

Studi Karakteristik Aliran Gas Berbagai Polutan Menggunakan Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Nuroh Hidayati, Artoto Arkundato, Wenny Maulina, Ratna Dewi Syarifah, Lutfi Rohman, dan Endhah Purwandari*

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37, Jember, 68121, Indonesia.

*Email: endhah.fmipa@unej.ac.id

Abstrak

Polutan gas yang dihasilkan dari proses pembakaran *boiler* merupakan salah satu sumber pencemar lingkungan. Sebagai fluida, sifat kemudahannya mengalami deformasi membuat distribusi gas menjadi mudah menyebar ke segala arah. Penelitian ini berfokus pada karakteristik laju aliran dan tekanan gas yang akan disimulasikan menggunakan metode *computational fluid dynamic* (CFD) melalui *software SimFlow*. Melalui penggunaan persamaan Navier-Stokes, karakteristik tiga macam gas polutan CO, NO, dan SO₂ akan diamati perbedaannya sedemikian hingga diperoleh analisis distribusi aliran gas. Sumber gas diasumsikan berasal dari hasil emisi cerobong dan karakteristik aliran gas diamati pada daerah pengamatan berukuran 75 x 20 x 30 meter. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai laju alir terbesar terdapat pada gas SO₂ dan nilai laju alir terkecil terdapat pada gas CO. Viskositas kinematik gas polutan yang semakin kecil menyebabkan aliran gas bergerak semakin cepat. Tekanan yang dihasilkan oleh gas polutan memiliki hubungan yang linier terhadap laju alir gas polutan.

Kata Kunci: CFD, polutan gas, CO, NO, SO₂, *SimFlow*.

1. Pendahuluan

Fluida merupakan jenis zat yang memiliki sifat mampu mengalir dari satu tempat ke tempat lain dan tidak dapat menolak adanya perubahan/deformasi saat diberikan beban tegangan geser kepadanya [1]. Secara umum, fluida diklasifikasikan menjadi dua, yakni zat cair dan zat gas [2]. Sifat kemudahannya dalam mengalir, membuat fluida banyak diaplikasikan pada berbagai aktivitas manusia. Namun demikian, sifat alir fluida juga membawa permasalahan bagi lingkungan, salah satunya dijumpai adanya gas buangan sebagai hasil dari proses pembakaran oleh boiler.

Karakteristik aliran fluida dipelajari berdasarkan dua parameter utama, yakni kecepatan dan tekanan fluida. Secara simulasi, kedua parameter tersebut telah dianalisis karakteristiknya saat melewati saluran berbentuk cerobong, dengan menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD) [3]. Metode CFD merupakan ilmu komputasi yang mempelajari perilaku aliran fluida dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan matematis seperti persamaan Navier-Stokes. Perangkat lunak berbasis CFD yang umum digunakan antara lain *Ansys CFX*, *Ansys Fluent*, dan *SimFlow* [4].

Penelitian yang akan dilakukan selanjutnya yaitu simulasi CFD menggunakan perangkat lunak *SimFlow*. *SimFlow* adalah perangkat lunak CFD yang dapat dioperasikan baik di bawah sistem operasi Windows maupun Linux. Keunggulan *SimFlow* yaitu dapat membuat dan mengimpor *mesh*, mendefinisikan kondisi batas, menentukan parameter, menjalankan simulasi, dan melihat hasil *preprocessing* dengan *Para-View* [5].

Secara umum proses perhitungan yang digunakan untuk simulasi aliran fluida antara lain persamaan energi, persamaan kontinuitas dan momentum. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes mencakup persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi [6]. Berdasarkan fenomena aliran fluida, input yang digunakan untuk melakukan proses simulasi adalah nilai viskositas kinematik. Viskositas kinematik merupakan rasio perbandingan antara viskositas dinamik terhadap massa jenis suatu fluida. Secara matematis, viskositas kinematik dapat dituliskan dalam persamaan (1) [7].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

ν sebagai viskositas kinematik dalam satuan m^2/s , μ sebagai viskositas dinamik dalam satuan $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$, dan ρ sebagai massa jenis fluida dalam satuan kg/m^3 .

