

**SIMULASI ANALISIS PENGARUH *REHEAT FLUE GAS* TERHADAP
DISPERSI POLUTAN KE LINGKUNGAN**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**PUTRA MARULITUA
NIM. 135060207111054**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

M A L A N G

2018

LEMBAR PENGESAHAN

**SIMULASI ANALISIS PENGARUH REHEAT FLUE GAS TERHADAP
DISPERSI POLUTAN KE LINGKUNGAN**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



PUTRA MARULITUA

NIM. 135060207111054-62

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 24 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

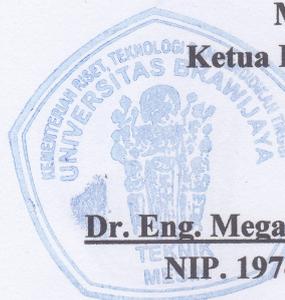
WINARTO, ST., MT., Ph.D
NIP. 710710 200012 1 001

Dosen Pembimbing II

HASLINDA K., ST., M.Eng
NIP. 19890102 201504 2 002

Mengetahui

Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



JUDUL SKRIPSI:

**SIMULASI ANALISIS PENGARUH *REHEAT FLUE GAS* TERHADAP DISPERSI
POLUTAN KE LINGKUNGAN**

Nama Mahasiswa : Putra Marulitua
NIM : 135060207111054
Program Studi : Teknik Mesin
Konsentrasi : Konversi Energi

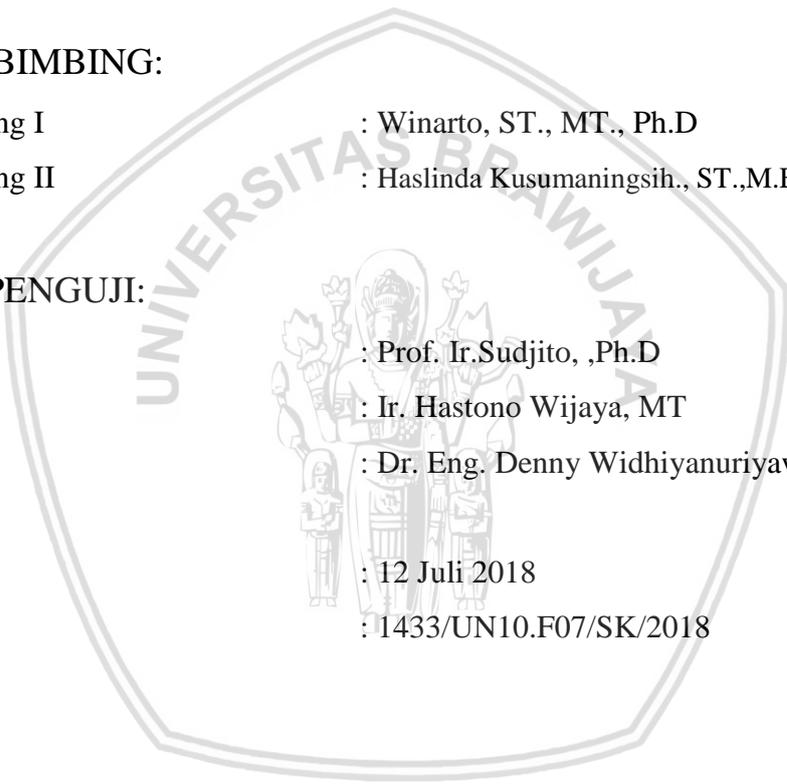
KOMISI PEMBIMBING:

Dosen Pembimbing I : Winarto, ST., MT., Ph.D
Dosen Pembimbing II : Haslinda Kusumaningsih., ST.,M.Eng

TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji I : Prof. Ir.Sudjito, ,Ph.D
Dosen Penguji II : Ir. Hastono Wijaya, MT
Dosen Penguji III : Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT

Tanggal Ujian : 12 Juli 2018
SK Penguji : 1433/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018

Mahasiswa,

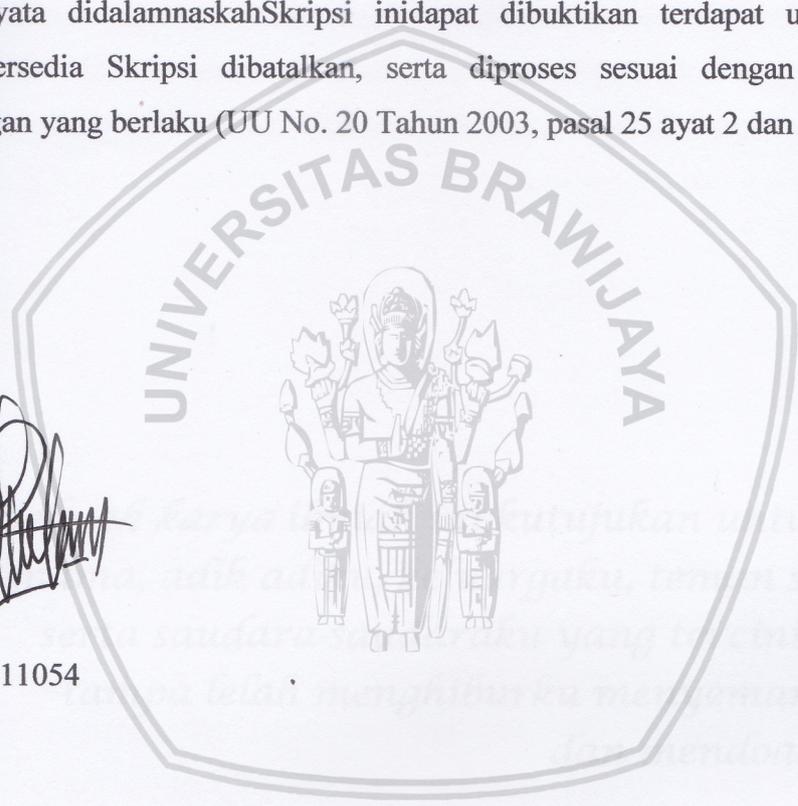
METERAI
TEMPEL

STAFF 170169564

6000
RUPIAH

Putra Marulitua

NIM. 135060207111054



CURRICULUM VITAE

Putra Marulitua

EDUCATION

- (2013) Bachelor's Degree of Mechanical Engineering, Brawijaya University
- Year Active: 2013-2018 || Cumulative GPA: 3.2 out of 4.00
- (2018) Thesis: Simulation to Analyze the Effect of Reheat Flue Gas on Dispersion Pollutants to the Environment

WORK EXPERIENCE

- (2017) Internship | PT. Paiton Operation & Maintenance Indonesia
| Engineering Department|Paiton – Indonesia
| As a Student Intern (27th Jan – 28 Feb 2017)|
- (2017) Research | PT. Tanjung Jati B Power Service| Jepara-Indonesia
| As a Student Research|

ORGANIZATION and COMMITTEE EXPERIENCE

- (2016) Kreativitas Mesin Brawijaya held by Himpunan Mahasiswa Mesin, Brawijaya University. As an Event Committee Member.
- (2015) Contest of Energy Saving Car (KMHE)|Dikti and Brawijaya University|
As a Race Committee staff
- (2015) Student Work Camp (Kemah Kerja Mahasiswa / KKM) XXXVII |
By : Faculty of Engineering Brawijaya University| As : Staff of Security Section 7th – 10th February |
- (2014) Kreativitas Mesin Brawijaya held by Himpunan Mahasiswa Mesin, Brawijaya University. As an Event Committee Member.
- (2014) M-Games 2014 | By : HMM Brawijaya University | As an Staff of Security | 26th – 29th Mei|
- (2013) Engineering Christmas Celebration held by Persekutuan Mahasiswa Kristen Yehezkiel, Brawijaya University. As a Decoration Staff.

TRAINING and CERTIFICATE

- (2015) Automation and Robotics Division, Brawijaya University.
As a Mechanic of Sub-Division: Line Follower Team.
- (2015) Automotive Basics Course (Kursus Dasar Dasar Otomotif / KDDO)
| By : Mechanical Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology | 25th – 26th April |
- (2017) Ansys Fluent Simulation | By : Mechanical Engineering, Brawijaya University | 24th October - 5th November |
- (2018) Microsoft Office Desktop Application Certification by Trust Training in Partnership with UBrawijaya University, Malang.
Certified with an Excellent/Golden Grade.



Putramaruli25@Gmail.com

+62 852-5259-1008

Kembang Kuning rt.03
Kec. Haruai Kab.Tabalong
Kalimantan Selatan

Nawin,
27 September 1994

SKILL

LANGUAGE

Bahasa (Native),
English (Moderate)
Banjar (Moderate)

SOFTWARE





*Sebuah karya ilmiah ini kutujukan untuk bapa
mama, adik adiku, keluargaku, teman sahabat
serta saudara-saudaraku yang tercinta yang
tampa lelah menghiburku menyemangatiku
dan mendoakan ku.*



RINGKASAN

Putra Marulitua, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2018, Simulasi Analisis Pengaruh *Reheat Flue Gas* Terhadap Disperse Polutan Ke Lingkungan, Dosen Pembimbing: Winarto ST., MT., Ph.D dan Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng

Studi simulasi analisis pengaruh *reheat flue gas* merupakan upaya pengembangan sektor pembangkit listrik tenaga uap yang lebih ramah lingkungan. Dimana *reheat flue gas* dapat mengurangi konsentrasi gas buang di lingkungan. Gas buang yang menyebar ke lingkungan dipantau menggunakan simulasi. Simulasi penyebaran polutan dapat dilakukan untuk mengetahui penyebaran gas buang dan pengaruh dari *reheat flue gas*.

Simulasi dispersi polutan dilakukan dengan menggunakan program *computational fluid dynamic (CFD)* yang berbasis metode *finite volume*. Seperti pada penelitian kali ini bukaan damper 0%, 10% dan 15% diperoleh hasil bahwa efek dari bukaan damper menyebabkan temperatur gas buang saat keluar cerobong meningkat.

Semakin besar bukaan damper maka gas buang saat keluar cerobong semakin cepat terdifusi ke lingkungan maka konsentrasi gas buang akan semakin rendah. Apabila kita bandingkan antara bukaan damper 0%, 10% dan 15% untuk setiap jarak dari cerobong yang sama maka luas area konsentrasi gas buang dengan bukaan damper 15% lebih luas dibandingkan 10% dan 0%. Demikian juga dengan bukaan damper 10% lebih luas dibandingkan dengan 0%. Ini menunjukkan semakin tinggi temperatur gas buang yang keluar dari cerobong maka gas buang akan semakin cepat terdifusi ke udara sekitar. Semakin cepat gas buang terdifusi ke lingkungan maka konsentrasi gas SO_2 akan semakin menurun. Selain itu juga semakin besar bukaan damper maka semakin besar pula gaya buoyancy pada gas buang sehingga gas buang semakin bergerak keatas. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur gas buang maka massa jenis gas buang akan semakin rendah. Karena massa jenis gas buang lebih kecil dari pada massa jenis udara disekitarnya maka gas buang cenderung bergerak naik. Gas buang yang diemisikan ke lingkungan akan menyebar searah dengan arah angin dan akan jatuh ke permukaan tanah. Semakin besar gaya buoyancy maka gas buang akan bergerak semakin tinggi sebelum jatuh ke permukaan tanah sebelum temperaturnya turun. Sehingga dengan bukaan damper yang semakin besar penyebaran gas buang akan semakin luas dan konsentrasi gas buang akan semakin menurun.

Kata Kunci : CFD, dispersi gas buang, *reheat flue gas*

SUMMARY

Putra Marulitua, Jurusan Teknik Mesin, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, June 2018, Simulation to Analyze the Effect of Reheat Flue Gas on Dispersion Pollutants to the Environment, Academic Supervisor : Winarto ST., MT., Ph.D dan Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng*

Study Simulation to Analyze the Effect of Reheat Flue Gas is an effort to develop a more environmentally friendly steam power plant. Simulation of pollutant spread can be done to reduce the environmental impact caused by the process of power plant activity. Simulation of pollutant spread can be done to reduce the environmental impact caused by the process of power plant activity.

The simulation of the dispersion pollutant is using a computational fluid dynamic (CFD) program based on the finite volume method. As in this research a damper opening of 0%, 10% and 15% obtained the result the effect of the damper openings caused the flue gas temperature as the exit of the chimney increased.

The larger of opening damper then the flue gas when the exit chimney more quickly diffuse into the environment than the concentration of flue gas will be lower. If we compare between 0%, 10% and 15% damper openings for each distance of the same chimney then the area of flue gas concentration with damper openings is 15% wider than 10% and 0%. Likewise, damper openings are 10% wider than 0%. This shows the higher the flue gas temperature coming out of the chimney then the flue gas will be fast diffused into the surrounding air The faster the flue gas diffuses into the environment the SO₂ gas concentration will decrease The larger of opening damper the greater the buoyancy force in the flue gas so that the flue gas is moving upwards. This is because the increasing temperature of the flue gas then the density of flue gas will be lower. Because the density of the flue gas is smaller than the density of the ambient air, the flue gas tend to moving upwards. The flue gas emitted to the environment will spread in the direction of the wind and will fall in the soil surface. The larger the buoyancy force the flue gas will move higher before falling to the surface of the ground before the temperature drops. And then the large of opening damper the spread of flue gas will be wider and the concentration of flue gas will decrease.

Keywords: CFD, dispersion of flue gas , reheat flue gas

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “**Simulasi Analisis Pengaruh Reheat Flue Gas Terhadap Dispersi Polutan Ke Lingkungan**”, yang diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan akademik dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini, Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Winarto ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan arahan, masukan, saran serta bimbingan selama penulisan skripsi ini
2. Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan dan saran yang sangat membantu dalam penulisan skripsi ini. .
3. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D. selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D. selaku sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
5. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Rudianto Raharjo, ST., MT. selaku dosen pembimbing akademis yang telah memberikan pengarahan dan motivasi selama menempuh perkuliahan ini.
7. Kedua orang tua tercinta, yaitu G. Aritonang dan Arita Sinurat yang telah memberikan doa, dukungan yang luar biasa, semangat tak terhingga dan segala yang terbaik untuk penulis.
8. Seluruh Staf Pengajar dan Administrasi Jurusan Teknik Mesin.
9. Parnowo ST selaku pembimbing lapangan yang telah membantu saya dalam membimbing dan menyemangati selama penelitian
10. Jecky, Arya, Harits, Sudar, dan Albi selaku sahabat yang selalu menyemangati menghibur dalam suka maupun duka
11. Jodie, Elan, Olben dan teman-teman PMK yang senantiasa menghibur menyemangati selama masa perkuliahan dan masa penyusunan skripsi.
12. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya yang telah secara langsung maupun tidak langsung ikut membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

13. Keluarga M13 yang sangat berharga bagi penulis.
14. Asisten Laboratorium Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem yang selalu membantu ketika penelitian untuk menyelesaikan skripsi ini.
15. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna baik dari isi maupun format penulisan. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar kedepannya menjadi lebih baik. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, memunculkan ide baru dan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Juni 2018



Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	V
DAFTAR GAMBAR	VI
DAFTAR LAMPIRAN	VII
RINGKASAN	IX
SUMMARY	X

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 <i>Partial Bypass Duct</i>	6
2.3 Sulfur	7
2.4 <i>Flue Gas Desulfurization</i>	8
2.5 Udara	8
2.6 Konduktivitas Termal	9
2.7 <i>Stack/ Chimney</i>	10
2.8 Dispersi.....	11
2.9 Klimatologi dan Meteorologi	12
2.9.1 Angin.....	13
2.9.2 Tekanan Udara dan Temperatur	13
2.10 Persamaan Pendekatan Numerik.....	13
2.11 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	14
2.11.1 Metode Diskritisasi CFD	15
2.11.2 Geometri dan <i>Meshing</i>	17
2.11.3 Kondisi Batas	18



2.12 Hipotesis18

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian21
 3.2 Variabel Penelitian21
 3.3 Alat Bantu Penelitian.....21
 3.4 Waktu dan Tempat Penelitian22
 3.5 Model Sistem dan Desain Geometri.....23
 3.6 Prosedur Penelitian.....24
 3.7 Diagram Alir Penelitian.....26

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Distribusi Temperatur29
 4.2 Penyebaran Gas Buang ke Lingkungan32
 4.2.1 Dispersi Gas SO₂ ke Lingkungan34
 4.2.2 Dispersi Gas CO₂ Ke Lingkungan37
 4.2.3 Dispersi Gas N₂ Ke Lingkungan36
 4.2.5 Dispersi Gas CO di Lingkungan40

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan47
 5.2 Saran47

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi gas di udara	10
Tabel 2.2	Konduktivitas termal beberapa bahan umum	10
Table 3.1	Data data desain FGD.....	24
Table 3.2	Data Desain Geometri <i>stack</i>	24

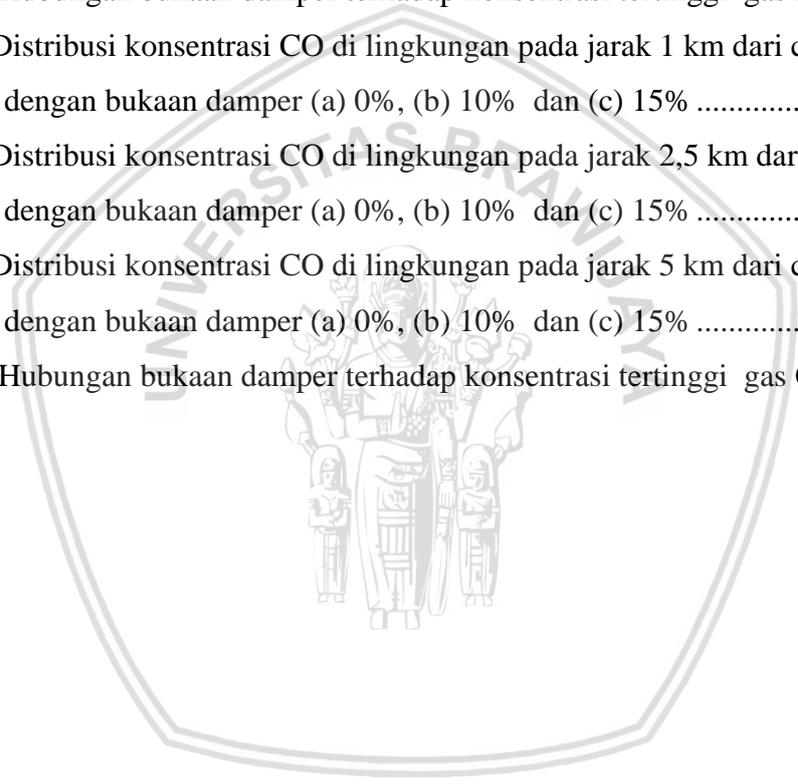




DAFTAR GAMBAR

NO.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Partial Bypass	7
Gambar 2.2	Guillotine Damper	8
Gambar 2.3	Komponen-komponen FGD	9
Gambar 2.4	<i>Stack / chimney</i>	11
Gambar 2.5	Fluktuasi kecepatan angin akibat turbulensi mekanis dan turbulensi termal.....	13
Gambar 2.6	(a) Pembagian <i>control volume</i> 1 dimensi (b) Panjang <i>control volume</i>	17
Gambar 2.7	Gride 2 dimensi	18
Gambar 2.8	Gride 3 dimensi	18
Gambar 2.9	Ilustrasi grid hasil <i>meshing</i> domain dari geometri cerobong.....	19
Gambar 3.1	Desain skema penelitian	23
Gambar 3.2	(a) Desain geometri FGD, Desain Geometri <i>Stack</i>	24
Gambar 4.1	Distribusi temperatur pada <i>flue gas desulfurization</i> dengan kondisi (a) bukaan damper 0%, (b) bukaan damper 10%, dan (c) bukaan damper 15%.....	30
Gambar 4.2	Distribusi temperatur di stack/cerobong (a) pada bukaan damper 0%, (b) pada bukaan damper 10%, dan (c) pada bukaan damper 15%	31
Gambar 4.3	Penyebaran gas buang ke lingkungan (a) pada bukaan damper 0%, (b) pada bukaan damper 10%, dan (c) pada bukaan damper 15 %	32
Gambar 4.4	Distribusi konsentrasi SO ₂ di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	34
Gambar 4.5	Distribusi konsentrasi SO ₂ di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	34
Gambar 4.6	Distribusi konsentrasi SO ₂ di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%.	35
Gambar 4.7	Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas SO ₂	35
Gambar 4.8	Distribusi konsentrasi CO ₂ di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	37
Gambar 4.9	Distribusi konsentrasi CO ₂ di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	37

Gambar 4.10 Distribusi konsentrasi CO ₂ di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	38
Gambar 4.11 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas CO ₂	38
Gambar 4.12 Distribusi konsentrasi N ₂ di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	39
Gambar 4.13 Distribusi konsentrasi N ₂ di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	40
Gambar 4.14 Distribusi konsentrasi N ₂ di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	40
Gambar 4.15 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas N ₂	41
Gambar 4.16 Distribusi konsentrasi CO di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	42
Gambar 4.17 Distribusi konsentrasi CO di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	42
Gambar 4.18 Distribusi konsentrasi CO di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%	43
Gambar 4.19 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas CO.....	43



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Kontur fraksi massa SO ₂ pada jarak 0m dari cerobong
Lampiran 2.	Kontur fraksi massa SO ₂ pada jarak 50m dari cerobong
Lampiran 3.	Kontur fraksi massa SO ₂ pada jarak 100m dari cerobong
Lampiran 4.	Kontur fraksi massa N ₂ pada jarak 0m dari cerobong
Lampiran 5.	Kontur fraksi massa N ₂ pada jarak 50m dari cerobong
Lampiran 6.	Kontur fraksi massa N ₂ pada jarak 100m dari cerobong
Lampiran 7.	Kontur fraksi massa CO ₂ pada jarak 0m dari cerobong
Lampiran 8.	Kontur fraksi massa CO ₂ pada jarak 50 m dari cerobong
Lampiran 9.	Kontur fraksi massa CO ₂ pada jarak 100 m dari cerobong
Lampiran 10.	Kontur fraksi massa CO pada jarak 0 m dari cerobong
Lampiran 11.	Kontur fraksi massa CO pada jarak 50 m dari cerobong
Lampiran 12.	Kontur fraksi massa CO pada jarak 100 m dari cerobong
Lampiran 13.	Kontur fraksi massa CO pada jarak 200 m diatas permukaan tanah
Lampiran 14.	Kontur fraksi massa CO pada jarak 300 m diatas permukaan tanah
Lampiran 15.	Kontur fraksi massa CO pada jarak 400 m diatas permukaan tanah
Lampiran 16.	Kontur fraksi massa CO ₂ pada jarak 200 m diatas permukaan tanah
Lampiran 17.	Kontur fraksi massa CO ₂ pada jarak 300 m diatas permukaan tanah
Lampiran 18.	Kontur fraksi massa CO ₂ pada jarak 400 m diatas permukaan tanah
Lampiran 19.	Kontur fraksi massa N ₂ pada jarak 200m diatas permukaan tanah
Lampiran 20.	Kontur fraksi massa N ₂ pada jarak 300m diatas permukaan tanah
Lampiran 21.	Kontur fraksi massa N ₂ pada jarak 400m diatas permukaan tanah
Lampiran 22.	Kontur fraksi massa SO ₂ pada jarak 200m diatas permukaan tanah
Lampiran 23.	Kontur fraksi massa SO ₂ pada jarak 300m diatas permukaan tanah
Lampiran 24.	Kontur fraksi massa SO ₂ pada jarak 400m diatas permukaan tanah

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Kehidupan manusia sangat bergantung terhadap energi, khususnya energi listrik dimana energi listrik disini banyak di produksi menggunakan pembangkit tenaga uap dengan menggunakan bahan bakar fosil yaitu batubara. Batubara telah digunakan secara luas di pembangkit listrik dengan teknologi yang lebih baik. Oleh karena itu batubara memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan lainnya, diantaranya adalah keandalan, keterjangkauan, keberlimpahan, teknologi yang sudah dikenal.

Salah satu keuntungan terbesar dari pembangkit berbahan bakar batubara adalah keandalannya. Kemampuan batubara untuk memasok listrik pada permintaan puncak diakui sebagai kelebihan utama batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Energi yang dihasilkan dari pembangkit batubara lebih murah dan lebih terjangkau dibandingkan sumber energi lainnya. Karena batubara berlimpah, sudah pasti dibutuhkan ongkos yang lebih murah untuk menghasilkan listrik menggunakan bahan bakar ini. Selain itu, biaya untuk mengekstrak dan menambang batubara tidaklah mahal. Akibatnya, harga masih lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar dan sumber energi lain.

