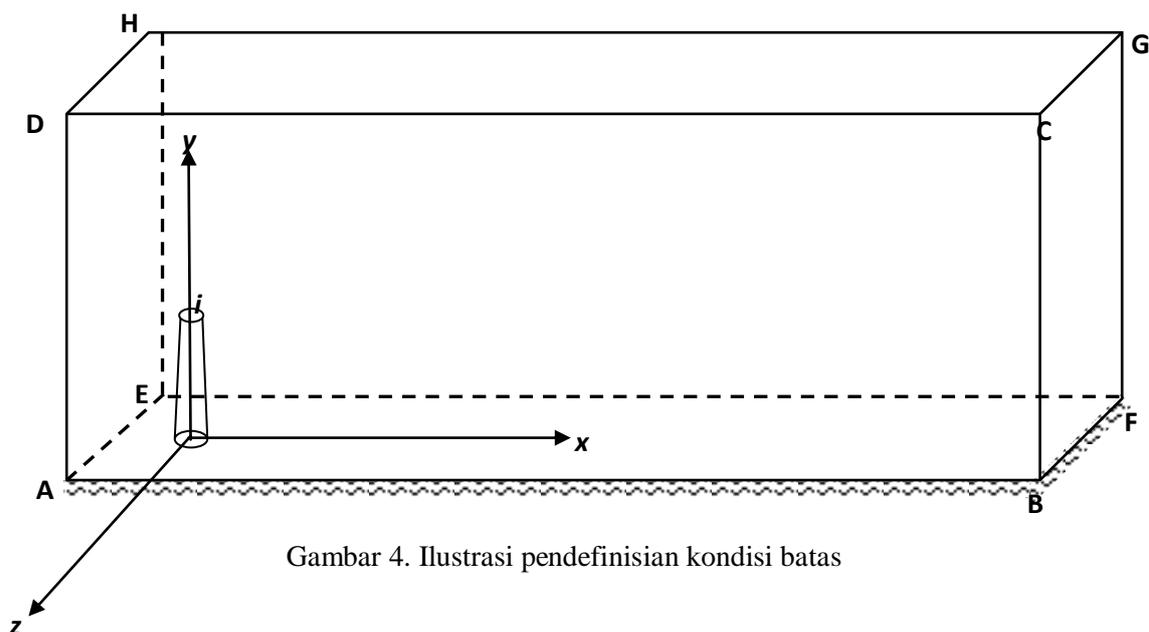
### 3.3 Tahap Penentuan Kondisi Batas

Penentuan kondisi batas (*boundary condition*), dapat diartikan sebagai tahap input skenario aliran fluida gas polutan ke dalam sistem geometri dan domain. Arah aliran, kecepatan aliran, jumlah fluida yang diinput, posisi input, posisi output, temperatur dan tekanan merupakan parameter yang harus didefinisikan secara detail

agar simulator dapat menghitung dengan baik proses dinamika fluida yang terjadi. Secara detail pendefinisian kondisi batas atau dikenal dengan *initial condition* diilustrasikan pada Gambar 4.

Pada Gambar 4, bidang ADEH didefinisikan sebagai input kecepatan udara yang menerpa cerobong secara seragam atau disebut sebagai *velocity inlet*. Arah kecepatan udara secara seragam tersebut searah dengan sumbu  $x$ . Bidang yang didefinisikan sebagai output adalah bidang BCGF, sedangkan bidang ABCD, DCGH, dan EFGH didefinisikan sebagai bidang *simetry* yang berarti bahwa kondisi udara di luar bidang domain dengan kondisi udara di dalam bidang domain dianggap sama. Bidang ABFE sebagai permukaan tanah dan dinding cerobong didefinisikan sebagai dinding padatan (*wall*). Sedangkan permukaan cerobong yang diilustrasikan oleh poin  $i$  merupakan inlet aliran gas polutan ke dalam sistem atau dikenal dengan *mass flow inlet*.