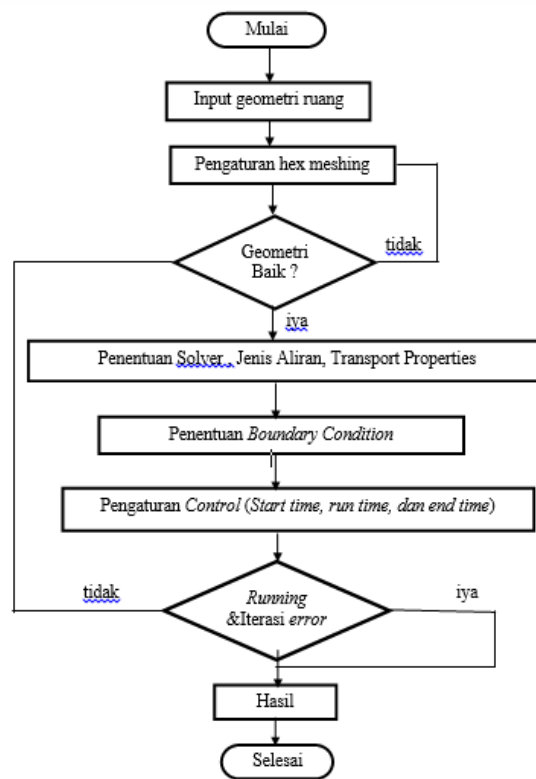
Karakteristik aliran gas yang akan disimulasikan dengan menggunakan geometri berbentuk silinder. Adapun beberapa jenis gas polutan yang disimulasikan diantaranya CO , NO , dan SO_2 . Ketiga jenis polutan tersebut banyak muncul sebagai gas buangan akhir dalam proses pembakaran. Proses simulasi dilakukan dengan tiga tahapan sehingga nantinya didapatkan hasil yang dapat diamati secara visual. Ketiga tahap tersebut meliputi *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*. Hasil simulasi diharapkan dapat menunjukkan karakteristik kecepatan alir dan tekanan berbagai gas polutan yang dianalisis terhadap perubahan waktu pengamatan.

2. Metode Penelitian

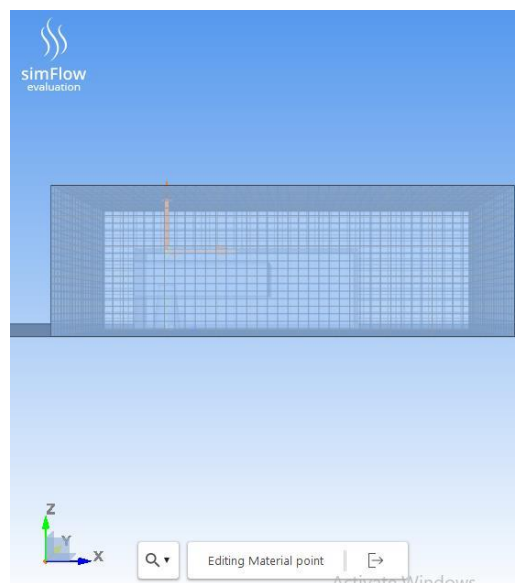
Penelitian ini akan dilakukan untuk mengetahui karakteristik laju alir gas berbagai polutan menggunakan simulasi CFD dengan *software SimFlow 3.1*. Simulasi diawali dengan proses *pre-processing* yaitu mengimpor *file* yang berisi desain dan ukuran geometri ruang silinder. Tahap *processing* yaitu melakukan penentuan *solver*, jenis material, kondisi batas dari geometri, dan dilanjutkan proses *meshing*. Tahap *post-processing* yaitu menampilkan nilai, grafik, dan gambar kontur yang diperlukan. Rancangan penelitian yang digunakan dalam simulasi ini secara ringkas dapat dilihat pada Gambar 1.