Cadangan batubara lebih dari 300 tahun masih dapat diambil secara ekonomis, dengan jumlah ketersediaan batubara yang berlimpah dapat digunakan oleh pembangkit listrik berbahan bakar batubara untuk beberapa tahun mendatang. Teknologi produksi dan penggunaan batubara sebagai bahan bakar sudah dipahami dengan baik, dan teknologi yang dibutuhkan dalam memproduksinya terus berkembang. Selain itu, teknik penambangan batubara terus ditingkatkan untuk memastikan selalu ada pasokan batubara untuk produksi listrik dan energi.

Disamping itu begitu banyak keuntungan penggunaan batubara, tetapi batubara juga memiliki kekurangan salah satunya adalah kandungan sulfur SO_2 yang menjadi penyebab utama terjadinya hujan asam. Sulfur dioksida (SO_2) merupakan salah satu emisi penting di instalasi pembangkit listrik (*power plant*) tenaga batubara. Pemilihan jenis batubara dengan kadar sulfur yang rendah belum mampu untuk mengurangi dampak lingkungan yang diakibatkan oleh emisi sulfur, alat yang digunakan untuk menurunkan

konsentrasi SO_2 pada gas buang (*flue gas*) menggunakan alat *Flue Gas Desulfurization* (FGD). Pada FGD gas buang yang mengandung sulfur di bersihkan menggunakan larutan kapur. Larutan kapur akan mengikat sulfur dan memisahkannya dari gas buang, sehingga kandungan sulfur pada gas buang menjadi bersih.

Gas buang yang keluar dari *stack* bersifat jenuh karena larutan kapur pada proses FGD mengalami penguapan sehingga terdapat tetesan air yang dapat jatuh ketika keluar dari *stack*. Tetesan air yang jatuh bersifat asam sehingga dapat menyebabkan terjadinya korosif pada material logam disekitarnya. Selain itu gas buang tidak menyebar mejauhi pembangkit dapat menyebabkan kosentrasi polutan meningkat di satu titik saja. Hal ini dapat menyebabkan hujan dengan kandungan asam yang tinggi pada suatu daerah tertentu. Salah satu cara yang digunakan untuk mengurangi akibat dampak negatif tersebut adalah dengan *Reheat Flue Gas*.

Reheat Flue Gas akan menaikkan temperatur gas buang, sehingga temperatur gas menjadi tinggi dan gas buang akan menjadi lebih kering dan juga kandungan air pada gas buang akan menguap dan tidak menetap didaerah sekitar *stack*. Selain itu pengaruh *Reheat Flue Gas* adalah menambah area penyebaran gas buang akan semakin meluas dan kandungan kosentrasi sulfur di udara akan semakin berkurang dikarenakan penyebaran gas buang semakin meluas.

Gas buang yang menyebar di udara perlu di pantau dan diteliti arah penyebarannya, sehingga kita dapat mengendalikannya. Untuk melihat pola penyebaran gas buang diudara kita dapat melakukannya dengan pemodelan. Untuk pemodelan tersebut kita dapat melakukannya dengan simulasi pendekatan model secara matematis. Dengan simulasi komputer yang dapat memprediksi aliran fluida dalam bentuk gas yang keluar dari *stack* ke lingkungan. Salah satu aplikasi yang digunakan adalah CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang pada penelitian ini, maka permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *Reheat Flue Gas* terhadap temperatur gas buang.
2. Bagaimana pengaruh *Reheat Flue Gas* terhadap dispersi polutan ke lingkungan.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah, maka dibutuhkan suatu batasan masalah, antara lain sebagai berikut:

1. Pada pengujian ini gas yang diteliti adalah difusi gas buang
2. *Reheat flue gas* menggunakan *partial bypass* yaitu dengan mengalirkan sebagian gas buang sebagai pemanas.
3. Pada penelitian kali ini kecepatan angin dianggap konstan dan arah angin dianggap searah
4. Temperatur lingkungan dianggap konstan
5. Tekanan udara dianggap konstan
6. Aliran gas buang di anggap *steady*
7. Perpindahan panas antar cerobong yang lain diabaikan
8. Perpindahan panas dari cerobong ke lingkungan diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

1. Meningkatkan penyebaran gas buang ke lingkungan,
2. Mengurangi konsentrasi gas buang di udara,
3. Memprediksi konsentrasi gas buang, serta mengetahui jarak dispersi gas buang dengan menggunakan CFD

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut:

- a. Menambah pengalaman dan pengetahuan peneliti serta memecahkan masalah masalah yang terjadi dalam proses produksi di pembangkit listrik tenaga uap.

- b. Mampu mensimulasikan dan memvisualisasikan aliran gas buang dari inlet FGD dan cerobong atau *stack* ke lingkungan sebagai aktivitas pembangkit listrik tenaga uap di PT. Tanjung Jati B.
- c. Dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga uap yang lebih ramah lingkungan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Keadaan kualitas udara di lingkungan industri ditentukan oleh emisi partikel yang keluar dari cerobong- cerobong asap pabrik. Partikel-partikel tersebut akan menyebar menjauhi cerobong searah angin dan jatuh mengotori area sekitarnya. Luas jangkauan dan kadar pencemaran pada area yang terkena polusi sangatlah bervariasi, bergantung pada laju buangan. Dimensi cerobong, kondisi cuaca, dan topologi area tersebut. Tersedianya informasi awal tentang kemungkinan tercemarnya suatu daerah didekat kawasan industri pada waktu tertentu akan banyak membantu dalam antisipasi akibat negatif yang ditimbulkan oleh gas buang Nauli (2002).

Froelich & Graves (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh memanaskan kembali gas buang sebelum dibuang melalui *stack*, dengan dua alasan utama yaitu untuk mencegah korosi disekitar pembangkit dan yang kedua mengurangi dampak terhadap lingkungan. Karena polutan dan zat korosif masih bisa terlepas dari absorber, gas buang yang mengembun biasanya mengandung sulfur. Bahkan dengan absorber yang paling efisien sekalipun masih belum bisa untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan. Sistem *Stack Gas Reheat* (SGR) dirancang untuk menaikkan temperatur gas buang mengurangi terjadinya pengembunan, yang dapat mengurangi potensi korosif karena sifat zat nya berupa asam.

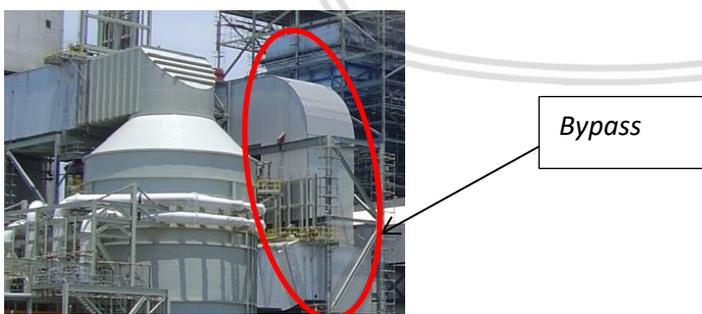
Efek terhadap lingkungan yang ditimbulkan dari penggunaan *Stack Gas Reheat* ada 3 yaitu: membantu penyebaran gas buang ke lingkungan, menghilangkan terjadinya pengembunan disekitar *stack*, dan pembentukan kepulan di *stack*. Menaikkan temperatur gas buang, seperti pada SGR, akan cenderung meningkatkan gas buang menyebar dan mengurangi konsentrasi pencemaran di lingkungan sekitar. Pertimbangan lingkungan kedua adalah tetesan air. Gas buang dapat berupa gas jenuh yang dapat menetes pada area sekitar *stack* yang dapat membentuk tetesan asam yang bisa merusak pasilitas *plant*. Dan pertimbangan terakhir terkait dengan SGR adalah pembentukan kupalan asap yang terlihat pada *stack*. Kepulan yang terlihat tidak memiliki dampak fisik terhadap lingkungan, namun dapat terlihat kurang indah untuk di lihat. Kupalan terbentuk pada saat gas buang bercampur dengan udara ambien yang lebih dingin. Untuk menghilangkan kepulan asap yaitu dengan cara pemanasan ulang atau *Stack Gas Reheater* (SGR).



Simulasi komputer adalah penggunaan model matematika untuk menggambarkan secara realistis perilaku nyata dari sistem dengan mengukur respon dinamik dari variabel-variabel proses yang dipantau, seperti kecepatan, temperatur, tekanan, dan komposisi bahan termasuk didalamnya adalah konsentrasi bahan Niam (2009). *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan program komputer untuk membuat suatu prediksi yang akan terjadi secara kuantitatif pada suatu fluida mengalir. Dengan menggunakan CFD prediksi aliran fluida diberbagai sistem dapat dilakukan dengan biaya yang relatif murah dan waktu yang singkat dibandingkan dengan metode eksperimen Nugraha (2005). CFD adalah suatu ilmu yang mempelajari bagaimana cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena-fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika). Secara istilah CFD bisa berarti suatu teknologi komputasi yang memungkinkan untuk mempelajari dinamika dari benda-benda atau zat-zat yang mengalir Tuakia (2008). Program CFD digunakan untuk membantu mendapatkan visualisasi sebaran gas terdispersi dari hasil perhitungan. CFD dapat mensimulasikan perilaku sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan sifat fisik lainnya.

2.2 *Partial Bypass Duct*

Partial bypass duct seperti pada gambar 2.1 adalah salah satu instalasi saluran gas buang yang dapat digunakan pada saat saat darurat, misalkan terdapat gangguan pada sistem *Flue Gas Desulfurization* yang tidak dapat beroperasi dengan baik, maka gas buang dapat dialirkan kecerobong melalui *partial bypass duct* tersebut.



Gambar 2.1 *Partial Bypass*

Untuk menaikan temperatur gas buang salah satunya dengan cara *partial bypass*, yaitu dengan mengalirkan sebagian gas buang melaluli *bypass*. Gas buang yang dialirkan melalui *Bypass* digunakan sebagai pemanas untuk menaikan temperatur gas buang. Dengan demikian terjadi percampuran antara gas buang bertemperatur tinggi dengan gas

buang yang mengalami kondensasi, sehingga temperatur dari gas buang dapat meningkat selanjutnya dialirkan pada *stack*. Untuk mengatur aliran gas buang melalui *bypass* diperlukan sebuah alat *Guillotine Damper* yang dapat kita lihat pada gambar 2.2. Alat ini dapat mengatur laju aliran gas buang sesuai yang di inginkan.



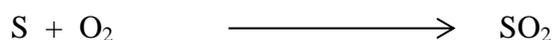
Gambar 2.2 Guillotine Damper

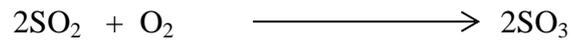
2.3 Sulfur

Batu bara salah satu bahan bakar yang banyak di gunakan pada industri karena harga batubara dapat dikatakan lebih murah dari bahan bakar yang lainnya. Tetapi terdapat kandungan sulfur pada batubara yang dapat berubah menjadi SO_3 pada saat proses pembakaran. Oleh karena itu pemilihan batubara secara seksama dapat dilakukan untuk mengurangi kandungan sulfur pada batubara tersebut.

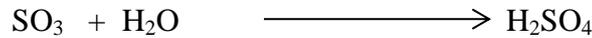
Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor : 21 Tahun 2008 Tanggal : 1 Desember 2008 kadar maksimum Sulfur dioksida (SO_2) yang keluar kelingkungan yang di izinkan adalah $750 \text{ (mg/Nm}^3\text{)}$. Polusi oleh sulfur oksida disebabkan oleh dua komponen gas yang tidak berwarna, yaitu sulfur dioksida (SO_2) dan sulfur trioksida (SO_3), dan keduanya disebut sebagai SO_x . Sulfur dioksida memiliki karakteristik bau yang tajam dan tidak terbakar di udara, sedangkan sulfur trioksida merupakan komponen yang tidak reaktif.

Mekanisme pembentukan SO_x dapat dituliskan dalam 2 tahap reaksi sebagai berikut:





Adanya SO_3 diudara dalam bentuk gas hanya mungkin jika konsentrasi uap air sangat rendah. Jika uap air terdapat dalam jumlah cukup seperti biasanya, SO_3 dan air akan segera bereaksi membentuk tetesan asam sulfat (H_2SO_4) dengan reaksi sebagai berikut:



Pengaruh SO_x terhadap bahan-bahan logam dapat mempercepat terjadinya korosif yang disebabkan SO_3 yang bereaksi dengan uap air di atmosfer.

2.4 Flue Gas Desulfurization

Gas buang hasil pembakaran batu bara pada boiler masih terdapat kandungan sulfur yang tinggi yang dapat berbahaya terhadap lingkungan. Gas buang sebelum dialirkan ke udara harus memenuhi kandungan maksimal sulfur didalam gas buang. Untuk mengurangi kandungan sulfur pada gas buang diperlukan suatu alat untuk menyerap sulfur pada gas buang yaitu *Flue Gas Desulfurization* (FGD). Untuk melihat bagian-bagian dari FGD dapat dilihat pada gambar 2.3.

Gas buang dialirkan ke FGD lalu disemprotkan larutan kalsium karbonat CaCO_3 . Larutan kalsium karbonat akan mengikat kandungan sulfur pada gas buang, sehingga gas buang menjadi lebih bersih. Reaksi yang akan terjadi bila menggunakan larutan kalsium karbonat.



Gambar 2.3 Flue gas desulfurization

2.5 Udara

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan dan dapat berubah-ubah. Komponen

yang konsentrasinya selalu bervariasi adalah air dalam bentuk uap H_2O . Jumlah uap air yang terdapat di udara bervariasi tergantung temperatur dan cuaca.

Komposisi gas yang terdapat pada udara dapat dilihat pada Table 2.1 . Konsentrasi gas dapat dinyatakan dalam persen atau ppm (*part per million*), untuk gas yang konsentrasinya sangat kecil biasanya dinyatakan dalam bentuk ppm.

Tabel 2.1
Komposisi gas di udara

Komponen	Formula	Persen Volume	ppm
Nitrogen	N_2	78,08	780 800
Oksigen	O_2	20,95	209 500
Argon	Ar	0,934	9 340
Karbon dioksida	CO_2	0,0314	314
Neon	Ne	0,00182	18
Helium	He	0,000524	5
Metana	CH_4	0,0002	2
Kripton	Kr	0,000114	1

Sumber : Stoker & Seager (1972)

2.6 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Dimensi dari nilai konduktivitas termal suatu material adalah watt/m.K. Semakin tinggi konduktivitas termal suatu material menunjukkan bahwa material tersebut adalah konduktor panas yang baik, sebaliknya semakin rendah konduktivitas termal suatu material maka material tersebut merupakan material isolator.

Harga tertinggi untuk konduktivitas termal menunjukkan bahwa material adalah konduktor panas yang baik, dan harga terendah untuk konduktivitas termal menunjukkan bahwa material adalah bukan penghantar panas yang baik atau disebut isolator. Konduktivitas termal beberapa material pada temperatur kamar dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2
Konduktivitas termal beberapa bahan umum

BAHAN	K (Watt/m.K)
Udara	0,024
Uap air	2,010
Air	4,200

Sumber: Holman (1984)

Temperatur adalah ukuran energi kinetik dari partikel seperti molekul atau atom dari suatu zat. Pada cairan dan gas, energi kinetik dari partikel terjadi karena adanya gerak translasi gerak getaran dan gerak rotasi. Ketika dua molekul yang memiliki energi kinetik yang berbeda berbenturan, sebagian dari energi kinetik dari molekul yang energinya lebih besar ditransfer ke molekul yang energinya lebih rendah. Sama seperti ketika dua bola elastis dengan massa yang sama tetapi kecepatannya yang berbeda berbenturan, sebagian dari energi kinetik dengan bola kecepatan tinggi ditransfer ke bola yang kecepatannya lebih rendah. Semakin tinggi temperatur, maka semakin cepat molekul bergerak, semakin banyak jumlah molekul yang bertabrakan. Artinya laju perpindahan panas semakin tinggi.

2.7 Stack/ Chimney

Chimney adalah bangunan/menara yang berfungsi untuk mengeluarkan gas buang panas atau asap dari boiler ke atmosfer. Pada dasarnya chimney juga berfungsi sebagai *induced draft* yaitu dengan menggunakan perbedaan tekanan udara antara sisi inlet (yang berada di permukaan tanah) dengan udara di sisi *outlet* (yang berada lebih tinggi di ujung cerobong asap) sehingga udara akan secara natural mengalir dari tekanan yang tinggi ke daerah yang bertekanan lebih rendah.

Penyebaran polutan di udara, terutama dari industri ditentukan oleh tinggi *stack*. Semakin tinggi *stack* yang digunakan, maka semakin jauh jarak penyebaran polutan yang diemisikan (Ruhiat, 2009). Tinggi *stack* minimal 50 m dapat membuat penyebaran gas buang menyebar sangat jauh. Sedangkan untuk industri skala besar tinggi *stack* yang digunakan harus minimal 200 m (Forsdyke, 1970). Pada gambar 2.4 dapat dilihat cerobong pada pembangkit listrik tenaga uap dengan tinggi 239,7 m dari permukaan tanah



Gambar 2.4 Stack / chimney

2.8 Dispersi

Dispersi adalah penyebaran gas buang dari *stack* ke lingkungan. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi dispersi gas ke atmosfer adalah :

1. Faktor temperatur

Temperatur dapat mempengaruhi penyebaran dispersi gas buang dimana apabila temperatur lingkungannya semakin tinggi maka penyebaran gas buang akan semakin meningkat (Hasibuan, 2015).

2. Faktor arah dan kecepatan angin

Salah satu fungsi angin adalah mencampurkan udara antara udara yang kaya dengan kandungan sulfur dengan udara yang rendah kandungan sulfur. Angin yang bergerak secara konstan ke suatu wilayah akan terus menerus terpapar oleh polutan dan konsentrasi polutan pada wilayah tersebut meningkat. Sebaliknya apabila arah anginnya berubah-ubah maka polutan akan menyebar kearah yang lebih luas dan konsentrasi polutan pada wilayah yang terkena dampak akan berkurang (Godish, 1991)

Kecepatan angin dapat mempengaruhi sejauh mana polutan akan bergerak kesuatu wilayah. Angin dapat bergerak secara horizontal dan juga dapat bergerak secara vertikal dengan kecepatan yang bervariasi dan berfluktuasi secara dinamis. Faktor pendorong bergeraknya massa udara adalah perbedaan tekanan udara dari tempat dengan tekanan tinggi ke tempat dengan tekanan yang lebih rendah.

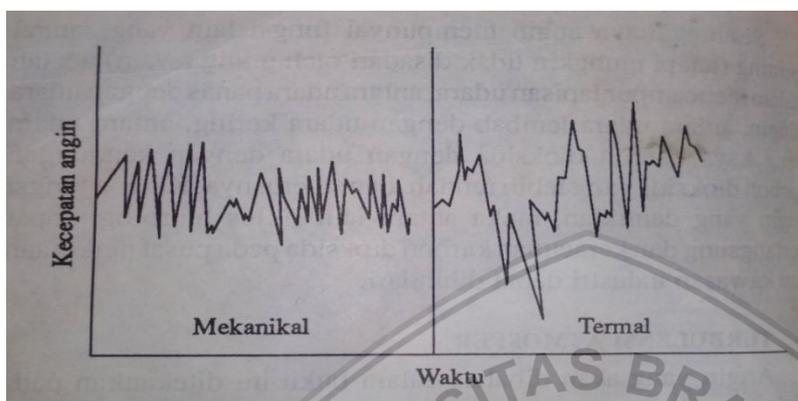
Semakin tinggi tempat, semakin kencang pula angin yang bertiup, hal ini disebabkan oleh pengaruh gaya gesekan yang menghambat laju udara lebih rendah. Di permukaan bumi, gunung, pohon, dan topografi yang tidak rata lainnya memberikan gaya gesekan yang besar. Sedangkan semakin tinggi suatu tempat, gaya gesekan ini semakin kecil.

3. Faktor Turbulensi

Angin dalam pergerakannya tidak mengikuti garis lurus tetapi akan berkelok-kelok sesuai arah medan yang dilaluinya. Dalam proses pergerakannya kecepatan angin tidak stabil, akan berubah-ubah. Pergerakan angin akan lebih cepat apabila hambatan yang dilaluinya rendah. Fenomena arah dan kecepatan angin berubah-ubah ini disebut turbulensi.

Turbulensi yang disebabkan oleh kekasaran dari permukaan bumi disebut turbulensi mekanik. Turbulensi dapat pula terjadi pada saat udara panas pada permukaan bergerak keatas secara vertikal, karena adanya hambatan dari lapisan udara di atasnya. Turbulensi

yang disebabkan perbedaan temperatur lapisan atmosfer ini disebut turbulensi termal atau turbulensi konvektif. Turbulensi dapat meningkatkan proses dispersi polutan, walaupun dalam turbulensi mekanik *downwash* dari sumber polusi akan menghasilkan tingkat polutan tinggi di daerah permukaan tanah (Godish, 1991). Fluktuasi kecepatan angin akibat turbulensi mekanis dan turbulensi termal dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 : Fluktuasi kecepatan angin akibat turbulensi mekanis dan turbulensi termal
Sumber : Lakitan (1994, p.154).

2.9 Klimatologi dan Meteorologi

Sebenarnya klimatologi itu hanya suatu bagian saja dari ilmu meteorologi. Meteorologi diambil dalam bahasa Yunani yaitu meteor yang berarti benda di langit seperti hidro meteor, optic meteor dan lain lainnya, mencakup juga angin, awan, halilintar, pelangi dan sebagainya. Dalam mempelajari klimatologi terlebih dahulu perlu diketahui definisi dari cuaca dan iklim. Cuaca adalah keadaan atmosfer di suatu tempat pada saat tertentu. Adapun iklim adalah keadaan cuaca atau keseluruhan dari gejala-gejala cuaca di daerah tertentu sepanjang tahun dan dari tahun ketahun. Definisi lainnya iklim adalah keberaturan keadaan untuk periode yang lama, menurut peraturan Internasional paling sedikit 30 Tahun.

Masih ada dua pengertian lain yang perlu diperhatikan yaitu faktor iklim dan unsur iklim. Iklim suatu tempat dipengaruhi oleh unsur iklim seperti temperatur, lengas udara (kandungan uap air), curah hujan, kecepatan angin, lama penyinaran matahari, dan sebagainya. Sedangkan faktor iklim yaitu penyebab yang menentukan corak iklim, seperti misalnya posisi garis lintang, arah angin, jarak dari pantai, tinggi rendahnya daerah (relief), tipe tanah, tumbuh tumbuhan atau vegetasi dan sebagainya.

2.9.1 Angin

Massa udara yang bergerak disebut angin. Angin dapat bergerak secara horizontal dan juga dapat bergerak secara vertikal dengan kecepatan yang bervariasi dan berfluktuasi

secara dinamis. Faktor pendorong Bergeraknya massa udara adalah perbedaan tekanan udara dari suatu tempat dengan tekanan tinggi ke tempat yang tekanannya lebih rendah. Semakin tinggi suatu tempat, maka semakin kencang angin yang bertiup, karena pengaruh gaya gesek yang menghambat laju kecepatan angin semakin kecil. Salah satu fungsi angin adalah membantu proses pencampuran udara antara udara yang kaya kandungan sulfur dengan udara yang rendah kandungan sulfur dan yang lainnya.

2.9.2 Tekanan Udara dan Temperatur

Tekanan udara diukur berdasarkan tekanan gaya pada permukaan dengan luas tertentu, misal 1 cm^2 . Satuan yang digunakan adalah atmosfer (atm), millimeter kolom air raksa (mmHg), atau milibar (mbar). Tekanan udara akan berkurang dengan bertambahnya ketinggian tempat (elevasi atau altitude). Tekanan udara umumnya menurun sebesar 11 mbar untuk setiap bertambahnya ketinggian suatu tempat sebesar 100 meter.

Tekanan udara dapat dipengaruhi oleh temperatur. Temperatur akan berpengaruh pada pemuaian dan penyusutan volume udara. Jika udara memuai maka udara menjadi lebih renggang dan akibatnya tekanannya akan menurun. Sebaliknya jika volume udara menyusut, maka kerapatan udara tersebut menjadi lebih tinggi dan akibatnya tekanannya akan meningkat.

2.10 Persamaan Pendekatan Numerik

Persamaan persamaan dasar untuk menganalisa dinamika fluida yaitu, hukum kekekalan massa, momentum dan energi. Persamaan persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Persamaan kontinuitas (kekekalan massa)

Persamaan kontinuitas adalah Persamaan tentang hukum massa fluida sepanjang aliran yang dapat dilihat pada persamaan 2.1 untuk aliran kompresibel dan untuk aliran inkompresibel dapat dilihat pada Persamaan 2.2 Tu et al. (2012).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \dots\dots\dots(2-1)$$

Dan untuk fluida inkompresibel

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(2-2)$$

2. Pesamaan momentum (kekekalan momentum)

Persamaan kekekalan momentum merupakan turunan dari hukum Newton ke-2 $\sum F = ma$. Dan hukum tersebut kemudian di implementasikan pada fluida, agar diperoleh persamaan Navier-Stokes Tu et al. (2012).