Fluida gas polutan yang diinput dari cerobong hanya satu jenis polutan dengan konsentrasi  $100\%$  atau  $10^6$  ppm. Artinya bahwa polutan yang menjadi bahan kontaminan pada udara ambien hanya satu jenis dan dilakukan satu per satu dari bahan kontaminan yang akan dianalisa. Hal ini dilakukan untuk memudahkan proses pendefinisian dan analisa fluida serta menganggap bahwa gas polutan tidak mengalami reduksi akibat faktor reaksi kimia dengan senyawa lain selama proses simulasi. Temperatur gas yang diemisikan dari cerobong sebesar  $200^\circ\text{C}$  sedangkan debit massa aliran gas



Gambar 4. Ilustrasi pendefinisian kondisi batas

polutan dari cerobong besarnya sesuai dengan Tabel 2.

**Analisis Aliran**

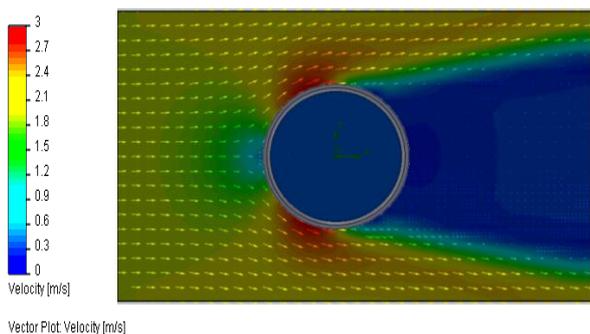
Berdasarkan input kecepatan udara, nilai viskositas dinamik, dan jarak  $x$  yang didefinisikan pada domain, dimana  $L = x$ , dengan nilai standar densitas udara dari NIST U.S adalah sebesar  $3,2 \text{ kg/m}^3$ , dan aliran udara yang mengalir ke dalam sistem simulasi dapat dihitung :

$$\text{Re}_L = 3,2 \times \left( \frac{2 \times 300}{1,789 \times 10^{-5}} \right)$$

$$= 1,07 \times 10^8$$

dengan  $\text{Re} > 5 \times 10^5$ , maka sudah dapat dipastikan bahwa aliran udara yang terjadi adalah aliran turbulen eksternal.

Fenomena turbulensi atau pola aliran pada permukaan dapat terlihat dari vektor kecepatan fluida di wilayah permukaan silinder yang divisualisasikan oleh *software* EFD seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Kontur dan vektor aliran kecepatan udara dengan melewati silinder cerobong tampak atas.

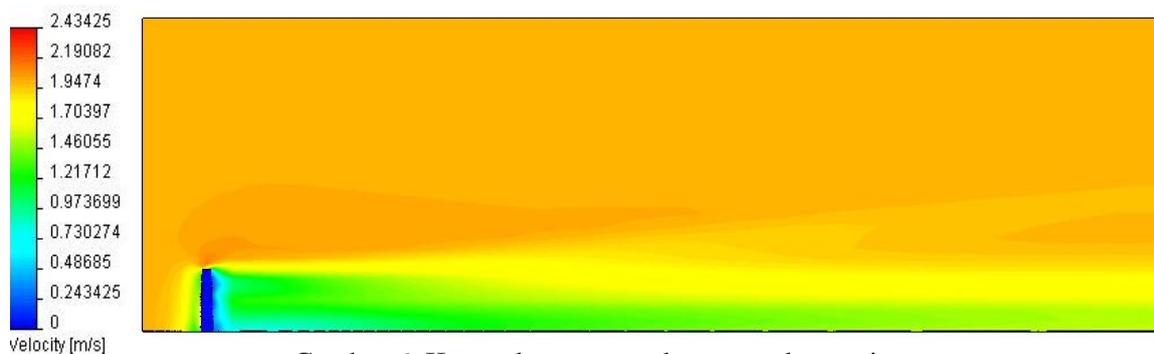
Jika dilihat dari parameter kecepatan udara, maka kecepatan maksimum aliran fluida yang terjadi pada permukaan silinder terdapat pada titik singgung arah aliran terhadap permukaan silinder. Pada posisi