Arah x

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2-3)$$

Arah y

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2-4)$$

Arah z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2-5)$$

3. Persamaan energi (kekekalan energi)

Persamaan energi diambil dari hukum pertama termodinamika yaitu hukum tentang kekekalan energi. Laju perubahan energi pada partikel fluida sama dengan laju penambahan panas ke dalam partikel fluida ditambahkan dengan laju kerja yang diberikan pada partikel Tu et al. (2012).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \dots \dots \dots (2-6)$$

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.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \dots \dots \dots (2-7)$$

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.

2.11 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dinamika fluida komputasi, biasanya disingkat sebagai CFD (*Computational Dynamics Fluid*), adalah cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida tersebut. Pada analisis ini komputer digunakan untuk melakukan perhitungan yang

diperlukan untuk mensimulasikan interaksi antara fluida dengan permukaan yang didefinisikan oleh kondisi batas. Untuk melakukan perhitungan dalam CFD diperlukan komputer dengan kecepatan tinggi atau superkomputer, agar hasil analisis yang lebih baik dapat dicapai. Sudah banyak penelitian yang mengembangkan perangkat lunak sehingga akan meningkatkan akurasi dan kecepatan proses simulasi meskipun untuk aliran transonik atau aliran turbulen.

Dasar fundamental dari hampir semua masalah CFD adalah persamaan Navier-Stokes, yang mendefinisikan aliran fluida satu fasa. Untuk aliran yang non-viskositas maka persamaan Navier-Stokes diatas dapat menjadi lebih sederhana yaitu akan menjadi persamaan Euler.

Arah x

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \dots\dots\dots (2-8)$$

Arah y

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \dots\dots\dots (2-9)$$

Arah z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \dots\dots\dots (2-10)$$

2.11.1 Metode Diskritisasi CFD

Yang dimaksud dengan diskritisasi adalah memecah domain atau daerah perhitungan menjadi beberapa daerah – daerah kecil yang disebut dengan grid, mesh, atau cell. Dengan terlebih dahulu menetapkan nilai pada kondisi batas daerah perhitungan (Boundary Condition), maka nilai kecepatan aliran, tekanan, dan temperatur dapat dihitung pada tiap – tiap mesh/cell/grid yang sudah ditetapkan berdasarkan persamaan – persamaan atur sebelumnya.

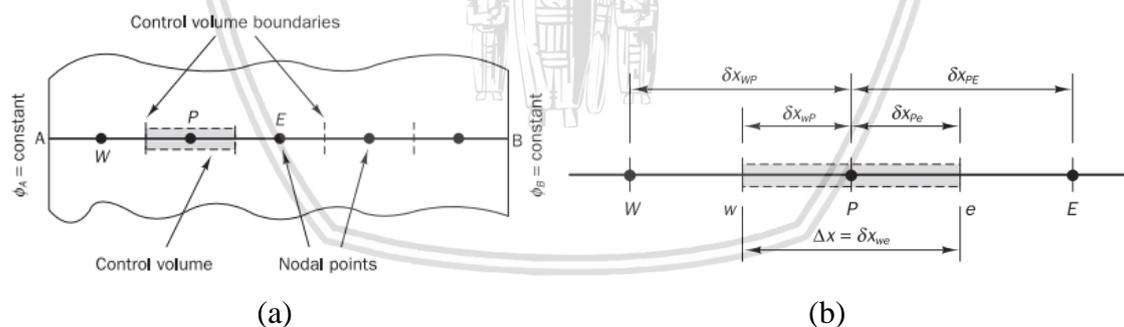
Computational Fluid Dynamic (CFD) sebenarnya merubah persamaan persamaan diferensial parsial seperti persamaan kontinuitas, momentum, dan energi ke persamaan persamaan bentuk aljabar. CFD merupakan pendekatan dari suatu problem yang awalnya bersifat kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) menjadi model yang diskrit (jumlah sel terhingga).

Ada beberapa metode untuk merubah dari persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar yaitu:

- Metode beda hingga (*finite difference method*)
- Metode elemen hingga (*Finite elements method*)
- Metode volume hingga (*finite volume method*)
- Metode elemen batas (*boundary element method*)
- Metode skema resolusi tinggi (*high resolution scheme method*)

Menurut Apsley (2005) metode volume hingga diterapkan pada kasus berupa aliran fluida dan aerodinamika. Metode volume hingga mula-mula dikembangkan dari formulasi *special finite difference*. Metode volume hingga menggunakan bentuk integral dari persamaan umum untuk dilakukan diskretisasi persamaan. Solusi dibagi ke dalam sejumlah *control volume* yang berhingga, dan persamaan umum yang telah didiskretisasi diaplikasikan pada tiap *control volume*. Titik pusat tiap *control volume* merupakan nodal komputasi pada variable yang dihitung.

Pada kasus 1 dimensi (1-D) dapat dilihat pada gambar 2.6, disini kita menempatkan sejumlah titik nodal di ruang antara A dan B. Batas (permukaan) dari volume control diposisikan tengah antara node yang berdekatan. Sehingga setiap node dikelilingi oleh volume control atau sel.

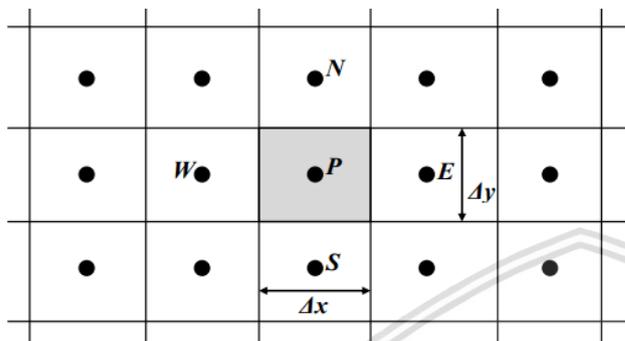


Gambar 2.6 : (a) Pembagian *control volume* 1 dimensi (b) Panjang *control volume*
 Sumber : Versteeg & Malalasekera (1995)

Titik pusat nodal diidentifikasi oleh titik "P". Node sebelah west (kiri) dan east (kanan), masing-masing diidentifikasi oleh W dan E. Bagian sisi barat dari volume kontrol disebut w dan sisi timur volume dikontrol disebut e. Jarak antara simpul W dan P, dan antara simpul P dan E, masing-masing diidentifikasi oleh δx_{WP} dan δx_{PE} . Demikian pula jarak antara permukaan w dan titik P dan antara P dan permukaan e dilambangkan masing-

masing dengan $\delta x_w P$ dan $\delta x_e P$. Gambar 2.6 menunjukkan bahwa lebar volume kontrol adalah $\Delta x = \delta x_{we}$.

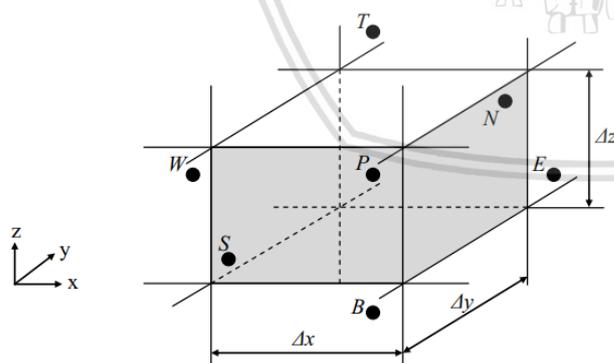
Pada kasus 2 dimensi (2-D), *control volume* yang digunakan untuk pembagian grid seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Nodal yang bersebelahan dengan titik nodal P tidak hanya E dan W , akan tetapi juga mempunyai utara (N) dan selatan (S)



Gambar 2.7 : Gride 2 dimensi

Sumber : Versteeg & Malalasekera (1995)

Sedangkan untuk kasus 3 dimensi (3-D) sebuah *cell* dan nodal yang bersebelahan digambarkan pada Gambar 2.8. Sebuah *cell* berisi titik nodal P yang akan diidentifikasi dan memiliki 6 nodal yang bersebelahan yang diidentifikasi sebagai *west, east, south, north, bottom* dan *top* (W, E, S, N, B, T). Seperti sebelumnya notasi w, e, s, n, b , dan t digunakan untuk mengacu pada permukaan *control volume* sebelah barat, timur, selatan, utara, bawah dan atas



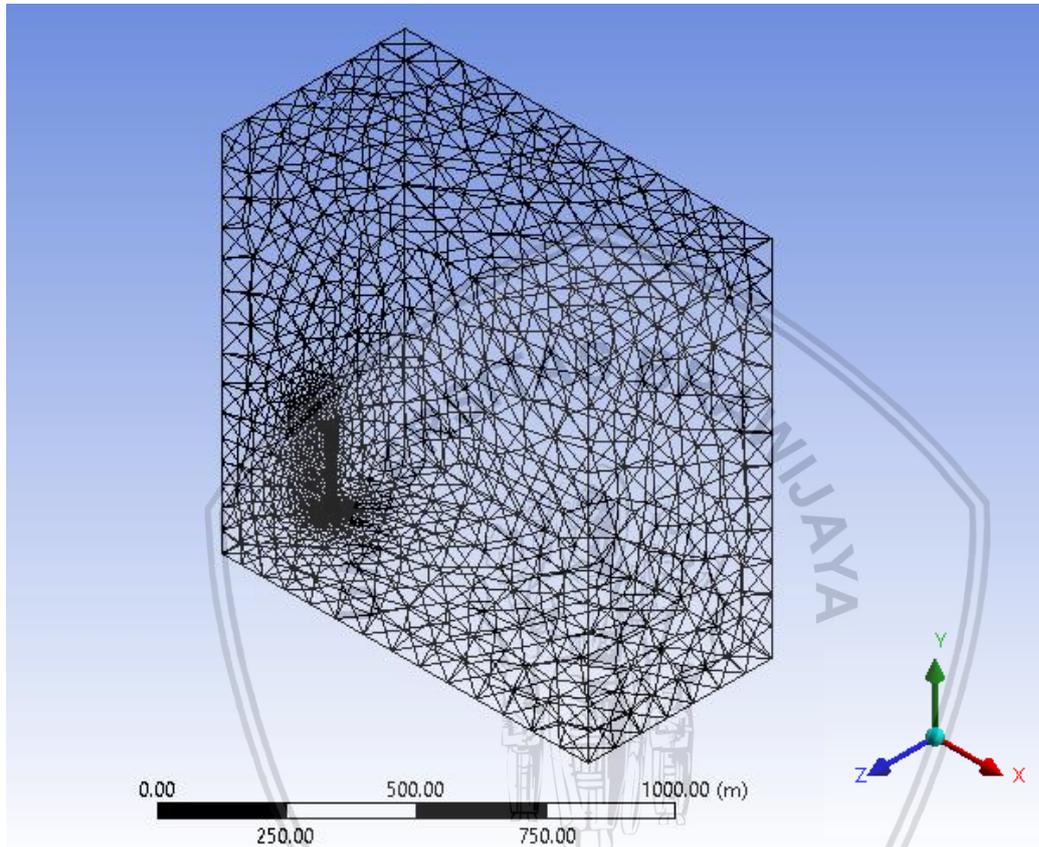
Gambar 2.8 : Gride 3 dimensi

Sumber : Versteeg & Malalasekera (1995)

2.11.2 Geometri dan *Meshing*

Pemodelan pada geometri yang akan di gunakan untuk simulasi adalah geometri berbentuk balok dengan dimensi (x,y,z) dengan panjang (x) 5000 m dengan tinggi (y) 250 m dan lebar (z) 800 m. Arah sumbu x yaitu searah dengan aliran angin (*Downwind*). Dan arah sumbu y yaitu tegak lurus terhadap aliran angin (*crosswind*) yaitu arah vertikal.

Setelah membuat geometri langkah selanjutnya adalah proses *meshing*, geometri tersebut di bagi menjadi grid (*meshing*). Ukuran *meshing* dapat mempengaruhi lamanya waktu proses komputasi. Ukuran *meshing* yang halus hanya di fokuskan pada daerah yang dianggap kritis sehingga perlu keakuratan yang lebih tinggi misalnya daerah sekitar *stack*. Semakin menjauhi *stack* maka grid /*meshing* ukuran menjadi lebih besar.



Gambar 2.9 Ilustrasi grid hasil *meshing* domain dari geometri cerobong

2.11.3 Kondisi Batas

Menentukan kondisi batas dapat diartikan sebagai tahapan memasukan input untuk menentukan skenario aliran fluida gas polutan kedalam geometri dan domain. Input yang dimasukan adalah kecepatan angin, kecepatan aliran gas buang di *stack*, temperatur gas buang, temperatur lingkungan, massa alir gas buang dan lainnya. Semua itu harus dimasukan secara teliti agar hasil perhitungan simulasi dapat berlangsung dengan benar. Fluida ini terdiri dari gas udara, SO_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 , O_2 .

2.12 Hipotesis

Gas buang yang keluar dari boiler memiliki temperatur yang tinggi. Lalu gas buang tersebut melewati suatu instalasi FGD untuk menghilangkan kandungan sulfur pada gas

buang. Prinsip kerja FGD adalah dengan menyemprotkan larutan kapur sehingga larutan kapur akan bereaksi dan mengikat kandungan sulfur di gas buang, sehingga gas buang akan menjadi bersih dari kandungan sulfur. Pada proses FGD temperatur gas buang mengalami penurunan sehingga perlu untuk menaikkan temperatur gas buang. Untuk menaikkan temperatur gas buang dengan cara mengalirkan sebagian gas buang melalui bypass dan diatur massa alirnya menggunakan damper. Semakin besar bukaan damper maka temperatur gas buang akan semakin meningkat. Semakin meningkat temperatur gas buang maka semakin cepat gas buang terdispersi ke lingkungan dan menyebar ke segala arah. Hal ini menyebabkan konsentrasi gas buang akan semakin menurun seiring dengan semakin besarnya bukaan damper.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Keadaan kualitas udara di lingkungan industri ditentukan oleh emisi partikel yang keluar dari cerobong- cerobong asap pabrik. Partikel-partikel tersebut akan menyebar menjauhi cerobong searah angin dan jatuh mengotori area sekitarnya. Luas jangkauan dan kadar pencemaran pada area yang terkena polusi sangatlah bervariasi, bergantung pada laju buangan. Dimensi cerobong, kondisi cuaca, dan topologi area tersebut. Tersedianya informasi awal tentang kemungkinan tercemarnya suatu daerah didekat kawasan industri pada waktu tertentu akan banyak membantu dalamantisipasi akibat negatif yang ditimbulkan oleh gas buang Nauli (2002).

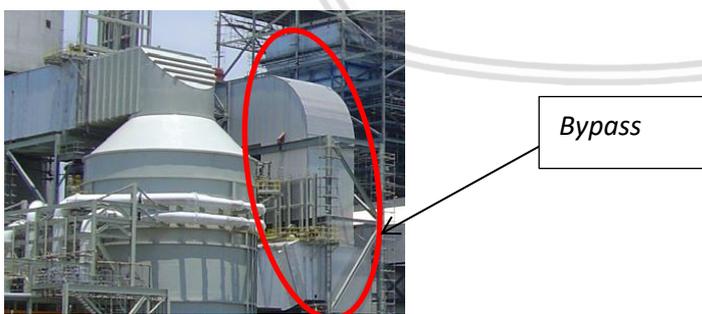
Froelich & Graves (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh memanaskan kembali gas buang sebelum dibuang melalui *stack*, dengan dua alasan utama yaitu untuk mencegah korosi disekitar pembangkit dan yang kedua mengurangi dampak terhadap lingkungan. Karena polutan dan zat korosif masih bisa terlepas dari absorber, gas buang yang mengembun biasanya mengandung sulfur. Bahkan dengan absorber yang paling efisien sekalipun masih belum bisa untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan. Sistem *Stack Gas Reheat* (SGR) dirancang untuk menaikkan temperatur gas buang mengurangi terjadinya pengembunan, yang dapat mengurangi potensi korosif karena sifat zat nya berupa asam.

Efek terhadap lingkungan yang ditimbulkan dari penggunaan *Stack Gas Reheat* ada 3 yaitu: membantu penyebaran gas buang ke lingkungan, menghilangkan terjadinya pengembunan disekitar *stack*, dan pembentukan kepulan di *stack*. Menaikan temperatur gas buang, seperti pada SGR, akan cenderung meningkatkan gas buang menyebar dan mengurangi konsentrasi pencemaran di lingkungan sekitar. Pertimbangan lingkungan kedua adalah tetesan air. Gas buang dapat berupa gas jenuh yang dapat menetes pada area sekitar *stack* yang dapat membentuk tetesan asam yang bisa merusak pasilitas *plant*. Dan pertimbangan terakhir terkait dengan SGR adalah pembentukan kupalan asap yang terlihat pada *stack*. Kepulan yang terlihat tidak memiliki dampak fisik terhadap lingkungan, namun dapat terlihat kurang indah untuk di lihat. Kupalan terbentuk pada saat gas buang bercampur dengan udara ambien yang lebih dingin. Untuk menghilangkan kepulan asap yaitu dengan cara pemanasan ulang atau *Stack Gas Reheater* (SGR).

Simulasi komputer adalah penggunaan model matematika untuk menggambarkan secara realistis perilaku nyata dari sistem dengan mengukur respon dinamik dari variabel-variabel proses yang dipantau, seperti kecepatan, temperatur, tekanan, dan komposisi bahan termasuk didalamnya adalah konsentrasi bahan Niam (2009). *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan program komputer untuk membuat suatu prediksi yang akan terjadi secara kuantitatif pada suatu fluida mengalir. Dengan menggunakan CFD prediksi aliran fluida diberbagai sistem dapat dilakukan dengan biaya yang relatif murah dan waktu yang singkat dibandingkan dengan metode eksperimen Nugraha (2005). CFD adalah suatu ilmu yang mempelajari bagaimana cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena-fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika). Secara istilah CFD bisa berarti suatu teknologi komputasi yang memungkinkan untuk mempelajari dinamika dari benda-benda atau zat-zat yang mengalir Tuakia (2008). Program CFD digunakan untuk membantu mendapatkan visualisasi sebaran gas terdispersi dari hasil perhitungan. CFD dapat mensimulasikan perilaku sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan sifat fisik lainnya.

2.2 *Partial Bypass Duct*

Partial bypass duct seperti pada gambar 2.1 adalah salah satu instalasi saluran gas buang yang dapat digunakan pada saat saat darurat, misalkan terdapat gangguan pada sistem *Flue Gas Desulfurization* yang tidak dapat beroperasi dengan baik, maka gas buang dapat dialirkan kecerobong melalui *partial bypass duct* tersebut.



Gambar 2.1 *Partial Bypass*

Untuk menaikan temperatur gas buang salah satunya dengan cara *partial bypass*, yaitu dengan mengalirkan sebagian gas buang melalui *bypass*. Gas buang yang dialirkan melalui *Bypass* digunakan sebagai pemanas untuk menaikan temperatur gas buang. Dengan demikian terjadi percampuran antara gas buang bertemperatur tinggi dengan gas

buang yang mengalami kondensasi, sehingga temperatur dari gas buang dapat meningkat selanjutnya dialirkan pada *stack*. Untuk mengatur aliran gas buang melalui *bypass* diperlukan sebuah alat *Guillotine Damper* yang dapat kita lihat pada gambar 2.2. Alat ini dapat mengatur laju aliran gas buang sesuai yang di inginkan.



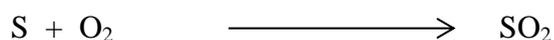
Gambar 2.2 Guillotine Damper

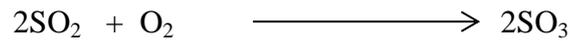
2.3 Sulfur

Batu bara salah satu bahan bakar yang banyak di gunakan pada industri karena harga batubara dapat dikatakan lebih murah dari bahan bakar yang lainnya. Tetapi terdapat kandungan sulfur pada batubara yang dapat berubah menjadi SO_3 pada saat proses pembakaran. Oleh karena itu pemilihan batubara secara seksama dapat dilakukan untuk mengurangi kandungan sulfur pada batubara tersebut.

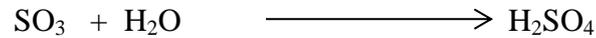
Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor : 21 Tahun 2008 Tanggal : 1 Desember 2008 kadar maksimum Sulfur dioksida (SO_2) yang keluar kelingkungan yang di izinkan adalah $750 \text{ (mg/Nm}^3\text{)}$. Polusi oleh sulfur oksida disebabkan oleh dua komponen gas yang tidak berwarna, yaitu sulfur dioksida (SO_2) dan sulfur trioksida (SO_3), dan keduanya disebut sebagai SO_x . Sulfur dioksida memiliki karakteristik bau yang tajam dan tidak terbakar di udara, sedangkan sulfur trioksida merupakan komponen yang tidak reaktif.

Mekanisme pembentukan SO_x dapat dituliskan dalam 2 tahap reaksi sebagai berikut:





Adanya SO_3 diudara dalam bentuk gas hanya mungkin jika konsentrasi uap air sangat rendah. Jika uap air terdapat dalam jumlah cukup seperti biasanya, SO_3 dan air akan segera bereaksi membentuk tetesan asam sulfat (H_2SO_4) dengan reaksi sebagai berikut:



Pengaruh SO_x terhadap bahan logam dapat mempercepat terjadinya korosif yang disebabkan SO_3 yang bereaksi dengan uap air di atmosfer.

2.4 Flue Gas Desulfurization

Gas buang hasil pembakaran batu bara pada boiler masih terdapat kandungan sulfur yang tinggi yang dapat berbahaya terhadap lingkungan. Gas buang sebelum dialirkan ke udara harus memenuhi kandungan maksimal sulfur didalam gas buang. Untuk mengurangi kandungan sulfur pada gas buang diperlukan suatu alat untuk menyerap sulfur pada gas buang yaitu *Flue Gas Desulfurization* (FGD). Untuk melihat bagian bagian dari FGD dapat dilihat pada gambar 2.3.

Gas buang dialirkan ke FGD lalu disemprotkan larutan kalsium karbonat CaCO_3 . Larutan kalsium karbonat akan mengikat kandungan sulfur pada gas buang, sehingga gas buang menjadi lebih bersih. Reaksi yang akan terjadi bila menggunakan larutan kalsium karbonat.



Gambar 2.3 Flue gas desulfurization

2.5 Udara

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan dan dapat berubah-ubah. Komponen

yang konsentrasinya selalu bervariasi adalah air dalam bentuk uap H_2O . Jumlah uap air yang terdapat di udara bervariasi tergantung temperatur dan cuaca.

Komposisi gas yang terdapat pada udara dapat dilihat pada Table 2.1 . Konsentrasi gas dapat dinyatakan dalam persen atau ppm (*part per million*), untuk gas yang konsentrasinya sangat kecil biasanya dinyatakan dalam bentuk ppm.

Tabel 2.1
Komposisi gas di udara

Komponen	Formula	Persen Volume	ppm
Nitrogen	N_2	78,08	780 800
Oksigen	O_2	20,95	209 500
Argon	Ar	0,934	9 340
Karbon dioksida	CO_2	0,0314	314
Neon	Ne	0,00182	18
Helium	He	0,000524	5
Metana	CH_4	0,0002	2
Kripton	Kr	0,000114	1

Sumber : Stoker & Seager (1972)

2.6 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Dimensi dari nilai konduktivitas termal suatu material adalah watt/m.K. Semakin tinggi konduktivitas termal suatu material menunjukkan bahwa material tersebut adalah konduktor panas yang baik, sebaliknya semakin rendah konduktivitas termal suatu material maka material tersebut merupakan material isolator.

Harga tertinggi untuk konduktivitas termal menunjukkan bahwa material adalah konduktor panas yang baik, dan harga terendah untuk konduktivitas termal menunjukkan bahwa material adalah bukan penghantar panas yang baik atau disebut isolator. Konduktivitas termal beberapa material pada temperatur kamar dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2
Konduktivitas termal beberapa bahan umum

BAHAN	K (Watt/m.K)
Udara	0,024
Uap air	2,010
Air	4,200

Sumber: Holman (1984)

Temperatur adalah ukuran energi kinetik dari partikel seperti molekul atau atom dari suatu zat. Pada cairan dan gas, energi kinetik dari partikel terjadi karena adanya gerak translasi gerak getaran dan gerak rotasi . Ketika dua molekul yang memiliki energi kinetik yang berbeda berbenturan, sebagian dari energi kinetik dari molekul yang energinya lebih besar ditransfer ke molekul yang energinya lebih rendah. Sama seperti ketika dua bola elastis dengan massa yang sama tetapi kecepatannya yang berbeda berbenturan, sebagian dari energi kinetik dengan bola kecepatan tinggi ditransfer ke bola yang kecepatannya lebih rendah. Semakin tinggi temperatur, maka semakin cepat molekul bergerak, semakin banyak jumlah molekul yang bertabrakan. Artinya laju perpindahan panas semakin tinggi.

2.7 Stack/ Chimney

Chimney adalah bangunan/menara yang berfungsi untuk mengeluarkan gas buang panas atau asap dari boiler ke atmosfer. Pada dasarnya chimney juga berfungsi sebagai *induced draft* yaitu dengan menggunakan perbedaan tekanan udara antara sisi inlet (yang berada di permukaan tanah) dengan udara di sisi *outlet* (yang berada lebih tinggi di ujung cerobong asap) sehingga udara akan secara natural mengalir dari tekanan yang tinggi ke daerah yang bertekanan lebih rendah.

Penyebaran polutan di udara, terutama dari industri ditentukan oleh tinggi *stack*. Semakin tinggi *stack* yang digunakan, maka semakin jauh jarak penyebaran polutan yang diemisikan (Ruhiat, 2009). Tinggi *stack* minimal 50 m dapat membuat penyebaran gas buang menyebar sangat jauh. Sedangkan untuk industri skala besar tinggi *stack* yang digunakan harus minimal 200 m (Forsdyke, 1970). Pada gambar 2.4 dapat dilihat cerobong pada pembangkit listrik tenaga uap dengan tinggi 239,7 m dari permukaan tanah



Gambar 2.4 Stack / chimney

2.8 Dispersi

Dispersi adalah penyebaran gas buang dari *stack* ke lingkungan. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi dispersi gas ke atmosfer adalah :

1. Faktor temperatur

Temperatur dapat mempengaruhi penyebaran dispersi gas buang dimana apabila temperatur lingkungannya semakin tinggi maka penyebaran gas buang akan semakin meningkat (Hasibuan, 2015).

2. Faktor arah dan kecepatan angin

Salah satu fungsi angin adalah mencampurkan udara antara udara yang kaya dengan kandungan sulfur dengan udara yang rendah kandungan sulfur. Angin yang bergerak secara konstan ke suatu wilayah akan terus menerus terpapar oleh polutan dan konsentrasi polutan pada wilayah tersebut meningkat. Sebaliknya apabila arah anginnya berubah-ubah maka polutan akan menyebar kearah yang lebih luas dan konsentrasi polutan pada wilayah yang terkena dampak akan berkurang (Godish, 1991)

Kecepatan angin dapat mempengaruhi sejauh mana polutan akan bergerak kesuatu wilayah. Angin dapat bergerak secara horizontal dan juga dapat bergerak secara vertikal dengan kecepatan yang bervariasi dan berfluktuasi secara dinamis. Faktor pendorong bergeraknya massa udara adalah perbedaan tekanan udara dari tempat dengan tekanan tinggi ke tempat dengan tekanan yang lebih rendah.

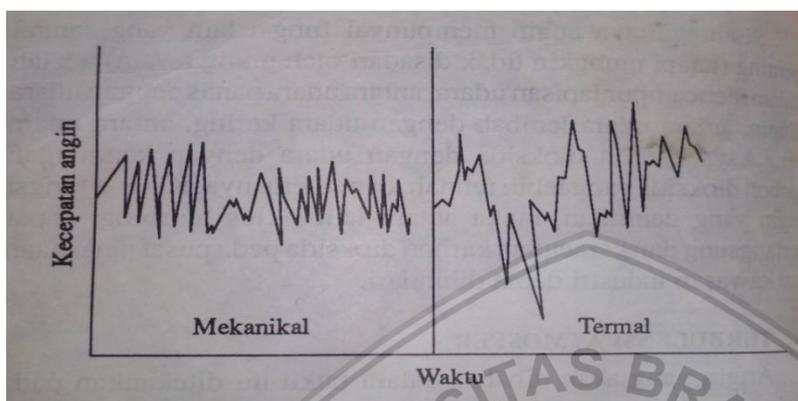
Semakin tinggi tempat, semakin kencang pula angin yang bertiup, hal ini disebabkan oleh pengaruh gaya gesekan yang menghambat laju udara lebih rendah. Di permukaan bumi, gunung, pohon, dan topografi yang tidak rata lainnya memberikan gaya gesekan yang besar. Sedangkan semakin tinggi suatu tempat, gaya gesekan ini semakin kecil.

3. Faktor Turbulensi

Angin dalam pergerakannya tidak mengikuti garis lurus tetapi akan berkelok-kelok sesuai arah medan yang dilaluinya. Dalam proses pergerakannya kecepatan angin tidak stabil, akan berubah-ubah. Pergerakan angin akan lebih cepat apabila hambatan yang dilaluinya rendah. Fenomena arah dan kecepatan angin berubah-ubah ini disebut turbulensi.

Turbulensi yang disebabkan oleh kekasaran dari permukaan bumi disebut turbulensi mekanik. Turbulensi dapat pula terjadi pada saat udara panas pada permukaan bergerak keatas secara vertikal, karena adanya hambatan dari lapisan udara di atasnya. Turbulensi

yang disebabkan perbedaan temperatur lapisan atmosfer ini disebut turbulensi termal atau turbulensi konvektif. Turbulensi dapat meningkatkan proses dispersi polutan, walaupun dalam turbulensi mekanik *downwash* dari sumber polusi akan menghasilkan tingkat polutan tinggi di daerah permukaan tanah (Godish, 1991). Fluktuasi kecepatan angin akibat turbulensi mekanis dan turbulensi termal dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 : Fluktuasi kecepatan angin akibat turbulensi mekanis dan turbulensi termal
Sumber : Lakitan (1994, p.154).

2.9 Klimatologi dan Meteorologi

Sebenarnya klimatologi itu hanya suatu bagian saja dari ilmu meteorologi. Meteorologi diambil dalam bahasa Yunani yaitu meteor yang berarti benda di langit seperti hidro meteor, optic meteor dan lain lainnya, mencakup juga angin, awan, halilintar, pelangi dan sebagainya. Dalam mempelajari klimatologi terlebih dahulu perlu diketahui definisi dari cuaca dan iklim. Cuaca adalah keadaan atmosfer di suatu tempat pada saat tertentu. Adapun iklim adalah keadaan cuaca atau keseluruhan dari gejala-gejala cuaca di daerah tertentu sepanjang tahun dan dari tahun ketahun. Definisi lainnya iklim adalah keberaturan keadaan untuk periode yang lama, menurut peraturan Internasional paling sedikit 30 Tahun.

Masih ada dua pengertian lain yang perlu diperhatikan yaitu faktor iklim dan unsur iklim. Iklim suatu tempat dipengaruhi oleh unsur iklim seperti temperatur, kelembapan udara (kandungan uap air), curah hujan, kecepatan angin, lama penyinaran matahari, dan sebagainya. Sedangkan faktor iklim yaitu penyebab yang menentukan corak iklim, seperti misalnya posisi garis lintang, arah angin, jarak dari pantai, tinggi rendahnya daerah (relief), tipe tanah, tumbuh tumbuhan atau vegetasi dan sebagainya.

2.9.1 Angin

Massa udara yang bergerak disebut angin. Angin dapat bergerak secara horizontal dan juga dapat bergerak secara vertikal dengan kecepatan yang bervariasi dan berfluktuasi

secara dinamis. Faktor pendorong Bergeraknya massa udara adalah perbedaan tekanan udara dari suatu tempat dengan tekanan tinggi ke tempat yang tekanannya lebih rendah. Semakin tinggi suatu tempat, maka semakin kencang angin yang bertiup, karena pengaruh gaya gesek yang menghambat laju kecepatan angin semakin kecil. Salah satu fungsi angin adalah membantu proses pencampuran udara antara udara yang kaya kandungan sulfur dengan udara yang rendah kandungan sulfur dan yang lainnya.

2.9.2 Tekanan Udara dan Temperatur

Tekanan udara diukur berdasarkan tekanan gaya pada permukaan dengan luas tertentu, misal 1 cm^2 . Satuan yang digunakan adalah atmosfer (atm), millimeter kolom air raksa (mmHg), atau milibar (mbar). Tekanan udara akan berkurang dengan bertambahnya ketinggian tempat (elevasi atau altitude). Tekanan udara umumnya menurun sebesar 11 mbar untuk setiap bertambahnya ketinggian suatu tempat sebesar 100 meter.

Tekanan udara dapat dipengaruhi oleh temperatur. Temperatur akan berpengaruh pada pemuaian dan penyusutan volume udara. Jika udara memuai maka udara menjadi lebih renggang dan akibatnya tekanannya akan menurun. Sebaliknya jika volume udara menyusut, maka kerapatan udara tersebut menjadi lebih tinggi dan akibatnya tekanannya akan meningkat.

2.10 Persamaan Pendekatan Numerik

Persamaan persamaan dasar untuk menganalisa dinamika fluida yaitu, hukum kekekalan massa, momentum dan energi. Persamaan persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Persamaan kontinuitas (kekekalan massa)

Persamaan kontinuitas adalah Persamaan tentang hukum massa fluida sepanjang aliran yang dapat dilihat pada persamaan 2.1 untuk aliran kompresibel dan untuk aliran inkompresibel dapat dilihat pada Persamaan 2.2 Tu et al. (2012).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \dots\dots\dots(2-1)$$

Dan untuk fluida inkompresibel

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(2-2)$$

2. Persamaan momentum (kekekalan momentum)

Persamaan kekekalan momentum merupakan turunan dari hukum Newton ke-2 $\sum F = ma$. Dan hukum tersebut kemudian di implementasikan pada fluida, agar diperoleh persamaan Navier-Stokes Tu et al. (2012).

Arah x

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2-3)$$

Arah y

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2-4)$$

Arah z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2-5)$$

3. Persamaan energi (kekekalan energi)

Persamaan energi diambil dari hukum pertama termodinamika yaitu hukum tentang kekekalan energi. Laju perubahan energi pada partikel fluida sama dengan laju penambahan panas ke dalam partikel fluida ditambahkan dengan laju kerja yang diberikan pada partikel Tu et al. (2012).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \dots \dots \dots (2-6)$$

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.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \dots \dots \dots (2-7)$$

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.

2.11 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dinamika fluida komputasi, biasanya disingkat sebagai CFD (*Computational Dynamics Fluid*), adalah cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida

tersebut. Pada analisis ini komputer digunakan untuk melakukan perhitungan yang diperlukan untuk mensimulasikan interaksi antara fluida dengan permukaan yang didefinisikan oleh kondisi batas. Untuk melakukan perhitungan dalam CFD diperlukan komputer dengan kecepatan tinggi atau superkomputer, agar hasil analisis yang lebih baik dapat dicapai. Sudah banyak penelitian yang mengembangkan perangkat lunak sehingga akan meningkatkan akurasi dan kecepatan proses simulasi meskipun untuk aliran transonik atau aliran turbulen.

Dasar fundamental dari hampir semua masalah CFD adalah persamaan Navier-Stokes, yang mendefinisikan aliran fluida satu fasa. Untuk aliran yang non-viskositas maka persamaan Navier-Stokes diatas dapat menjadi lebih sederhana yaitu akan menjadi persamaan Euler.

Arah x

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \dots\dots\dots(2-8)$$

Arah y

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \dots\dots\dots(2-9)$$

Arah z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \dots\dots\dots(2-10)$$

2.11.1 Metode Diskritisasi CFD

Yang dimaksud dengan diskritisasi adalah memecah domain atau daerah perhitungan menjadi beberapa daerah – daerah kecil yang disebut dengan grid, mesh, atau cell. Dengan terlebih dahulu menetapkan nilai pada kondisi batas daerah perhitungan (Boundary Condition), maka nilai kecepatan aliran, tekanan, dan temperatur dapat dihitung pada tiap – tiap mesh/cell/grid yang sudah ditetapkan berdasarkan persamaan – persamaan atur sebelumnya.

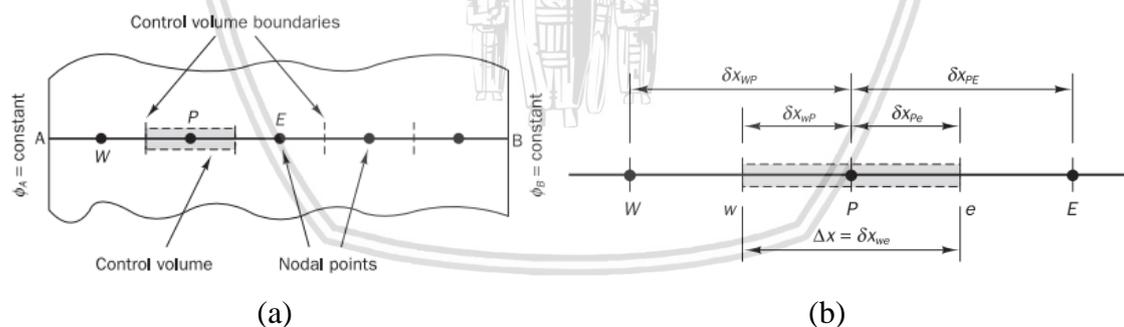
Computational Fluid Dynamic (CFD) sebenarnya merubah persamaan persamaan diferensial parsial seperti persamaan kontinuitas, momentum, dan energi ke persamaan persamaan bentuk aljabar. CFD merupakan pendekatan dari suatu problem yang awalnya bersifat kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) menjadi model yang diskrit (jumlah sel terhingga).

Ada beberapa metode untuk merubah dari persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar yaitu:

- Metode beda hingga (*finite difference method*)
- Metode elemen hingga (*Finite elements method*)
- Metode volume hingga (*finite volume method*)
- Metode elemen batas (*boundary element method*)
- Metode skema resolusi tinggi (*high resolution scheme method*)

Menurut Apsley (2005) metode volume hingga diterapkan pada kasus berupa aliran fluida dan aerodinamika. Metode volume hingga mula-mula dikembangkan dari formulasi *special finite difference*. Metode volume hingga menggunakan bentuk integral dari persamaan umum untuk dilakukan diskretisasi persamaan. Solusi dibagi ke dalam sejumlah *control volume* yang berhingga, dan persamaan umum yang telah didiskretisasi diaplikasikan pada tiap *control volume*. Titik pusat tiap *control volume* merupakan nodal komputasi pada variable yang dihitung.

Pada kasus 1 dimensi (1-D) dapat dilihat pada gambar 2.6, disini kita menempatkan sejumlah titik nodal di ruang antara A dan B. Batas (permukaan) dari volume control diposisikan tengah antara node yang berdekatan. Sehingga setiap node dikelilingi oleh volume control atau sel.

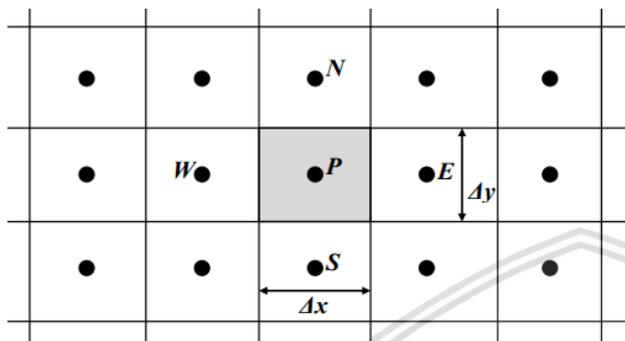


Gambar 2.6 : (a) Pembagian *control volume* 1 dimensi (b) Panjang *control volume*
Sumber : Versteeg & Malalasekera (1995)

Titik pusat nodal diidentifikasi oleh titik "P". Node sebelah west (kiri) dan east (kanan), masing-masing diidentifikasi oleh W dan E. Bagian sisi barat dari volume kontrol disebut w dan sisi timur volume dikontrol disebut e. Jarak antara simpul W dan P, dan antara simpul P dan E, masing-masing diidentifikasi oleh δx_{WP} dan δx_{PE} . Demikian pula jarak antara permukaan w dan titik P dan antara P dan permukaan e dilambangkan masing-

masing dengan $\delta x_w P$ dan $\delta x_e P$. Gambar 2.6 menunjukkan bahwa lebar volume kontrol adalah $\Delta x = \delta x_{we}$.

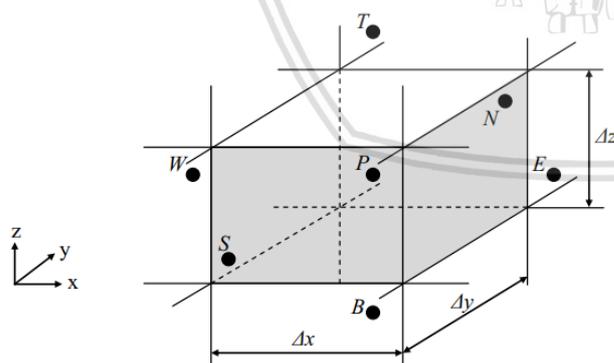
Pada kasus 2 dimensi (2-D), *control volume* yang digunakan untuk pembagian grid seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Nodal yang bersebelahan dengan titik nodal P tidak hanya E dan W , akan tetapi juga mempunyai utara (N) dan selatan (S)



Gambar 2.7 : Gride 2 dimensi

Sumber : Versteeg & Malalasekera (1995)

Sedangkan untuk kasus 3 dimensi (3-D) sebuah *cell* dan nodal yang bersebelahan digambarkan pada Gambar 2.8. Sebuah *cell* berisi titik nodal P yang akan diidentifikasi dan memiliki 6 nodal yang bersebelahan yang diidentifikasi sebagai *west, east, south, north, bottom* dan *top* (W, E, S, N, B, T). Seperti sebelumnya notasi w, e, s, n, b , dan t digunakan untuk mengacu pada permukaan *control volume* sebelah barat, timur, selatan, utara, bawah dan atas



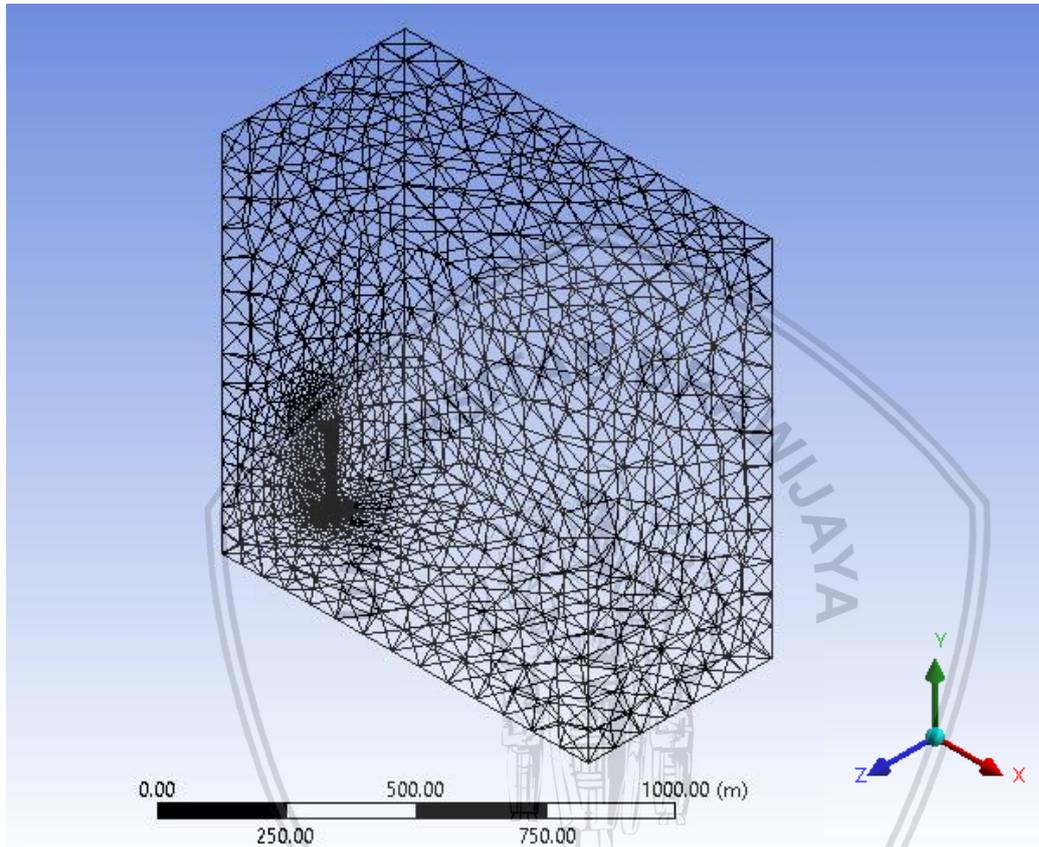
Gambar 2.8 : Gride 3 dimensi

Sumber : Versteeg & Malalasekera (1995)

2.11.2 Geometri dan Meshing

Pemodelan pada geometri yang akan di gunakan untuk simulasi adalah geometri berbentuk balok dengan dimensi (x,y,z) dengan panjang (x) 5000 m dengan tinggi (y) 250 m dan lebar (z) 800 m. Arah sumbu x yaitu searah dengan aliran angin (*Downwind*). Dan arah sumbu y yaitu tegak lurus terhadap aliran angin (*crosswind*) yaitu arah vertikal.

Setelah membuat geometri langkah selanjutnya adalah proses *meshing*, geometri tersebut di bagi menjadi grid (*meshing*). Ukuran *meshing* dapat mempengaruhi lamanya waktu proses komputasi. Ukuran *meshing* yang halus hanya di fokuskan pada daerah yang dianggap kritis sehingga perlu keakuratan yang lebih tinggi misalnya daerah sekitar *stack*. Semakin menjauhi *stack* maka grid /*meshing* ukuran menjadi lebih besar.



Gambar 2.9 Ilustrasi grid hasil *meshing* domain dari geometri cerobong

2.11.3 Kondisi Batas

Menentukan kondisi batas dapat diartikan sebagai tahapan memasukan input untuk menentukan skenario aliran fluida gas polutan kedalam geometri dan domain. Input yang dimasukan adalah kecepatan angin, kecepatan aliran gas buang di *stack*, temperatur gas buang, temperatur lingkungan, massa alir gas buang dan lainnya. Semua itu harus dimasukan secara teliti agar hasil perhitungan simulasi dapat berlangsung dengan benar. Fluida ini terdiri dari gas udara, SO_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 , O_2 .

2.12 Hipotesis

Gas buang yang keluar dari boiler memiliki temperatur yang tinggi. Lalu gas buang tersebut melewati suatu instalasi FGD untuk menghilangkan kandungan sulfur pada gas

buang. Prinsip kerja FGD adalah dengan menyemprotkan larutan kapur sehingga larutan kapur akan bereaksi dan mengikat kandungan sulfur di gas buang, sehingga gas buang akan menjadi bersih dari kandungan sulfur. Pada proses FGD temperatur gas buang mengalami penurunan sehingga perlu untuk menaikkan temperatur gas buang. Untuk menaikkan temperatur gas buang dengan cara mengalirkan sebagian gas buang melalui bypass dan diatur massa alirnya menggunakan damper. Semakin besar bukaan damper maka temperatur gas buang akan semakin meningkat. Semakin meningkat temperatur gas buang maka semakin cepat gas buang terdispersi ke lingkungan dan menyebar ke segala arah. Hal ini menyebabkan konsentrasi gas buang akan semakin menurun seiring dengan semakin besarnya bukaan damper.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metode yang di gunakan pada penelitian kali ini adalah penelitian eksperimental semu yaitu dengan menggunakan *software* berbasis komputasi dinamika fluida. Pada penelitian kali ini menggunakan *software* Ansys 18.2.

3.2 Variabel Penelitian

Jenis – jenis variable yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variable bebas (*independent variable*) adalah variable yang sebelumnya ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian. Variable bebas yang akan di gunakan kali ini adalah:

- Bukaam *Damper* 0 %, 10 %, 15% (untuk mengatur besarnya massa alir yang dilewatkan untuk menaikkan temperatur gas buang)

2. Variable terikat (*dependent variable*)

Yaitu nilai variabelnya tergantung dari variabel bebas.

- Temperatur gas buang pada bukaam damper 0%, 10%, dan 15% secara berturut 56 °C, 63,4 °C, 71,6 °C
- Konsentrasi sulfur yang di emisikan ke lingkungan pada bukaam damper 0%, 10%, dan 15% secara berturut $157,9 \frac{mg}{m^3}$, $243,58 \frac{mg}{m^3}$, $280,2 \frac{mg}{m^3}$
- Massa jenis
- Dispersi polutan ke lingkungan

3. Variabel terkontrol (*controlled variabel*)

Variabel terkontrol adalah variabel yang ditentukan oleh peneliti, dan nilai variabel ini dikondisikan konstan. Variabel yang dikontrol dalam penelitian ini adalah:

- Dimensi *stack* dengan diameter saluran cerobong 7,9m dan tinggi cerobong 239,7m
- Kecepatan angin sekitar lingkungan 3,16 m/s
- Temperatur sekitar (lingkungan) 28,55 °C

3.3 Alat Bantu Penelitian

Simulasi kali ini akan menggunakan alat bantu berupa perangkat lunak *Software Engineering Fluid Dynamics* (EFD), yaitu *software engineering* yang mampu mensimulasikan dan menganalisis berbagai kasus aliran fluida. *Software* ini juga dapat menggambar geometri dari kasus yang akan disimulasikan, sehingga *software* ini akan mempermudah pengguna (user) dalam memecahkan masalah yang akan di kaji. Karena dalam *software* ini sudah terintegrasi menjadi satu paket antara perangkat untuk membangun penggambaran geometri dan perangkat untuk menganalisa kasus aliran fluida tersebut, sehingga dapat memvisualisasikan distribusi fluida secara numerik.