tersebut terjadi perubahan tekanan secara signifikan karena pada wilayah bagian belakang permukaan silinder deformasi tekanan udara terhadap dinding silinder sangat rendah sehingga udara yang terdapat pada wilayah tersebut juga bertekanan rendah. Karena sifat udara lebih cenderung bergerak dari tekanan tinggi menuju tekanan rendah, oleh karena itu udara yang berada pada titik singgung permukaan silinder akan cepat bergerak mengisi ruang parsel udara di belakang cerobong silinder. Namun, pergerakan udara tersebut akan terhalang sejalan dengan terbentuknya *vortex*, yaitu pembentukan lapisan geser yang dipengaruhi oleh faktor tegangan geser, dan disini pula tumbuhnya potensi terbentuknya *vortex* dalam aliran yang disebut dengan *vorticity*. Kemudian aliran tersebut akan terpisah sejalan dengan titik tumbuh meningkatnya gaya gesek (*friction*) pada permukaan silinder. Sedangkan pada bagian depan permukaan dinding silinder tepat pada titik simetris, terjadi stagnasi kecepatan udara dan nilai deformasi tekanan maksimum.

Kontur kecepatan aliran udara dengan tampak samping dapat dilihat pada Gambar 6.

Input kecepatan udara ambien adalah sebesar  $2 \text{ m/s}$ , namun pada Gambar 6 terlihat bahwa terjadi peningkatan kecepatan di atas cerobong tempat keluarnya polutan. Peningkatan kecepatan tersebut disebabkan oleh perbedaan temperatur, dimana temperatur fluida gas polutan pada saat keluar dari cerobong dikondisikan sebesar  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sementara itu kondisi temperatur di ambien hanya sebesar  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Perbedaan inilah yang memicu pergerakan fluida, karena sifat gas akan sangat reaktif ketika dalam kondisi temperatur tinggi, sehingga fluida yang bertemperatur rendah akan bergerak mengisi ruang parsel udara yang reaktif tadi sampai pada kondisi setimbang.

Sebaran konsentrasi gas polutan yang diemisikan dari cerobong masing-masing memiliki pola sebaran berbeda sesuai dengan karakteristik