Selain itu dibutuhkan sebuah komputer untuk menjalankan sebuah program *Software Engineering Fluid Dynamics* (EFD) dengan spesifikasi prosesor i5 dengan RAM 4 GB

3.4 Waktu dan Tempat Penelitian

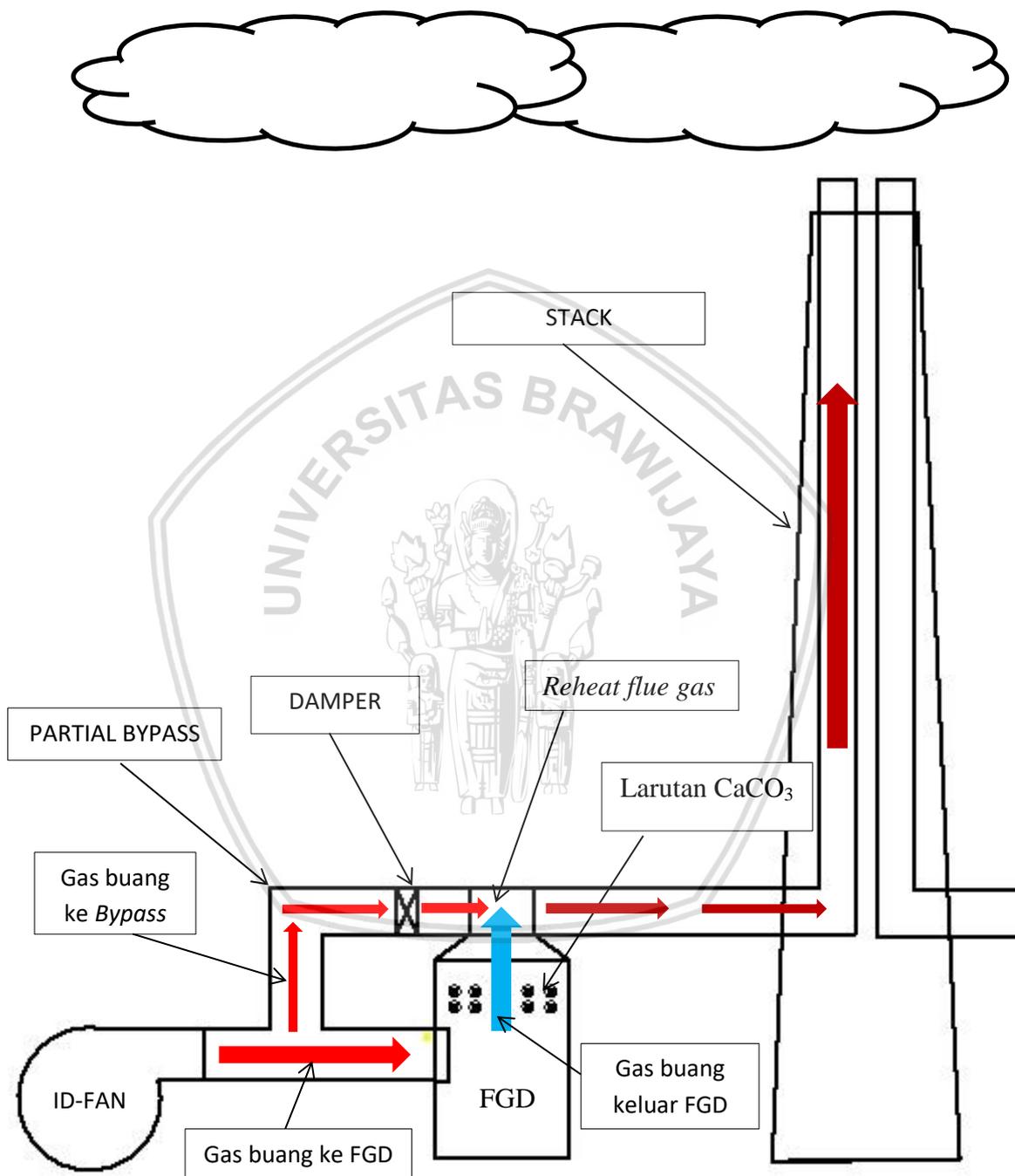
Waktu : Bulan Oktober – Selesai

Tempat : PT. Tanjung Jati B Power Services, Jepara Jawa Tengah



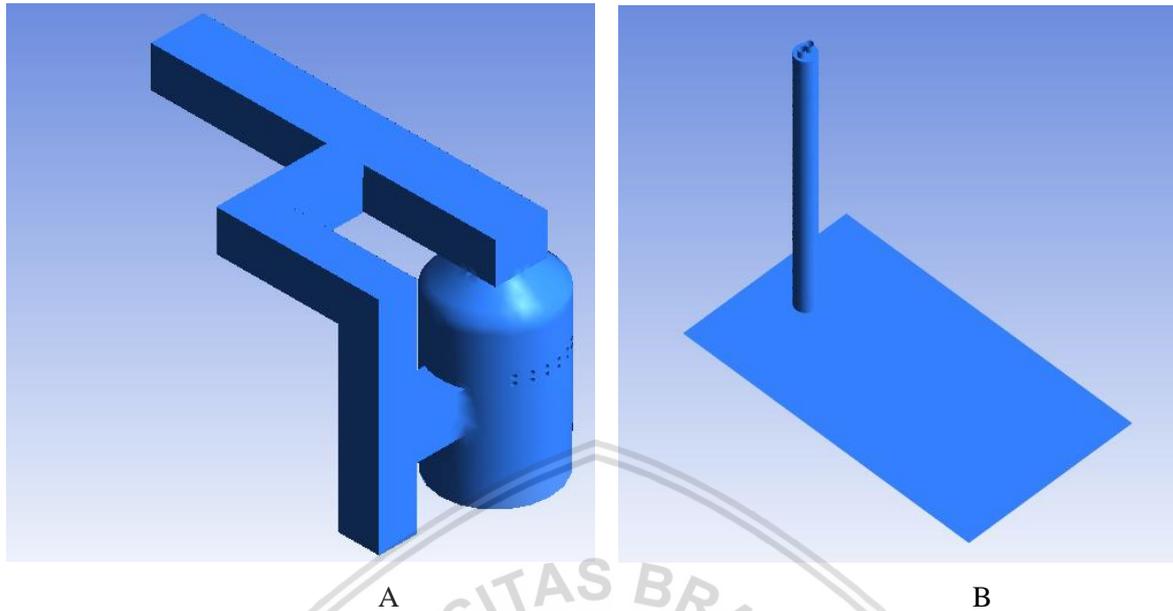
3.5 Model Sistem dan Desain Geometri

1. Model instalasi



Gambar : 3.1 desain skema penelitian

2. Desain Geometri



Gambar 3.2 (a) Desain geometri FGD, Desain Geometri Stack

Table 3.1

Data data desain FGD

No.	Parameter	Data
1	Tinggi FGD	13,5 m
2	Diameter FGD	16,1 m
3	Ketebalan FGD	0,305 m
4	Material	<i>Carbon Steel, Flakeglass Lined</i>

Table 3.2

Data Desain Geometri stack

No.	Parameter	Hasil Pengukuran (m)
1	Tinggi cerobong	239,7
2	Diameter dalam saluran cerobong	7,9
3	Diameter Luar Cerobong bawah	22,8

3.6 Prosedur Penelitian

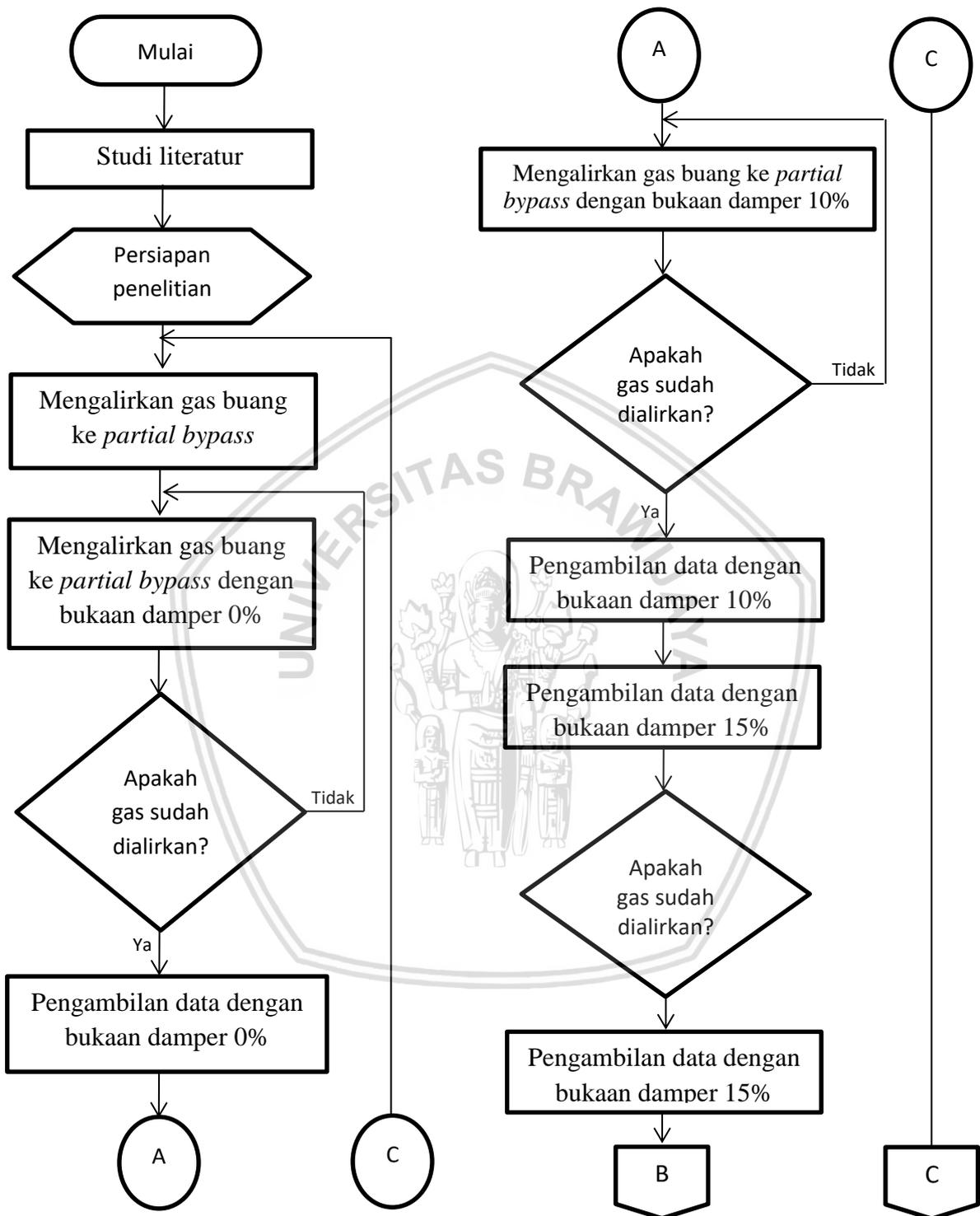
Sebelum pengambilan data dimulai, langkah langkah yang akan dilakukan adalah

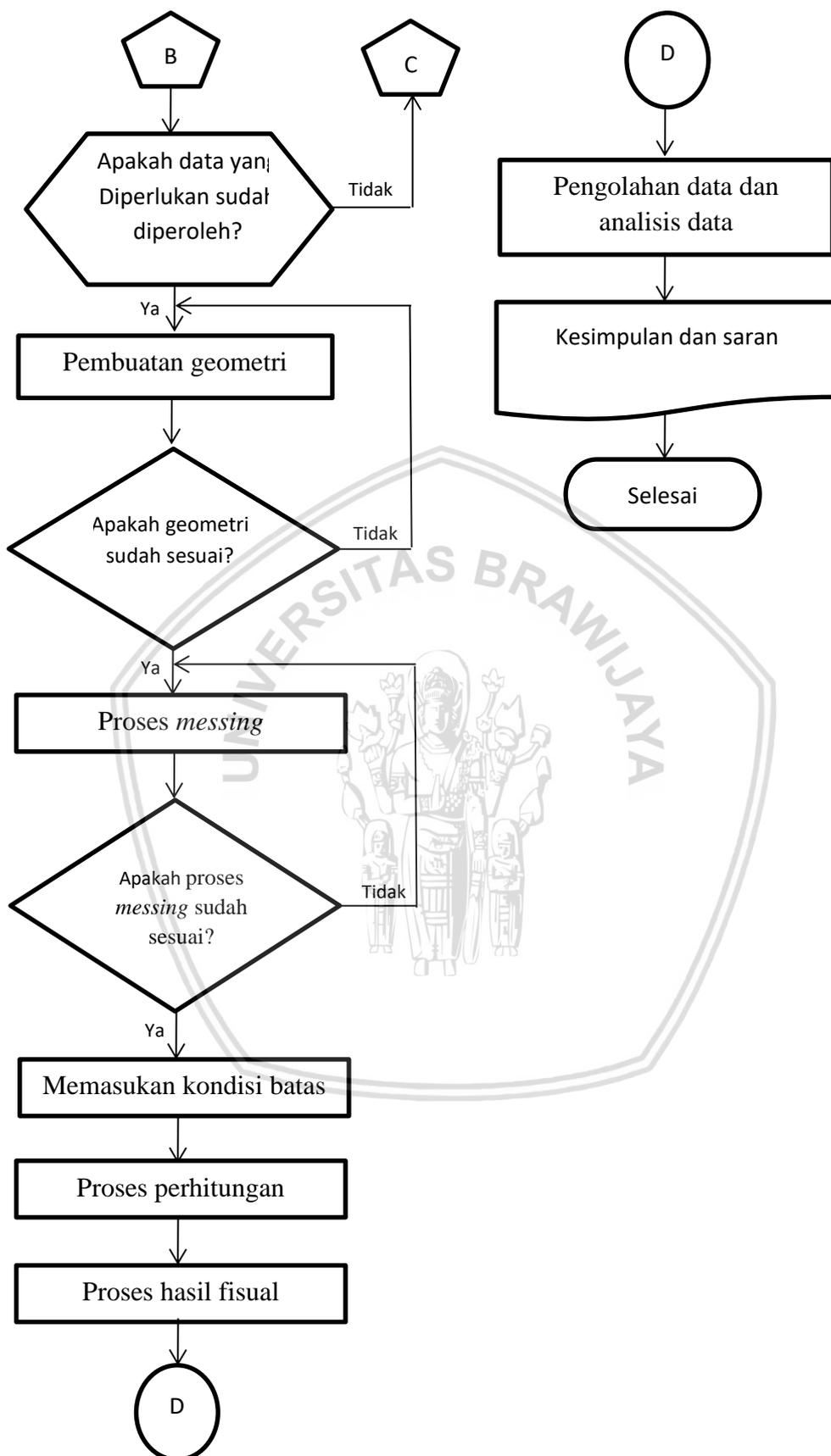
1. Gas buang dialirkan sebagian melalui *partial bypass* dan diatur oleh bukaan damper. Pada penelitian kali ini bukaan damper yang akan digunakan adalah 0%, 10%, 15%.
2. Mendapatkan semua data variabel yang kita butuhkan.

3. Membuat geometri di aplikasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD).
4. Melakukan proses *meshing*
5. Memasukan kondisi batas yang sudah kita tentukan
6. Proses perhitungan atau proses *solver*
7. Mendapatkan hasil visual dari program komputer *Computational Fluid Dynamic* (CFD).



3.7 Diagram Alir Penelitian



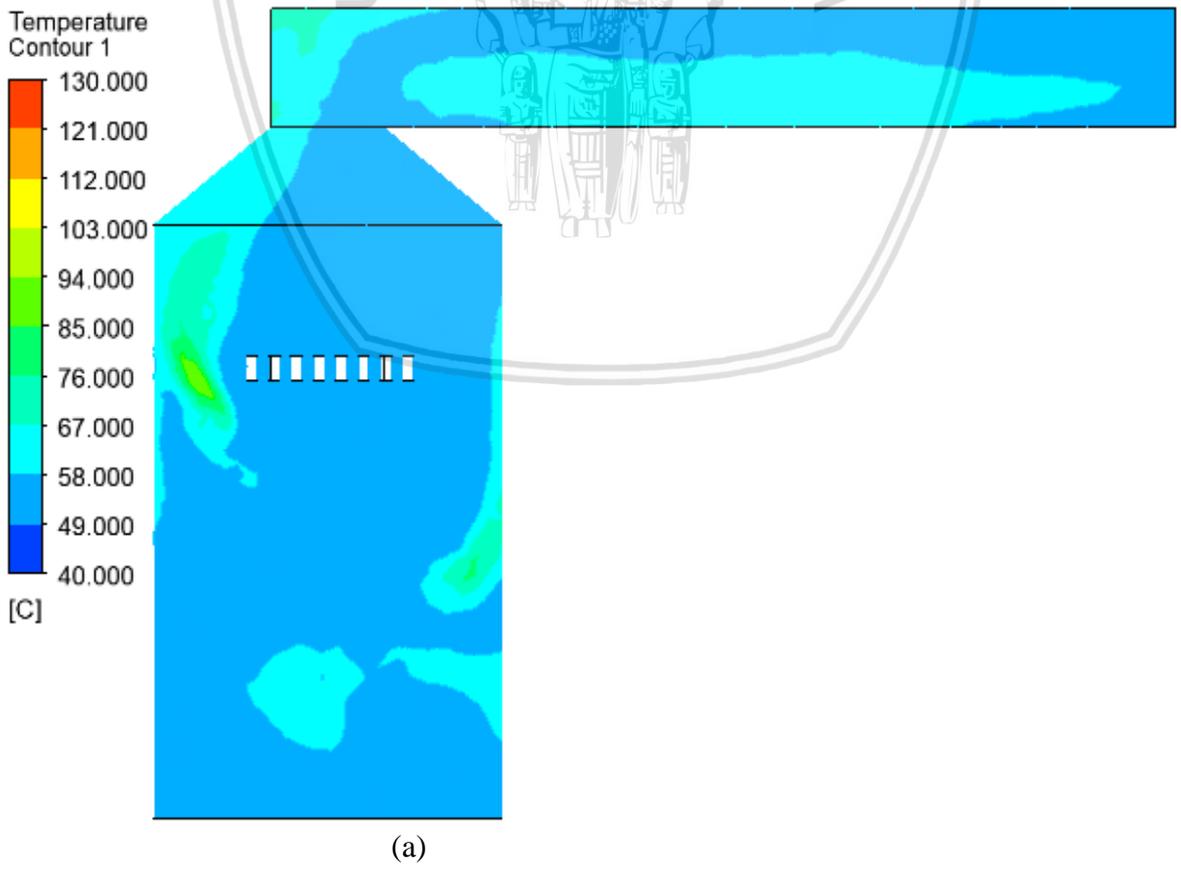


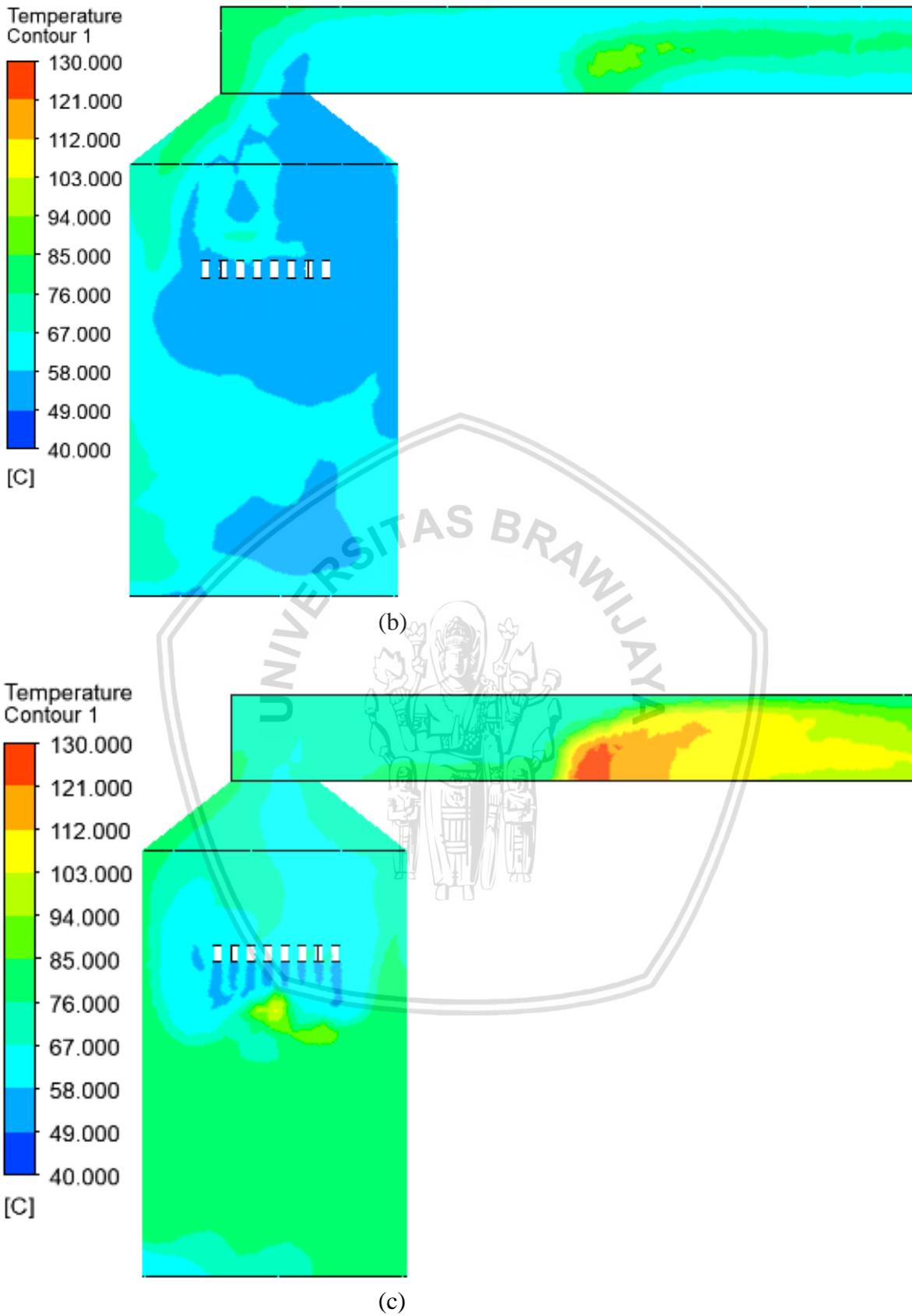
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini data hasil penelitian “Simulasi Analisis Pengaruh *Reheat Flue Gas* Terhadap Dispersi Polutan Ke Lingkungan” berupa gambar visual kontur. Pada penelitian kali ini digunakan metode *computational fluid dynamic* untuk mengetahui distribusi penyebaran gas buang dari stack/cerobong ke lingkungan.

4.1 Distribusi Temperatur

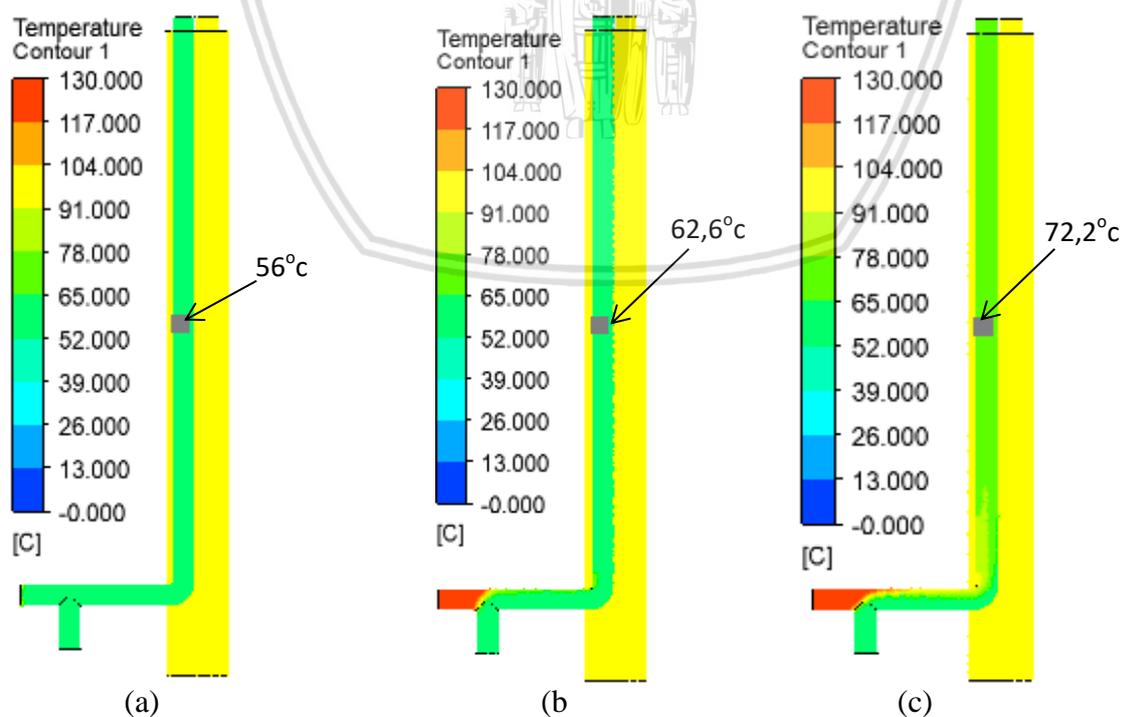
Pada data distribusi temperatur menampilkan distribusi temperatur gas buang mulai dari inlet *flue gas desulfurization* hingga outlet cerobong. Sehingga dapat dilihat perubahan temperatur yang diakibatkan oleh proses *flue gas desulfurization*. Pada gambar 4.1 (a), (b) dan (c) menampilkan efek dari *reheat flue gas* terhadap distribusi temperatur untuk bukaan damper 0%, 10% dan 15%.





Gambar 4.1 Distribusi temperatur pada *flue gas desulfurization* dengan kondisi (a) bukaan damper 0%, (b) bukaan damper 10%, dan (c) bukaan damper 15%

Gambar 4.1 (a) adalah kontur distribusi temperatur pada bukaan damper 0% dimana gas buang seluruhnya masuk ke FGD tanpa ada yang dialirkan melalui *bypass*. Temperatur gas buang yang masuk ke FGD adalah $129,1^{\circ}\text{C}$ dan selama proses di FGD temperatur gas buang mengalami penurunan sehingga temperatur saat keluar FGD menjadi 56°C , seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 (a). Hal ini dikarenakan didalam FGD larutan CaCO_3 dengan temperatur 50°C disemprotkan ke gas buang terjadi perpindahan panas secara konveksi sehingga temperatur gas buang menurun. Agar temperatur gas buang masuk *stack* cukup tinggi maka tidak semua gas buang dimasukan melalui FGD tetapi sebagian dialirkan melalui *bypass* dengan cara membuka damper. Gambar 4.1 (b) menunjukkan distribusi temperatur untuk bukaan damper 10% yang berarti sebagian gas buang dilewatkan melalui *bypass*. Dari gambar 4.1 (b) terlihat temperatur gas buang yang keluar dari FGD lebih tinggi dibandingkan dengan bukaan damper 0% yaitu temperaturnya 61°C . Apabila massa yang di *bypass* lebih besar yaitu dengan bukaan damper 15% maka temperatur gas sebelum masuk ke *stack* semakin tinggi yaitu menjadi 73°C . Hal ini dapat terlihat pada gambar 4.1 (c). Selanjutnya distribusi temperatur gas buang didalam *stack* ditunjukkan pada gambar 4.2 (a), (b), dan (c) untuk kondisi bukaan damper 0%, 10% dan 15%. Sedangkan untuk memelihat perbandingan temperatur gas buang pada cerobong dan simulasi dapat dilihat pada tabel 4.1.



Gambar 4.2 Distribusi temperatur di stack/cerobong (a) pada bukaan damper 0%, (b) pada bukaan damper 10%, dan (c) pada bukaan damper 15%

Tabel 4.1

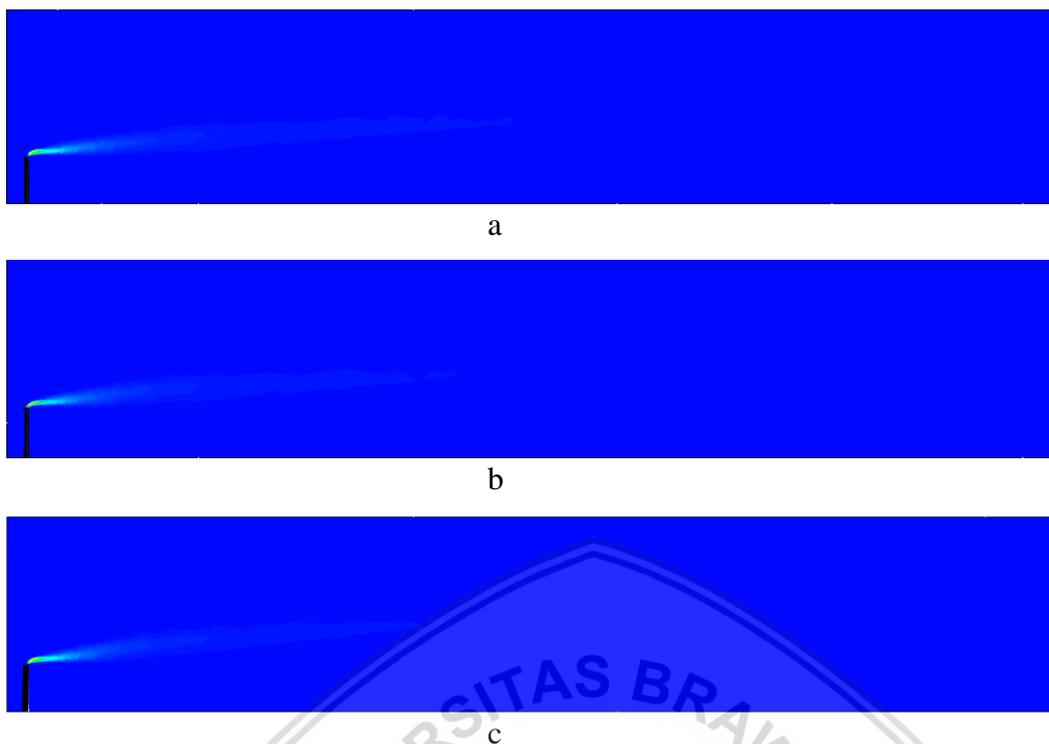
Perbandingan temperatur gas buang pengukuran di cerobong dengan simulasi

Bukaan damper	Temperatur pengukuran di lapangan	Temperature hasil simulasi
0%	56°C	56°C
10%	63,4 °C	62,6 °C
15%	71,6 °C	72,2 °C

Untuk bukaan damper 0% temperatur gas buang yang keluar dari cerobong sebesar 56°C . Hal ini sesuai dengan data hasil pengukuran pada instalasi di lapangan yaitu temperaturnya 56°C. Untuk bukaan damper 10% temperatur gas buang keluar *stack* adalah 62,6 °C . Data hasil simulasi tidak jauh berbeda dengan hasil pengukuran di lapangan yaitu 63,4°C. Sedangkan temperatur gas buang keluar *stack* pada bukaan damper 15% adalah 72,2°C. Data simulasi terjadi perbedaan temperatur yang tidak cukup besar dimana temperatur pada pengukuran di lapangan adalah sebesar 71,6°C . Hal ini dikarenakan pada proses simulasi tidak memperhitungkan proses perpindahan panas dari *stack* ke lingkungan sehingga perpindahan panas ke lingkungan diabaikan. Selanjutnya dilakukan simulasi untuk mengetahui efek penyebaran gas buang ke lingkungan yang diakibatkan oleh bukaan damper tersebut.

4.2 Penyebaran Gas Buang ke Lingkungan

Pada gambar 4.3 menunjukkan gambar *streamline* dispersi gas buang yang ditampilkan dalam bentuk 2D tegak lurus sumbu z. Hal ini bertujuan untuk melihat pengaruh bukaan damper terhadap penyebaran gas buang.

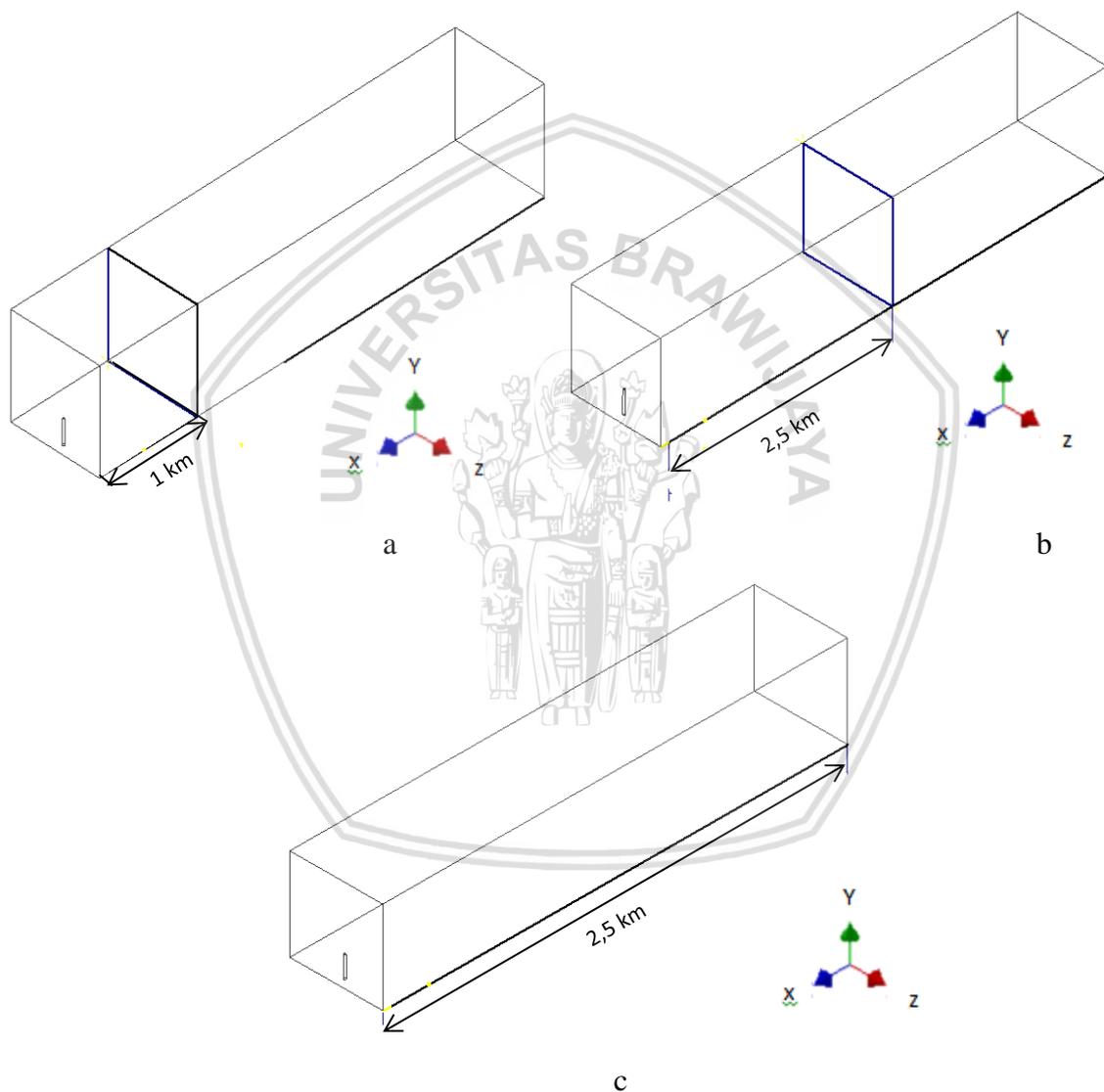


Gambar 4.3 Penyebaran gas buang ke lingkungan (a) pada bukaan damper 0%, (b) pada bukaan damper 10%, dan (c) pada bukaan damper 15 %

Seperti yang sudah dibahas sebelumnya efek bukaan damper mempengaruhi temperatur keluar cerobong. Semakin besar bukaan damper maka temperatur gas buang akan semakin tinggi. Pada gambar diatas terlihat bahwa semakin besar bukaan damper maka gas buang cenderung bergerak keatas yang diakibatkan oleh gaya buoyancy. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur gas buang maka massa jenis gas buang akan semakin rendah. Karena massa jenis gas buang lebih kecil dari pada massa jenis udara disekitarnya maka gas buang cenderung bergerak naik, seperti terlihat pada gambar 4.3 (a), (b), dan (c) untuk bukaan damper 0%, 10%, dan 15%. Untuk bukaan damper 15% gas buang akan lebih cepat bergerak naik dibandingkan dengan bukaan damper 10%. Demikian juga untuk bukaan damper 10% kenaikan lebih cepat dari bukaan damper 0%. Gas buang yang diemisikan ke lingkungan akan menyebar searah dengan arah angin dan akan jatuh kepermukaan tanah. Semakin besar gaya buoyancy maka gas buang akan bergerak semakin tinggi sebelum jatuh ke permukaan tanah sebelum temperaturnya turun. Sehingga dengan bukaan damper yang semakin besar penyebaran gas buang akan semakin luas dan konsentrasi gas buang akan semakin menurun.

Selanjutnya untuk lebih detail gambar dispersi polutan yaitu untuk gas SO_2 , CO_2 , N_2 , dan gas CO , ditampilkan dalam bentuk gambar kontur distribusi konsentrasi dalam dua

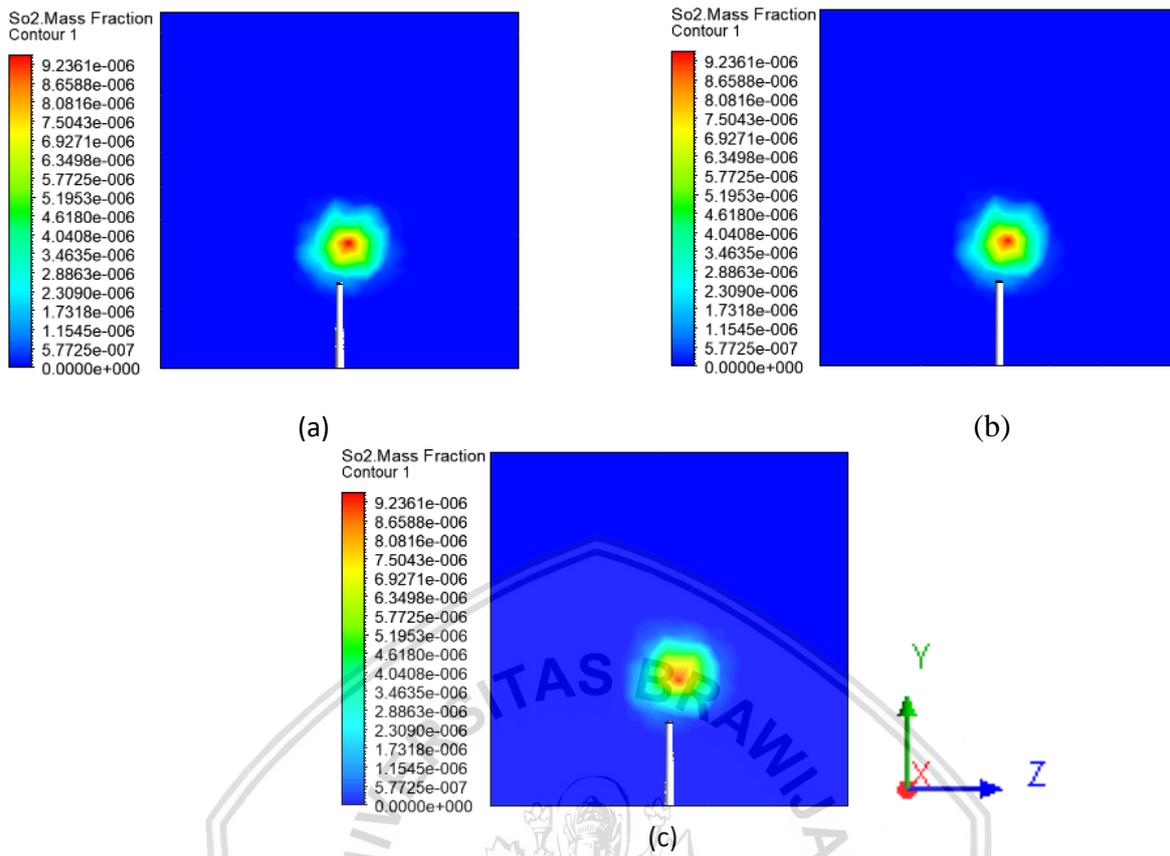
dimensi (2D) tegak lurus sumbu x diambil pada jarak 1 km, 2.5 km dan 5 km dari cerobong seperti yang terlihat pada gambar 4.4. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar konsentrasi gas buang di lingkungan dan pengaruh *reheat flue gas* dalam menurunkan tingkat konsentrasi gas buang dilingkungan. Kontur gas buang akan menampilkan fraksi massa masing masing gas yang terdiri dari gas SO_2 , CO_2 , N_2 , dan gas CO . Konsentrasi masing-masing gas ditampilkan untuk variasi bukaan damper 0%, 10% dan 15%.



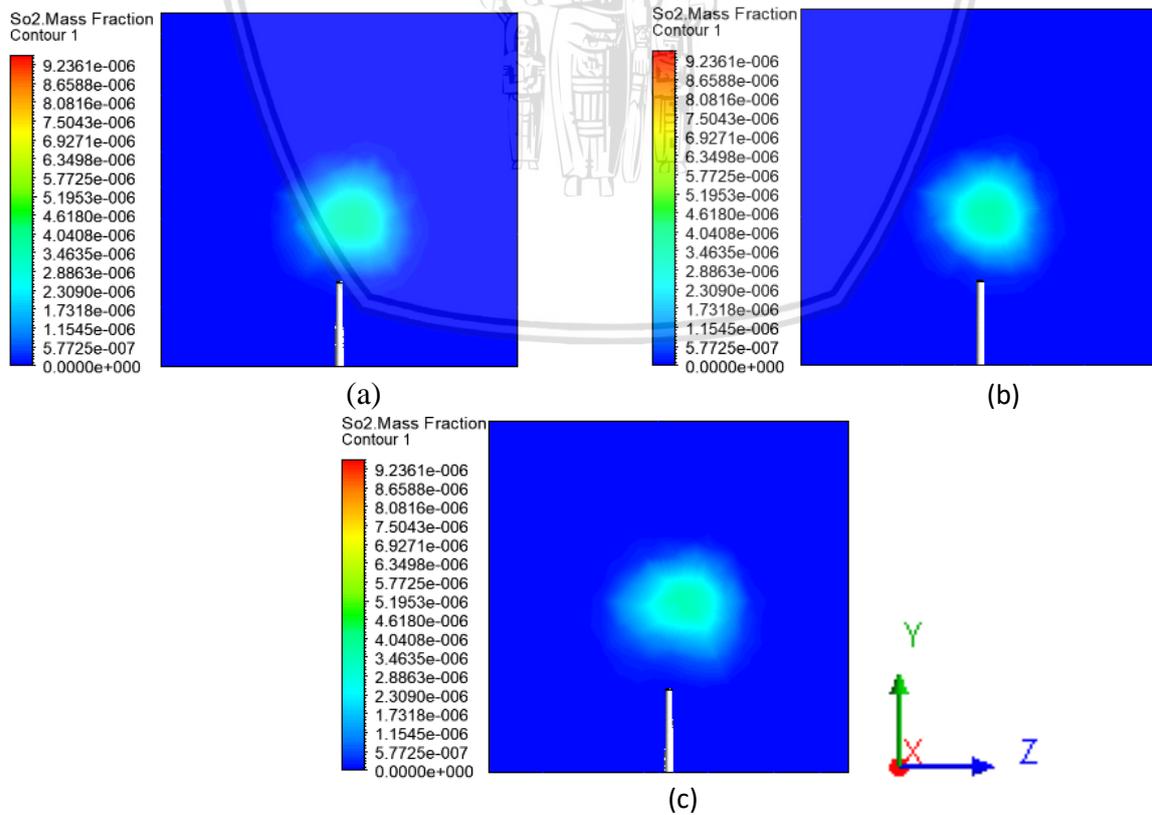
Gambar 4.4 Posisi kontur tegak lurus sumbu x pada jarak (a) 1 km, (b) 2,5 km, dan (c) 5 km

4.2. 1 Dispersi Gas Sulfur Dioksida (SO_2) ke Lingkungan

Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 secara berturut turut menunjukkan distribusi penyebaran gas SO_2 pada jarak 1km, 2.5km dan 5km dari cerobong.

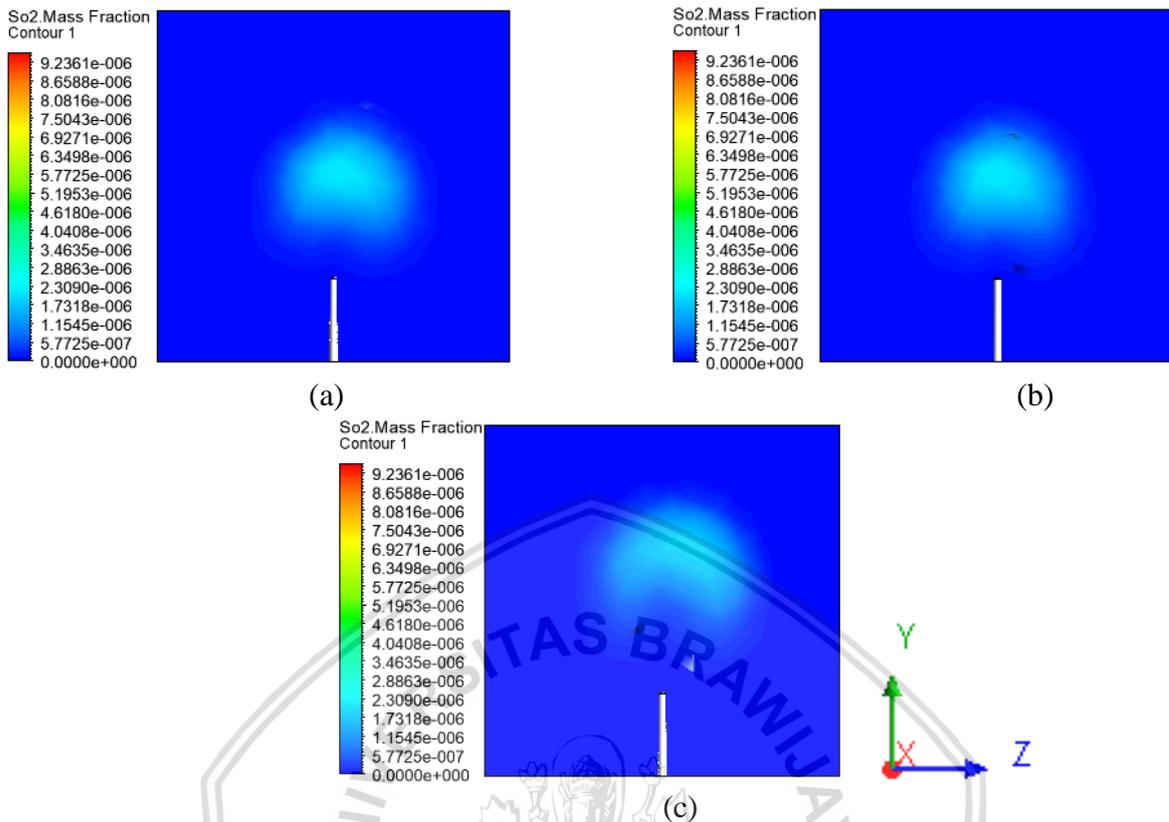


Gambar 4.5 Distribusi konsentrasi SO₂ di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%

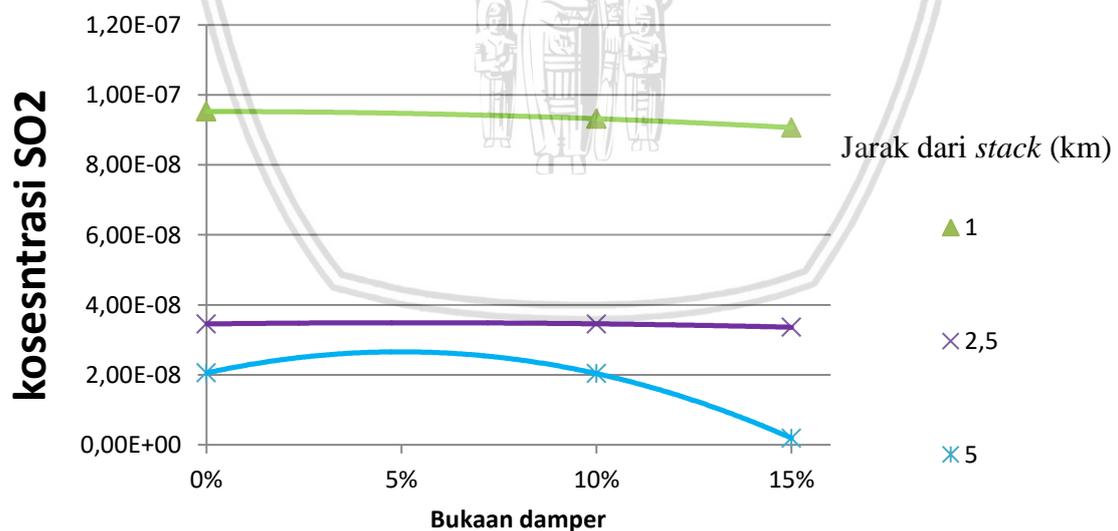


Gambar 4.6 Distribusi konsentrasi SO₂ di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%.