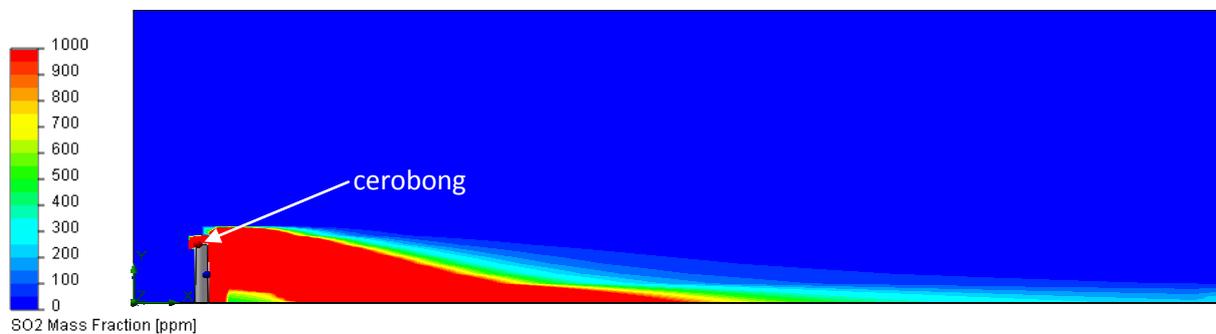


Gambar 6. Kontur kecepatan udara tampak samping

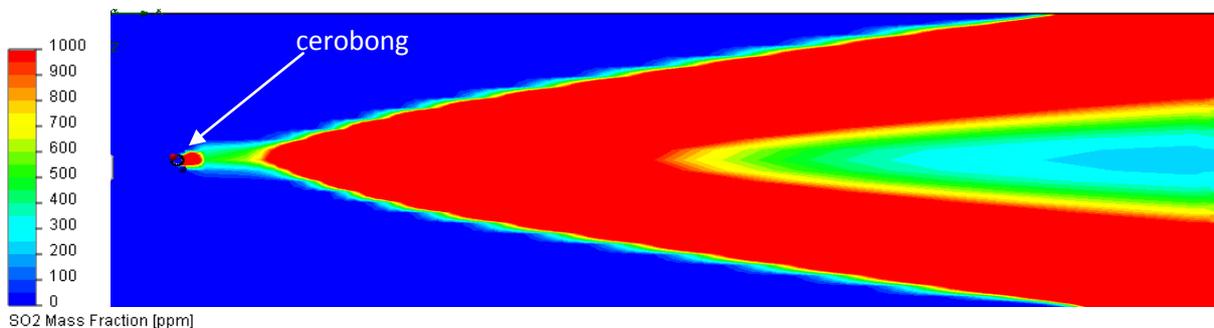
sifat material fluida gas polutan itu sendiri. Karena faktor kecepatan udara, nilai temperatur fluida dan gravitasi bumi yaitu sebesar  $9,81 \text{ m/s}^2$ , yang didefinisikan dalam simulasi satu dengan lainnya adalah sama. Bentuk sebaran konsentrasi gas polutan secara rinci dapat dilihat pada Gambar 7.

Pola sebaran gas polutan  $\text{SO}_2$  lebih cenderung jatuh ke permukaan tanah disamping terbawa oleh kecepatan aliran udara. Kecenderungan gas ini jatuh ke permukaan tanah dipengaruhi oleh berat molekul yang dimilikinya yaitu sebesar  $64,06 \text{ gram/mol}$ . Gas  $\text{SO}_2$  memiliki berat molekul  $121,125\%$  lebih besar dibandingkan dengan berat molekul udara yaitu

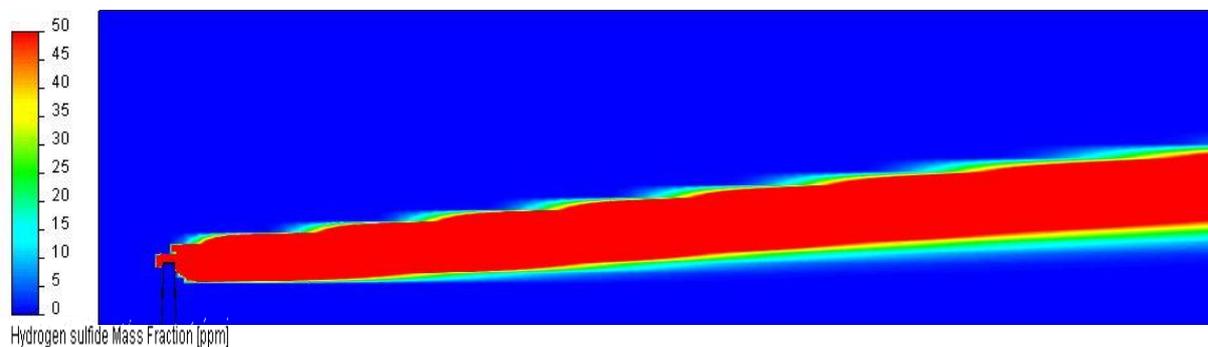
sekitar  $28,97 \text{ gram/mol}$ . Jika ini diintegrasikan terhadap gaya gravitasi bumi maka gaya berat yang dimiliki oleh gas  $\text{SO}_2$  dua kali lebih dari gaya berat yang dimiliki udara. Selain itu, viskositas dinamik  $\text{SO}_2$  jauh lebih rendah dibanding nilai viskositas dinamik udara yaitu berturut-turut sebesar  $1,158 \times 10^{-5}$  dan  $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ . Artinya kemampuan gerak massa partikel persatuan jarak dan waktu dari gas  $\text{SO}_2$  sangat rendah dibandingkan dengan kemampuan udara. Nilai viskositas dinamik akan berpengaruh sama terhadap arah gerak fluida dari sistem momentum Navier-Stokes.