Gambar 4.7 Distribusi konsentrasi SO_2 di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%.



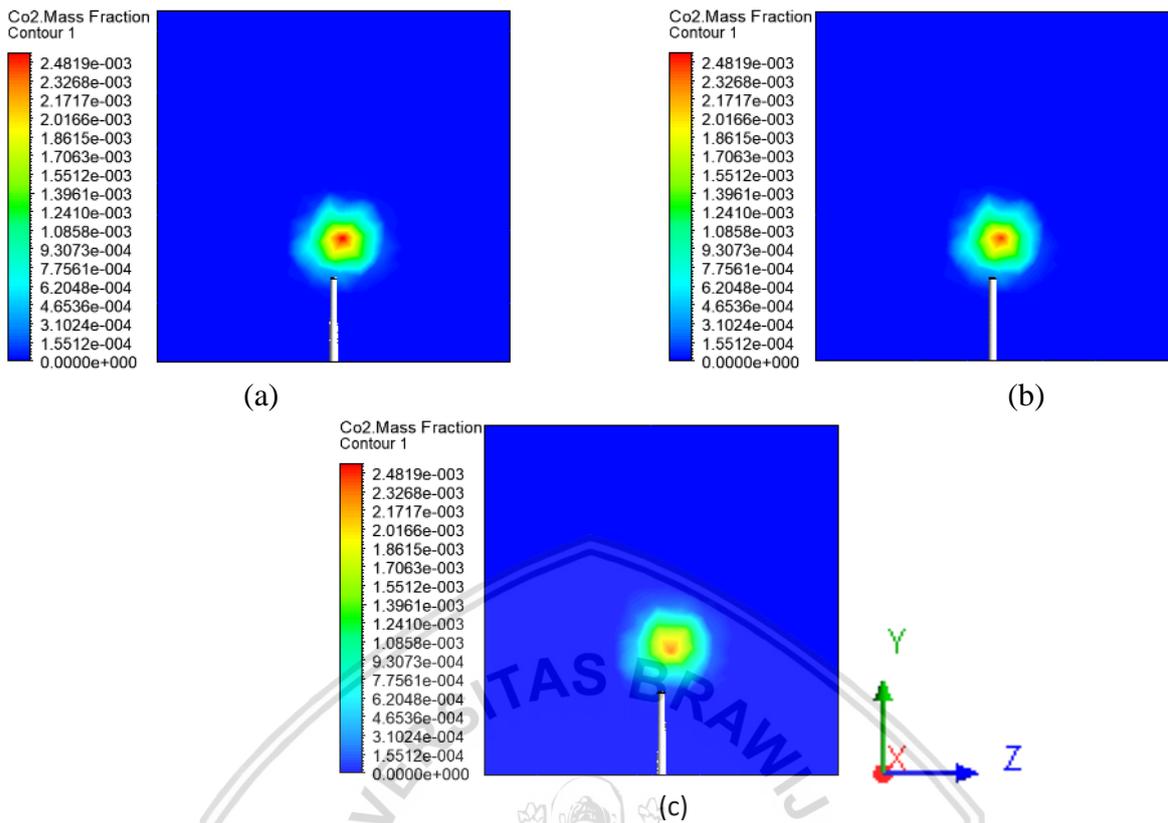
Gambar 4.8 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas SO_2

Seperti pada penjelasan sebelumnya semakin tinggi bukaan damper maka semakin banyak sulfur yang diemisikan ke lingkungan. Karena semakin banyak gas buang yang di *bypass* konsentrasi maksimum SO_2 saat keluar cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% secara berturut-turut adalah $6,60 \cdot 10^{-4}$, $6,79 \cdot 10^{-4}$ dan $7,08 \cdot 10^{-4}$. Akan tetapi

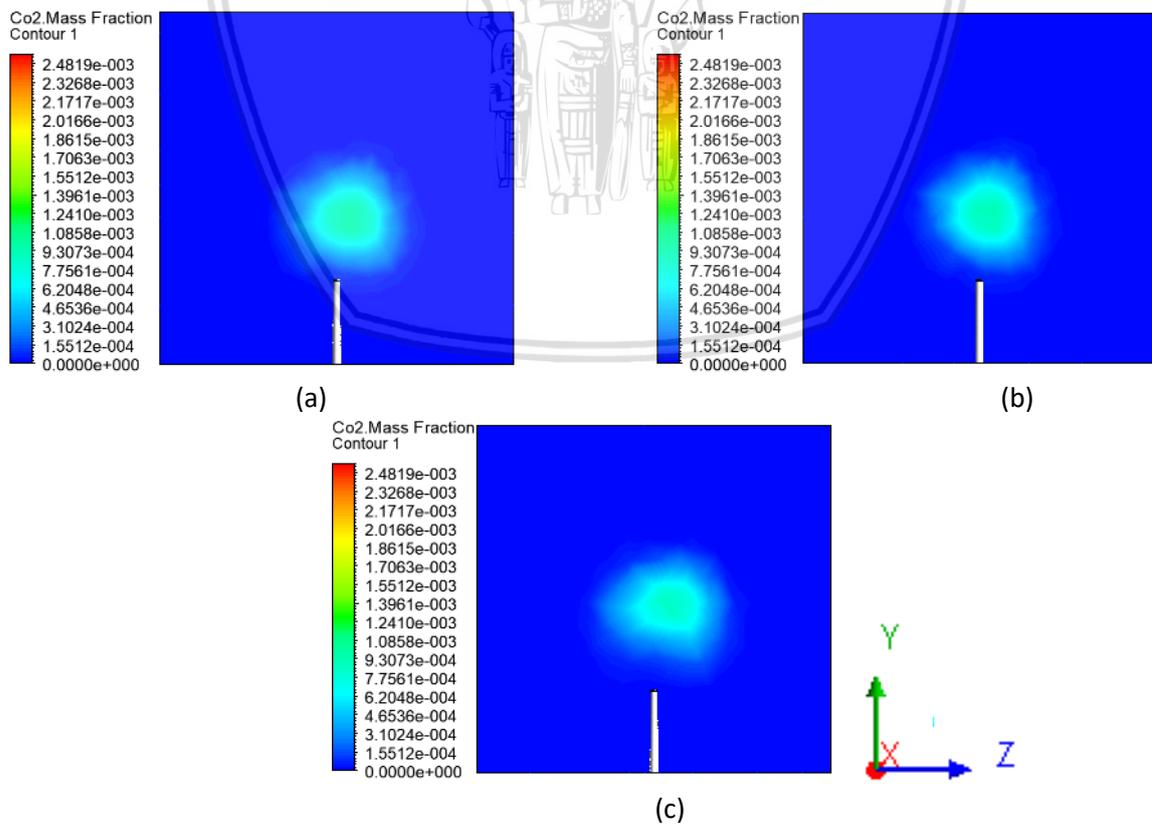
semakin jauh jarak dari cerobong konsentrasi gas SO₂ akan semakin menurun seiring dengan semakin besarnya bukaan damper. Hal ini dipengaruhi oleh semakin besarnya temperature gas buang maka gas SO₂ akan semakin cepat terdifusi ke lingkungan seperti terlihat pada gambar 4.4, 4.5 dan 4.6. Pada gambar terlihat bahwa semakin jauh jarak dari cerobong maka luas area konsentrasi gas SO₂ akan semakin luas menunjukkan bahwa SO₂ menyebar ke udara sekitar secara difusi. Apabila kita bandingkan antara bukaan damper 0%, 10% dan 15% untuk setiap jarak dari cerobong yang sama maka luas area konsentrasi SO₂ dengan bukaan damper 15% lebih luas dibandingkan 10% dan 0%. Demikian juga dengan bukaan damper 10% lebih luas dibandingkan dengan 0%. Ini menunjukkan semakin tinggi temperatur gas buang yang keluar dari cerobong maka gas SO₂ akan semakin cepat terdifusi ke udara sekitar. Semakin cepat gas SO₂ terdifusi ke lingkungan maka konsentrasi gas SO₂ akan semakin menurun. Hal ini dapat dilihat pada data kuantitatif yang ditunjukkan pada gambar 4.8. Dimana semakin besar bukaan damper konsentrasi maksimum SO₂ menurun. Dimana pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% secara berurutan fraksi massa tertinggi adalah $9.52 \cdot 10^{-6}$, $9.3 \cdot 10^{-6}$, $9.06 \cdot 10^{-6}$. Pada jarak 2,5 km dari cerobong dan pada bukaan damper 0%, 10% dan 15% secara berurutan konsentrasi fraksi massa tertinggi gas SO₂ adalah $3.46 \cdot 10^{-6}$, $3.46 \cdot 10^{-6}$, $3.36 \cdot 10^{-6}$. Pada jarak 5 km dari cerobong pada bukaan damper 0%, 10% dan 15% secara berurutan konsentrasi fraksi massa dari gas SO₂ adalah $2.06 \cdot 10^{-6}$, $2.04 \cdot 10^{-6}$, dan $1.93 \cdot 10^{-7}$.

4.2.2 Dispersi Gas Karbon Dioksida (CO₂) Ke Lingkungan

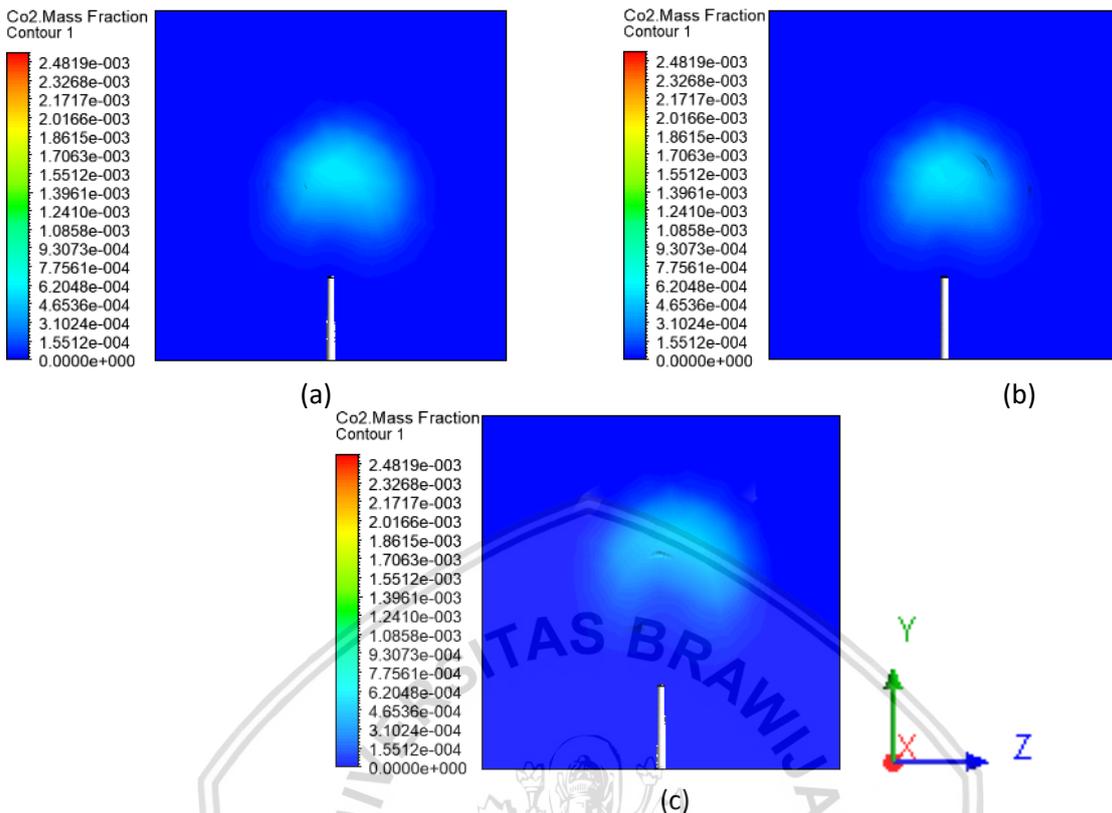
Disperse gas CO₂ ke lingkungan ditampilkan pada gambar 4.8, 4.9, dan 4.10. Pada Gambar 4.8 menunjukkan kontur penyebaran gas CO₂ pada jarak 1 km dari cerobong. Sedangkan gambar 4.9 menunjukkan kontur penyebaran gas CO₂ pada jarak 2,5 km dari cerobong. Gambar 4.10 menunjukkan kontur penyebaran gas CO₂ pada jarak 5 km dari cerobong.



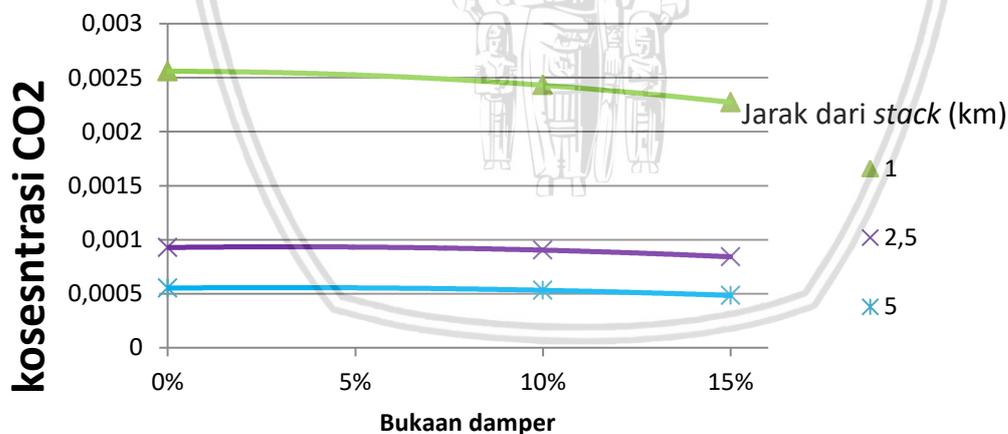
Gambar 4.9 Distribusi konsentrasi CO₂ di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%



Gambar 4.10 Distribusi konsentrasi CO₂ di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%



Gambar 4.11 Distribusi konsentrasi CO₂ di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%



Gambar 4.12 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas CO₂

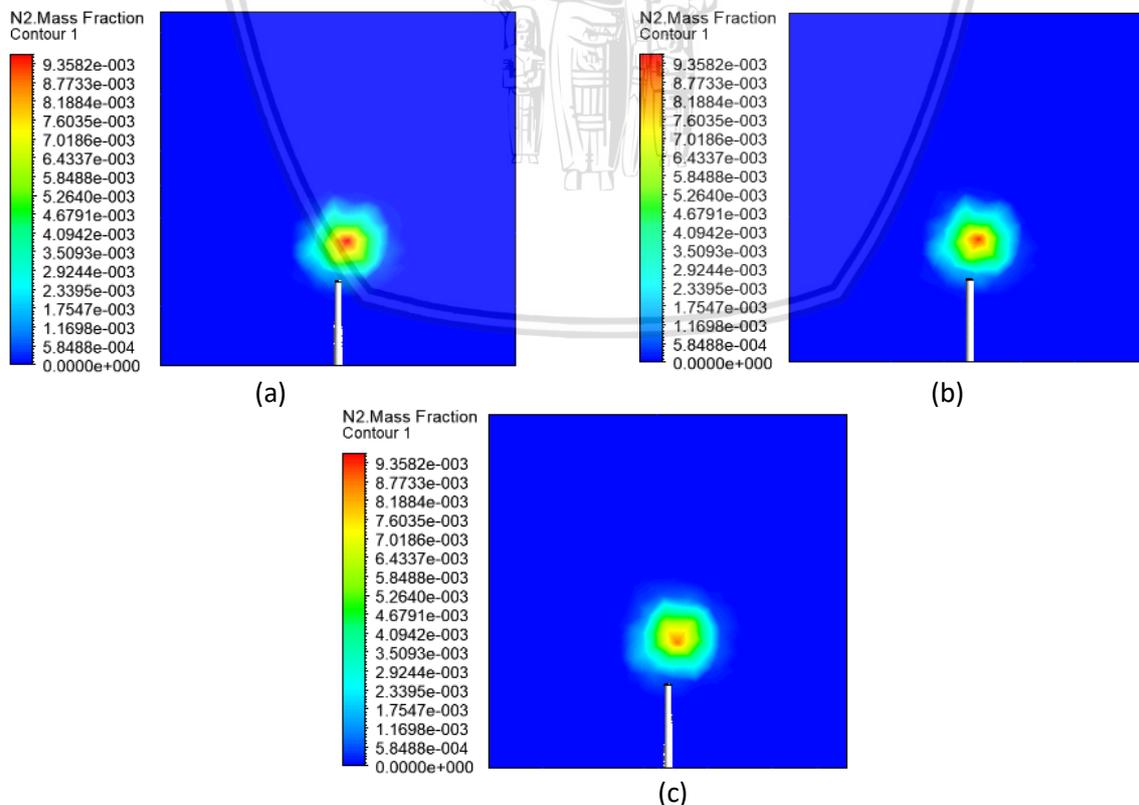
Gambar 4.8, 4.9 dan 4.10 diatas dapat dilihat penyebaran gas CO₂ ke lingkungan dengan jarak 1 km, 2,5 km, dan 5 km. Temperatur mempengaruhi penyebaran gas buang ke lingkungan dimana semakin tinggi temperatur gas buang menyebabkan gas CO₂ akan semakin semakin cepat terdifusi ke lingkungan dan menyebar ke segala arah. Pada gambar tersebut menunjukkan bukaan damper 15% penyebarannya gas CO₂ ke lingkungan lebih luas dibandingkan dengan bukaan damper 10% dan 0%, demikian juga dengan bukaan damper 10% lebih luas area penyebaran gas CO₂ dibandingkan dengan bukaan damper 0%. Hal ini

dikarenakan semakin besar bukaan damper maka temperatur gas buang akan semakin tinggi sehingga gas buang akan semakin cepat terdifusi ke udara sekitar. Semakin cepat gas buang terdifusi maka semakin menurun konsentrasi gas CO₂ di lingkungan. Hal ini dapat dilihat data kuantitatif pada gambar 4.11 yang menunjukkan penurunan konsentrasi yang diakibatkan oleh bukaan damper.

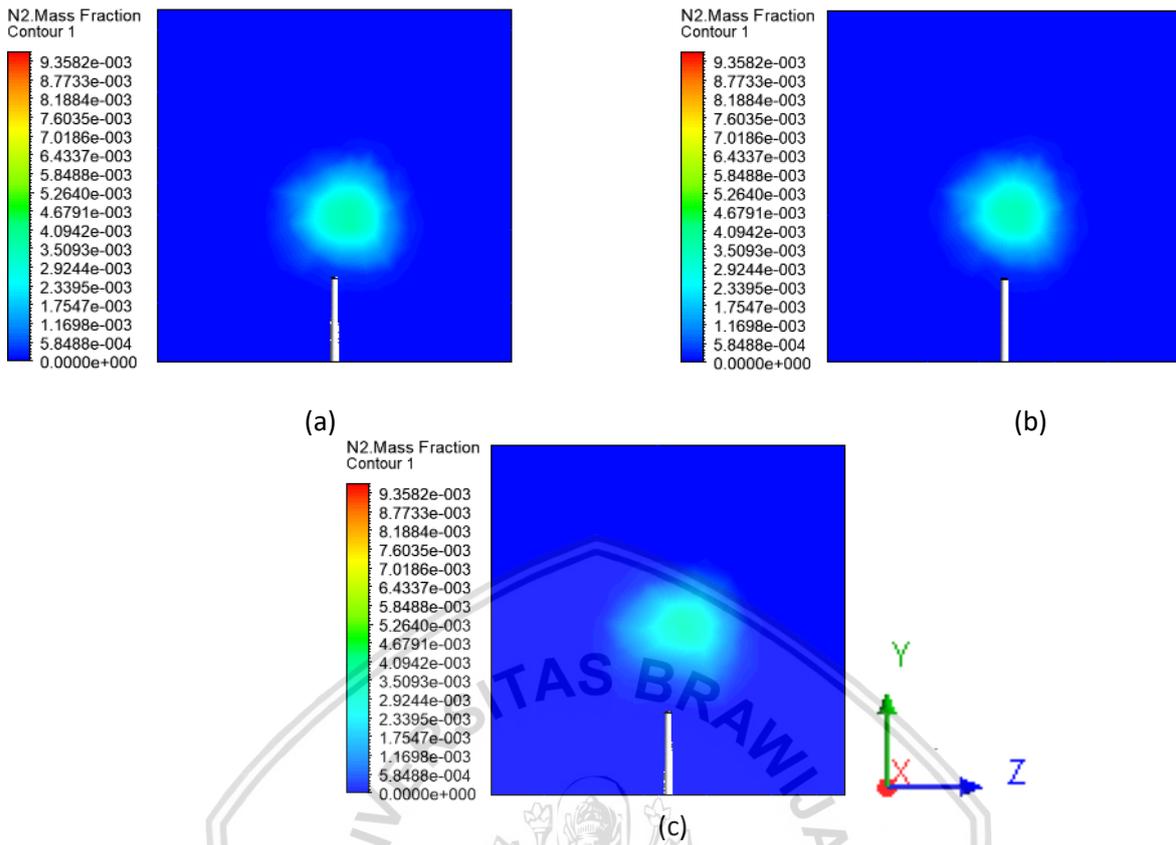
Pada gambar 4.11 grafik menunjukkan pengaruh bukaan damper terhadap konsentrasi gas CO₂ tertinggi di lingkungan. Pada jarak 1km dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10%, 15% konsentrasi fraksi massa CO₂ tertinggi secara berurutan adalah 0,0026, 0,0024, 0,00227. Sedangkan pada jarak 2,5 kilometer dari stack dengan bukaan damper 0%, 10%, dan 15% konsentrasi fraksi massa CO₂ tertinggi secara berurutan adalah $9.3 \cdot 10^{-4}$, $9 \cdot 10^{-4}$, dan $8 \cdot 10^{-4}$. Pada jarak 5 kilometer dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% konsentrasi fraksi massa CO₂ tertinggi secara berurutan adalah $5.53 \cdot 10^{-4}$, $5.3 \cdot 10^{-4}$ dan $4.849 \cdot 10^{-4}$.

4.2.3 Dispersi Gas Nitrogen (N₂) Ke Lingkungan

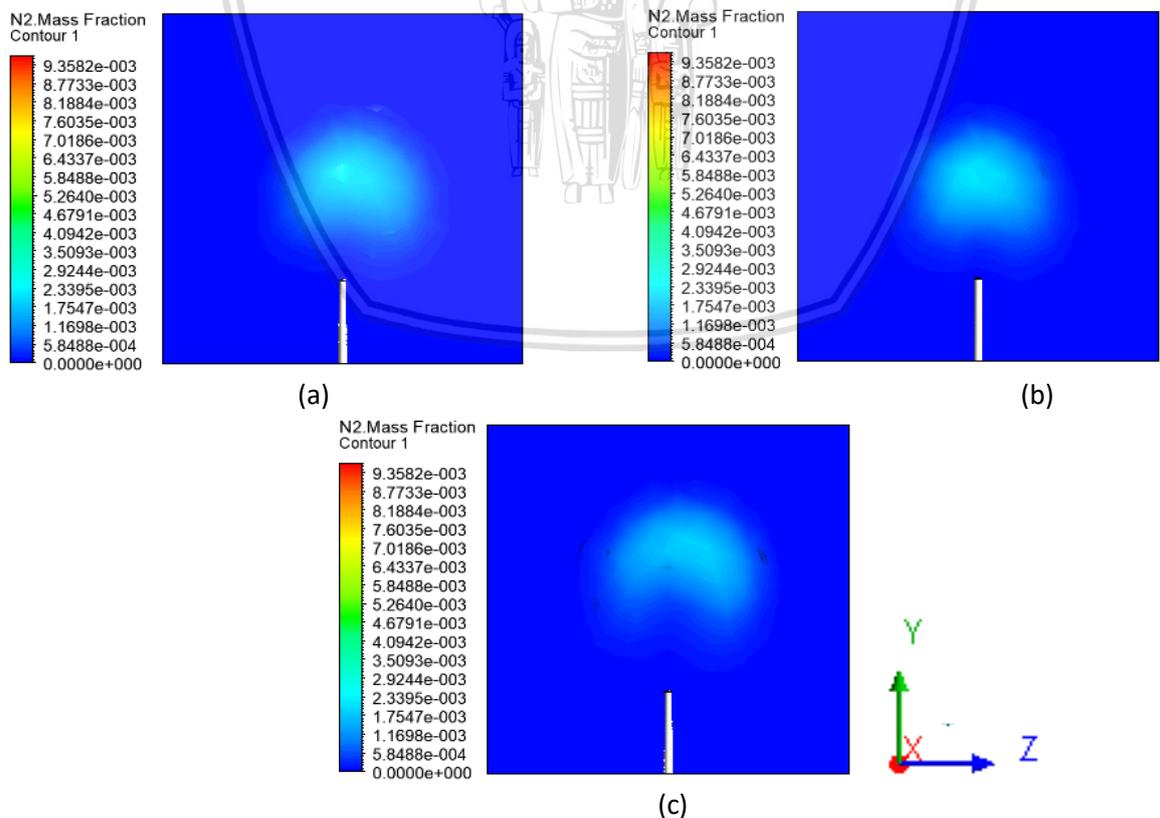
Dispersi gas N₂ ke lingkungan dapat dilihat pada Gambar 4.12, 4.13, dan 4.14 pada jarak 1km, 2,5 km dan 5 km dari cerobong.



Gambar 4.13 Distribusi konsentrasi N₂ di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%

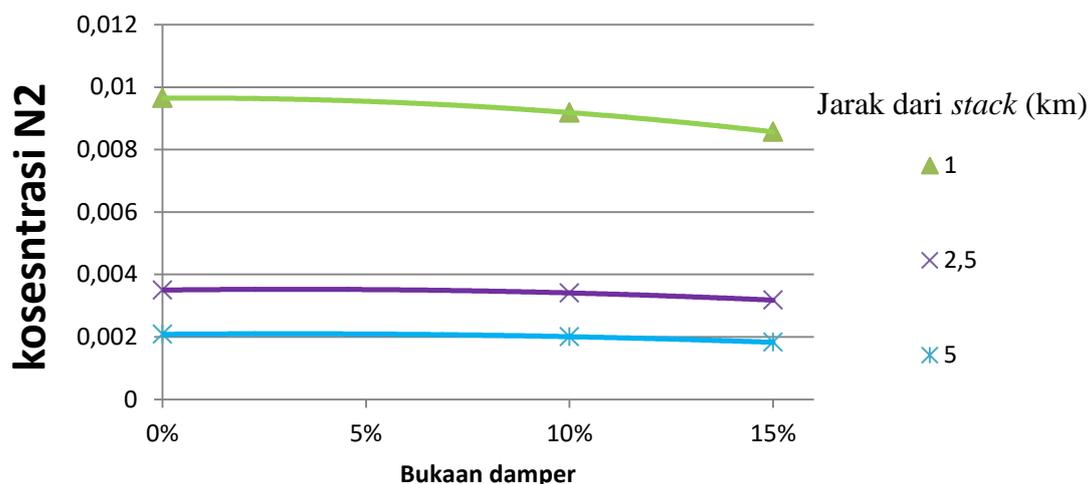


Gambar 4.14 Distribusi konsentrasi N₂ di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%



Gambar 4.15 Distribusi konsentrasi N₂ di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%



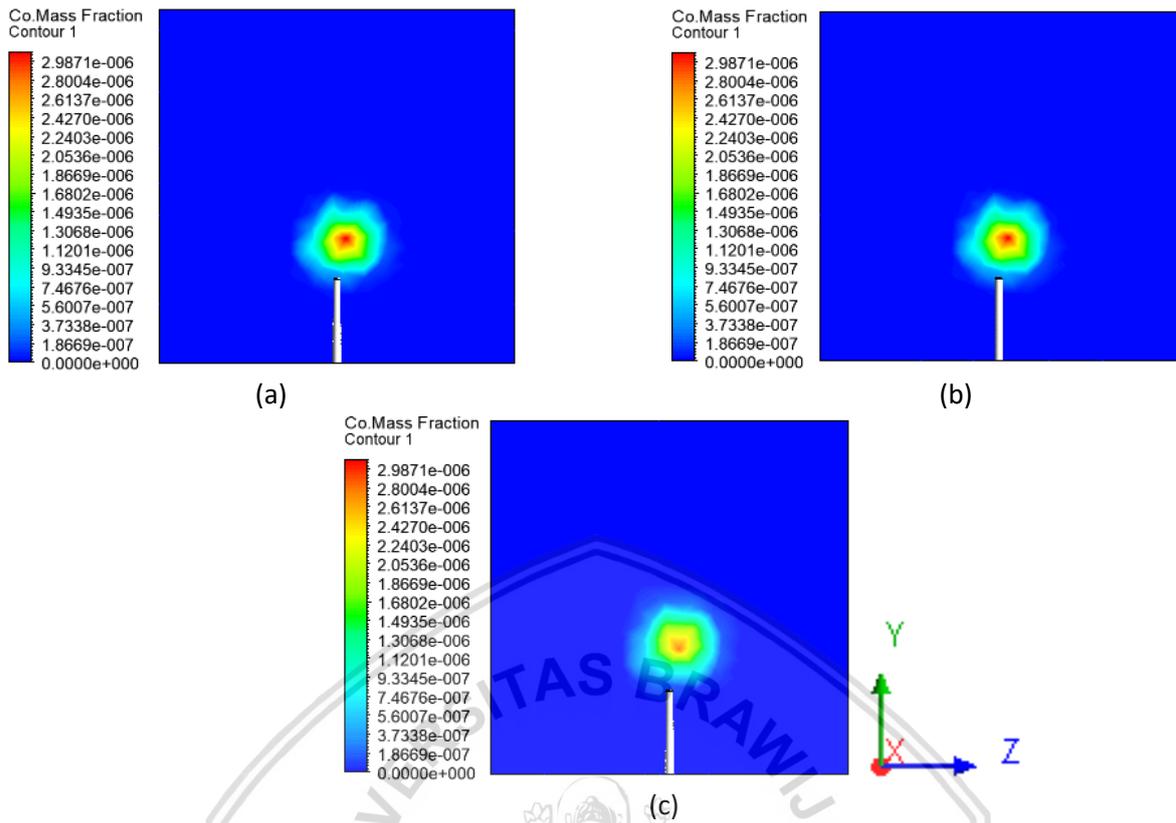


Gambar 4.16 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas N_2

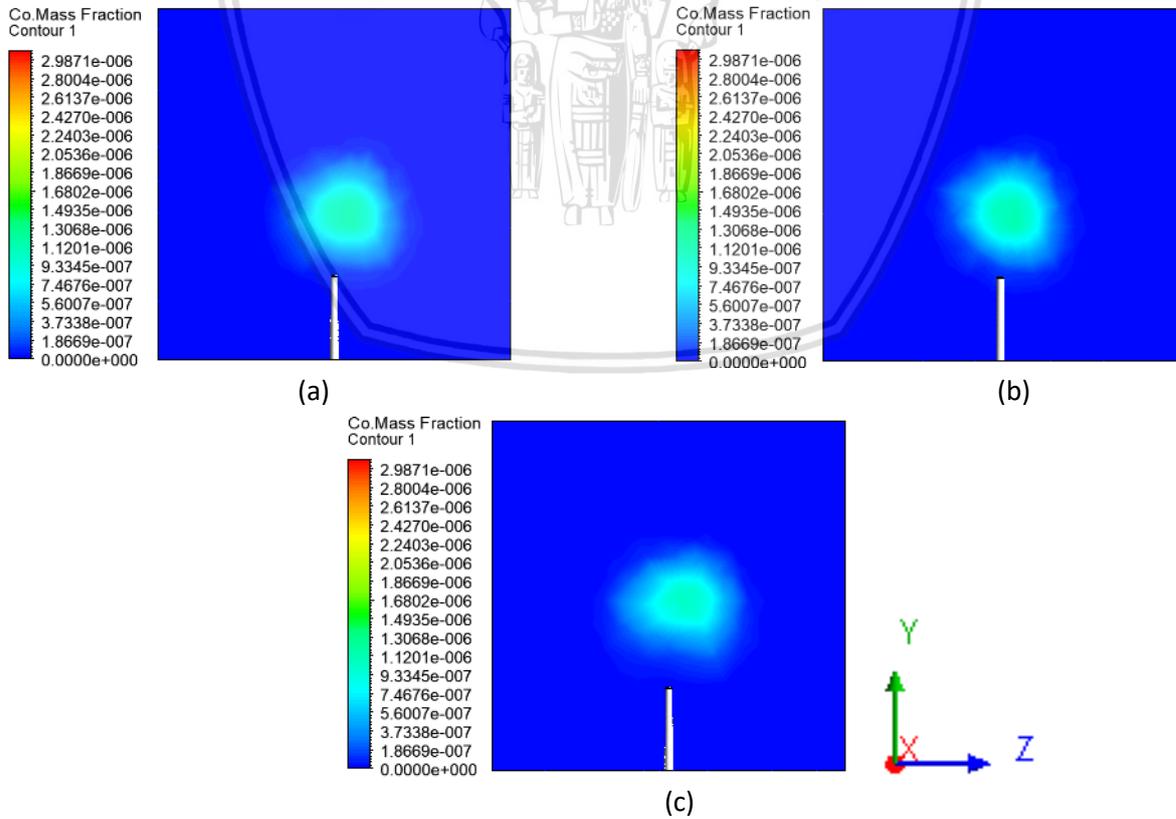
Penyebaran gas N_2 ke lingkungan dapat dilihat pada gambar 4.12, 4.13 dan 4.14 untuk jarak 1 km, 2,5 km dan 5 km dari cerobong. Seperti pada penjelasan sebelumnya bukaan damper menyebabkan konsentrasi gas SO_2 dan CO_2 di lingkungan akan semakin menurun. Hal tersebut demikian juga terjadi pada gas N_2 dimana semakin besar bukaan damper maka konsentrasi gas N_2 di lingkungan akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin besar bukaan damper maka semakin tinggi pula temperatur gas buang sehingga sehingga gas N_2 akan semakin cepat terdifusi ke lingkungan sekitar. Pada bukaan damper 15% gas N_2 lebih cepat terdifusi ke lingkungan dibandingkan dengan bukaan damper 10% dan 0%. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.12, 4.13 dan 4.14 dimana luas konsentrasi N_2 dengan bukaan damper 15% lebih luas dibandingkan dengan bukaan damper 10% dan 0%. Dari data kuantitatif dapat dilihat pada gambar 4.15 dimana semakin besar bukaan damper maka nilai konsentrasi gas N_2 akan semakin menurun. Pada gambar 4.15 konsentrasi pada jarak 1km dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% konsentrasi gas N_2 tertinggi adalah 0,0097, 0,0092 dan 0,0086. Sedangkan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% konsentrasi gas N_2 tertinggi adalah 0,0035, 0,0034 dan 0,0032. Pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% konsentrasi gas N_2 tertinggi adalah 0,0021, 0,002 dan 0,0018.

4.2.4 Dispersi Gas Karbon Monoksida (CO) di Lingkungan

Gambar 4.16 menunjukkan kontur penyebaran gas CO pada jarak 1 km dari cerobong. Sedangkan gambar 4.17 menunjukkan kontur penyebaran gas CO pada jarak 2,5 km dari cerobong. Gambar 4.18 menunjukkan kontur penyebaran gas CO pada jarak 5 km dari cerobong.

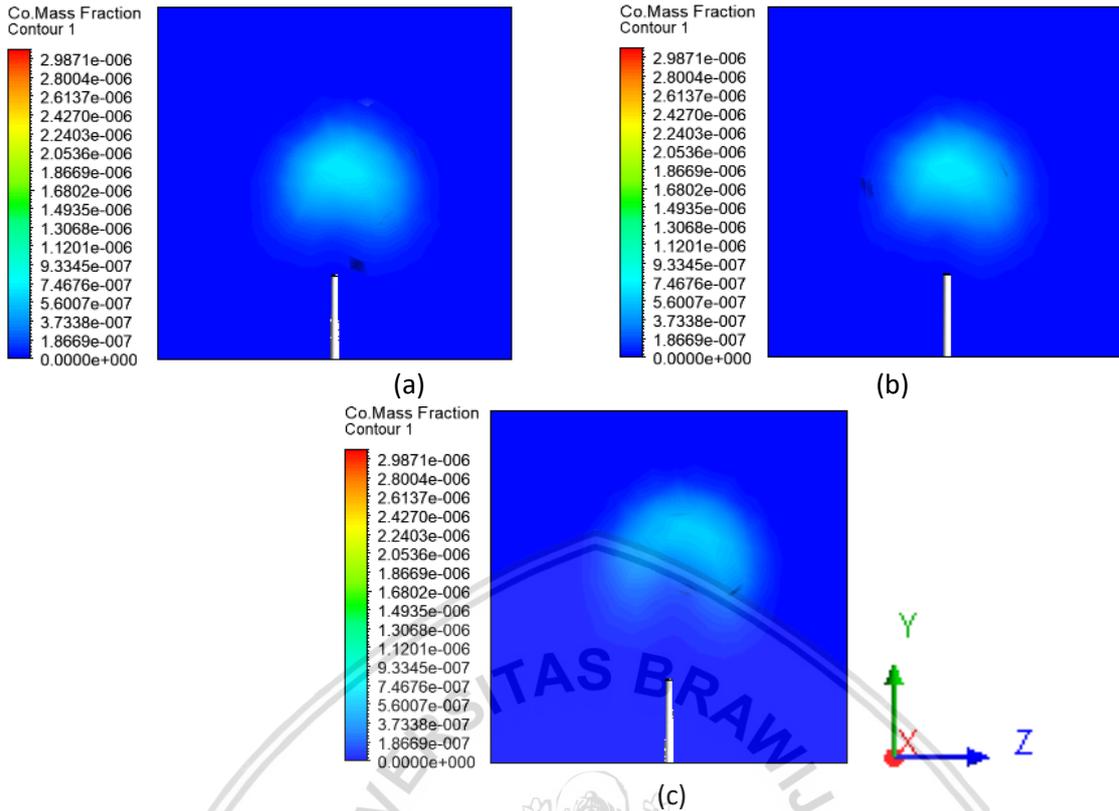


Gambar 4.17 Distribusi konsentrasi CO di lingkungan pada jarak 1 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%

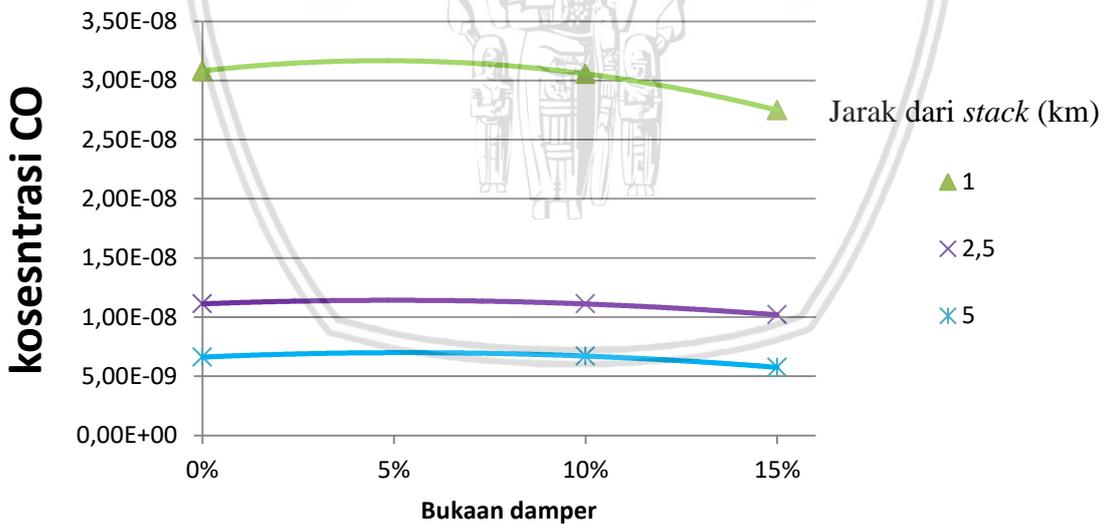


Gambar 4.18 Distribusi konsentrasi CO di lingkungan pada jarak 2,5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%





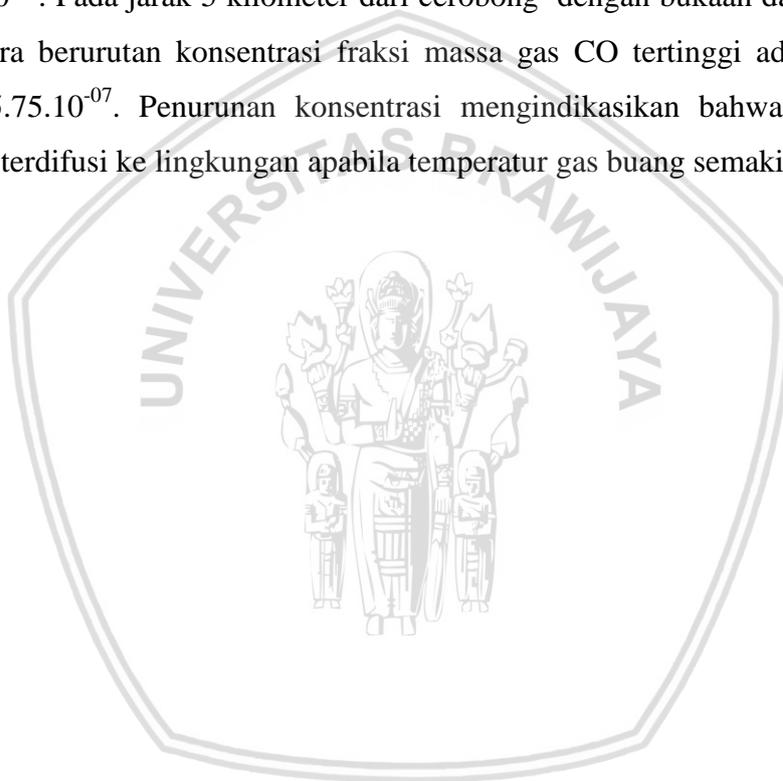
Gambar 4.19 Distribusi konsentrasi CO di lingkungan pada jarak 5 km dari cerobong dengan bukaan damper (a) 0%, (b) 10% dan (c) 15%



Gambar 4.20 Hubungan bukaan damper terhadap konsentrasi tertinggi gas CO

Gambar 4.16, 4.17 dan 4.18 dapat dilihat penyebaran gas CO ke lingkungan dengan jarak 1 km, 2,5 km dan 5 km dari cerobong. Semakin besar temperatur gas buang maka gas CO akan semakin cepat terdifusi ke lingkungan sehingga penyebaran gas buang semakin luas. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.16, 4.17 dan 4.18 dimana pada bukaan damper 15% luas penyebaran gas buang lebih luas dibandingkan dengan bukaan damper 10%, dan

0%. Demikian juga dengan bukaan damper 10% lebih luas dibandingkan dengan bukaan damper 0%. Gas buang yang menyebar ke lingkungan akan menyebabkan konsentrasinya menurun. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.19 dimana grafik menunjukkan penurunan konsentrasi seiring dengan semakin besarnya bukaan damper. Pada jarak 1 kilometer dari cerobong dengan bukaan damper 0% nilai konsentrasi tertinggi gas CO adalah $3,08 \cdot 10^{-06}$ lebih besar dibandingkan dengan bukaan damper 10% dan 15% yaitu $3,06 \cdot 10^{-06}$ dan $2 \cdot 10^{-06}$. Sedangkan pada jarak 2,5 kilometer dari cerobong seiring dengan semakin besarnya bukaan damper maka konsentrasinya menurun yaitu pada bukaan damper 0%, 10% dan 15% secara berurutan konsentrasi fraksi massa gas CO tertinggi adalah $1,11 \cdot 10^{-06}$, $1,11 \cdot 10^{-06}$ dan $1,019 \cdot 10^{-06}$. Pada jarak 5 kilometer dari cerobong dengan bukaan damper 0%, 10% dan 15% secara berurutan konsentrasi fraksi massa gas CO tertinggi adalah $6,70 \cdot 10^{-07}$, $6 \cdot 10^{-07}$, dan $5,75 \cdot 10^{-07}$. Penurunan konsentrasi mengindikasikan bahwa gas CO akan semakin cepat terdifusi ke lingkungan apabila temperatur gas buang semakin tinggi.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat pada penelitian kali ini adalah:

1. Semakin besar bukaan damper maka temperatur gas buang saat keluar cerobong semakin tinggi dimana temperatur gas buang dengan bukaan damper 0%, 10%, dan 15% secara berturut turut adalah 56°C , 61°C , dan 73°C .
2. Semakin tingginya temperatur gas buang saat keluar dari cerobong maka gas buang akan lebih cepat bergerak naik keatas. Hal ini menunjukkan semakin tinggi temperatur gas buang densitas nya semakin rendah.
3. Semakin tinggi temperatur gas buang maka dispersi gas buang ke lingkungan akan semakin cepat. Hal ini menunjukkan semakin tinggi temperatur gas buang akan semakin cepat terdifusi ke lingkungan.

5.2 Saran

1. Karena *reheat flue gas* secara signifikan mempengaruhi penyebaran gas buang ke lingkungan, sebaiknya dirancang *reheat flue gas* yang lebih ramah lingkungan sehingga dapat mengurangi dampak polusi terhadap lingkungan.
2. Untuk proses *reheat flue gas* sebaiknya tidak menggunakan metode *bypass*, hal ini dikarenakan semakin besar gas yang di lewatkan melalui *bypass* maka semakin besar pula sulfur yang diemisikan ke lingkungan, sebaiknya menggunakan metode lainnya. Misal dengan menggunakan metode *In-line*, *Indirect hot air*, atau *Direct combustion*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, John David Jr. (1995). *Computational Fluid Dynamics : The Basics With Applications*. McGraw-Hill: Singapore.
- Apsley, D. (2005), *Computational Fluid Dynamic*, Springer, New York
- Daldjoeni, N. (1986). *Pokok Pokok Klimatologi*. Bandung: Alumni
- Froelich, D.A. & Graves, J.M. (2012) *Eliminating Reheat from Existing FGD Systems*. Missouri: United states
- Forsdyke, A.G. (1970). *Meteorological Factors in Air Pollution*. Geneva: World Meteorological Organization
- Godish T. (1991). *Air Quality 2nd Ed*. Chelsea: Lewis Publishers.
- Hasibuan, Febriandi. (2015). *Simulasi Model Dispersi Polutan Gas dan Partikulat Molekul Pada Pabrik Semen Dengan Menggunakan Software Matlab 7.12*. Skripsi. Tidak dipublikasikan Bandar Lampung: Universitas Lampung
- Holman , J.P. (1984). *Perpindahan Kalor*. Jakarta Pusat: Erlangga
- Lakitan, Benyamin. (1994). *Dasar Dasar Klimatologi*. Jakarta: PT Rajagrafindo Persada.
- Kleinstreuer, Clement. (2005) *Computational Fluid Dynamic A Practical Approach, Second Edition*. Cambridge University Press: Inggris
- Nauli, Tigor. (2002). *Pola Sebaran Polutan Dari Cerobong Asap*. Bandung
- Niam, Agus Ghautsun. (2009). *Simulasi Dispersi Gas Polutan dari Cerobong ke Lingkungan dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Skripsi. Tidak dipublikasikan Bogor: IPB
- Nugraha, I. B. (2005). *Simulasi Pola Aliran Udara, RH dan Suhu Ruang Pengering dengan Teknik Computational Fluid Dynamics (CFD) pada Proses Pengeringan Mahkota Dewa (Phaleria macrocarpha (Scheff.) Boerl.)*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Bogor: IPB.

Ruhiat, Y. (2008). *Model Prediksi Distribusi Laju Penyebaran uifur Dioksida dan Debu dari Ka-wasan Industri (Studi Kasus di Kota Cirebon*. Jurnal Agromet Indonesia. Vol. 22 No. 1.

Stoker, H. S. & Seager S. L. (1972), *Environmental Chemistry*, London : Foresman and Co.

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

Tu Jiyuan, Yeoh Guan Heng & Liu Chaoqun. (2012). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Australia: Butterworth-Heinemann

Versteeg & Malalasekera (2007) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method Second Edition*. Ingris: Pearson Education Limited