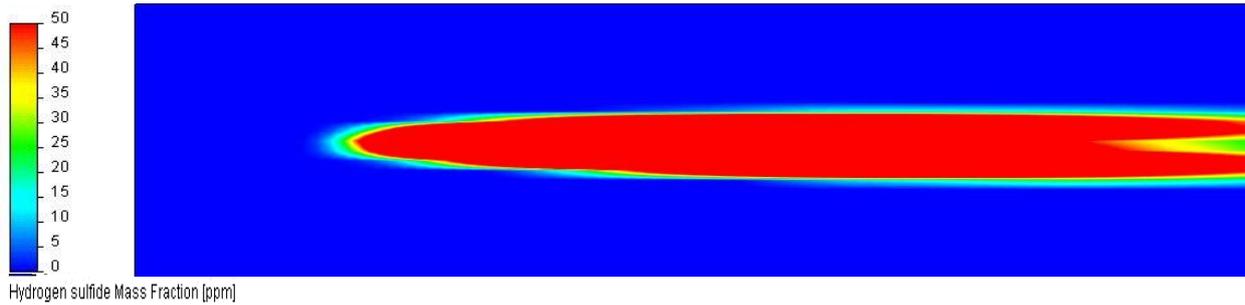
Gambar (7.a). Sebaran  $\text{SO}_2$  tampak samping sepanjang bidang *centerface*



Gambar (7.b). Sebaran  $\text{SO}_2$  tampak atas sepanjang bidang permukaan tanah

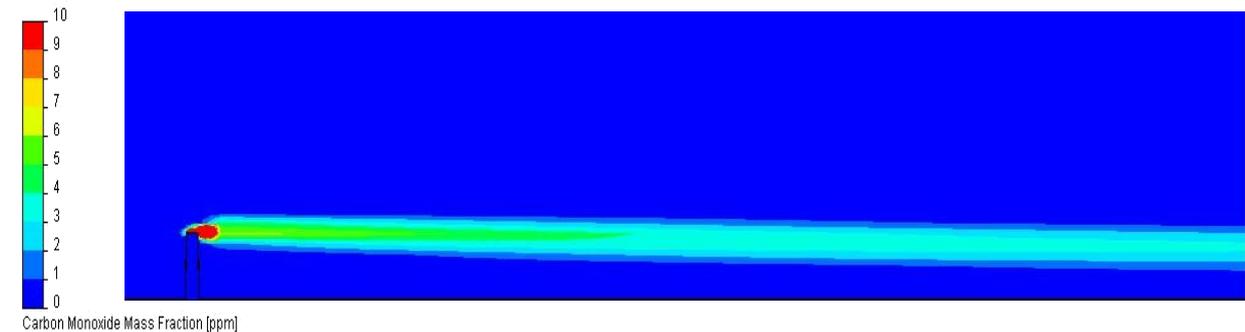


Gambar (7.c). Sebaran  $\text{H}_2\text{S}$  tampak samping sepanjang bidang *centerface*



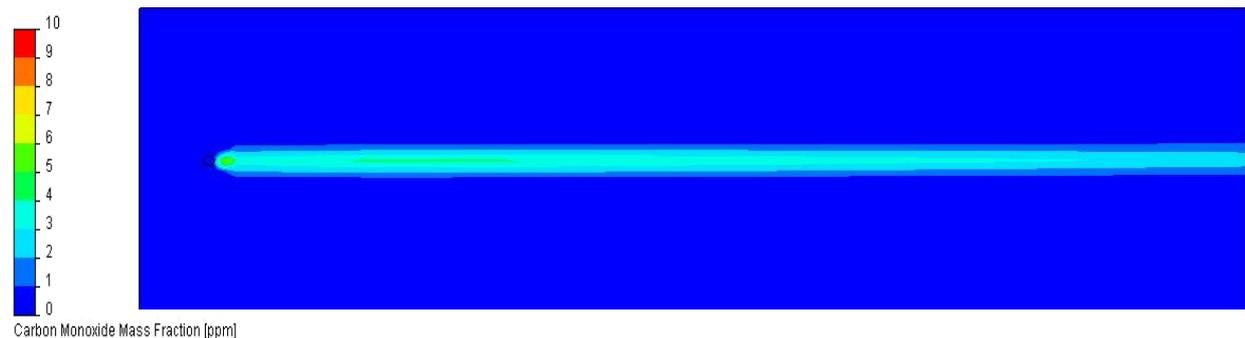
Hydrogen sulfide Mass Fraction [ppm]

Gambar (7.d). Sebaran H<sub>2</sub>S tampak atas pada ketinggian 30 m dari permukaan tanah



Carbon Monoxide Mass Fraction [ppm]

Gambar (7.e). Sebaran CO tampak samping sepanjang bidang *centerface*



Carbon Monoxide Mass Fraction [ppm]

Gambar (7.f). Sebaran CO tampak atas pada ketinggian 19 m dari permukaan tanah

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

### 4.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil pembahasan penelitian dispersi gas polutan antara lain adalah :

- 1) Pola aliran dispersi gas polutan masing-masing SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S dan CO berbeda satu sama lainnya. Aliran dispersi gas SO<sub>2</sub> menyentuh permukaan tanah pada jarak sekitar 20 m dari titik pusat cerobong. Aliran dispersi gas CO diprediksi menyentuh wilayah permukaan tanah di luar domain simulasi atau jauh sekitar 300 m dari cerobong. Sedangkan gas H<sub>2</sub>S tidak mengalir dan menyebar menuju permukaan tanah, karena arah pergerakan gas H<sub>2</sub>S naik ke atas menuju atmosfer.
- 2) simulasi dispersi dengan model EFD sangat dipengaruhi oleh faktor internal dari material fluida yaitu karakteristik kimiawinya.
- 3) Gas polutan yang paling besar memberikan dampak pencemaran terhadap permukaan tanah di lingkungan sekitar adalah gas SO<sub>2</sub>, dimana nilai konsentrasi yang paling tinggi terdapat pada jarak 60 m dari cerobong, yaitu sebesar 10721,6 ppm. Sedangkan gas CO mencemari permukaan tanah pada jarak di

atas 300 m dari cerobong dan gas H<sub>2</sub>S dari hasil simulasi tidak mencemari permukaan tanah karena bergerak ke atmosfer.

#### 4.2 Saran

Beberapa saran yang dapat direkomendasikan untuk penyempurnaan simulasi dalam kasus yang sama adalah :

- 1) Data input dalam simulasi lebih baik jika menggunakan data faktual primer atau data sekunder tapi dari satu sumber kasus.
- 2) Pertimbangan dalam menggunakan domain untuk simulasi harus memperhatikan wilayah fokus analisis aliran fluida agar dapat menghemat memori yang digunakan disamping tujuan dari analisis tercapai.
- 3) Untuk menyelesaikan kasus dengan pola aliran fluida yang tidak seragam sebaiknya diatur *time dependency* pada tahap *general setting* atau pengkondisian awal.
- 4) Dalam perencanaan pembangunan atau pengembangan suatu industri akan sangat bijak jika ditunjang dengan melakukan simulasi aliran penyebaran polutan sebagai akibat dari aktivitas industri yang direncanakan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anderson, John David Jr. 1995. Computational Fluid Dynamics : The Basic with Application. McGraw-Hill. Singapore.
- [2] Heinsohn, R.J and J.M. Cimbala. 2003. Indoor Air Quality Engineering. Marcel Dekker., Inc. New York.
- [3] Anonimus, 2003. Fluent 6.1 Tutorial Guide. [Http://www.fluent.com](http://www.fluent.com)