File yang telah dimasukkan dalam *SimFlow* akan menampilkan geometri ruang berupa silinder. Geometri ruang yang telah dilakukan perlu ditambah geometri tambahan berupa balok untuk menyempurnakan proses *mesh*. Penambahan geometri yang ditunjukkan pada Gambar 2. berupa 2 geometri balok dengan ukuran *box 1* (x, y, z) adalah (50, 12, 18) dan *box 2* (x, y, z) adalah (30, 12, 7,5). Pengaturan untuk proses *meshing* dilakukan pada balok *mesh* dengan cara mengatur ukuran balok *mesh* dan banyaknya *grid* pada balok *mesh*. Jumlah *grid* pada arah (x, y, z) adalah (45, 20, 20). Ukuran balok *mesh* pada arah (x, y, z) adalah (75, 20, 30) seperti Gambar 2 yang menjelaskan penentuan ukuran balok *mesh* ditentukan sesuai arah x, y , dan z .

Langkah berikutnya dapat dilakukan proses *meshing*. Proses *meshing* yang telah selesai dilanjutkan dengan penentuan jenis gas polutan yang akan digunakan. Pengaturan jenis gas polutan dapat diinputkan nilai viskositas kinematik gas polutan sebagai parameter input sesuai Tabel 1. Jenis aliran diasumsikan sebagai aliran *incompressible* dan tipe aliran *transient*. Batas domain yang telah ditentukan dapat digunakan untuk mengatur *boundary condition* sehingga dapat dilanjutkan pada pengaturan *time control* yang meliputi *start time* = 0, *time step* = 0,001, dan *end time* = 200. Proses selanjutnya yaitu *post-processing* dimana hasil simulasi yang telah ditentukan sebelumnya dapat diproses lebih lanjut untuk melihat hasil visualisasi. Hasil perhitungan pada tahap sebelumnya dapat diinterpretasikan dalam gambar, grafik, maupun animasi dengan pola-pola warna tertentu.



Gambar 1. Diagram alir rancangan penelitian.



Gambar 2. Desain balok mesh.

Tabel 1. Parameter input dari gas polutan.

Gas	Densitas (kg/m ³)	Viskositas Dinamik (kg/m.s)	Viskositas Kinematik (m ² /s)
NO	1,249	$13,8 \times 10^{-6}$	$1,417 \times 10^{-5}$
SO ₂	2,279	$8,6 \times 10^{-6}$	$0,689 \times 10^{-5}$
CO	1,165	$12,9 \times 10^{-6}$	$1,420 \times 10^{-5}$

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil yang diperoleh berupa nilai laju alir dan tekanan gas polutan dengan jenis gas yang berbeda-beda. Jenis gas polutan yang digunakan antara lain gas NO, SO₂, dan CO. Laju alir dan tekanan gas NO, SO₂, dan CO dapat dilihat secara berurutan-turut pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Hasil simulasi laju alir gas dan tekanan gas NO.

t (s)	P (Pa)	U _x (10 ⁻³ m/s)	U _y (10 ⁻³ m/s)	U _z (10 ⁻³ m/s)	U _r (10 ⁻³ m/s)
0,56	0,0291	1,22	13,31	5,78	14,56
10,1	0,0199	0,82	5,73	12,30	13,59
20,1	0,0173	0,68	6,02	6,05	8,56
30,2	0,0192	0,78	7,50	3,93	8,50
40,2	0,0203	0,68	9,15	2,81	9,60
50,0	0,0244	0,58	9,09	3,21	9,66
60,3	0,0262	0,64	11,32	3,95	12,01
70,2	0,0251	0,78	9,70	5,10	10,99
80,2	0,0271	0,81	10,80	5,11	11,98
90,3	0,0303	0,78	11,50	5,39	12,72
100,0	0,0296	0,75	11,10	6,42	12,84
110,0	0,0322	0,87	13,00	7,74	15,15
120,0	0,0356	1,02	14,70	10,70	18,21
130,0	0,0345	1,05	14,60	11,50	18,61
140,0	0,0361	1,04	15,20	11,20	18,91
150,0	0,0335	0,94	12,90	10,10	16,41
160,0	0,0323	0,87	13,00	10,50	16,73
170,0	0,0332	0,84	11,20	11,20	15,86
180,0	0,0353	0,88	12,10	11,60	16,79
190,0	0,0387	1,01	14,60	14,50	20,60
200,0	0,0378	1,12	14,90	11,90	19,10

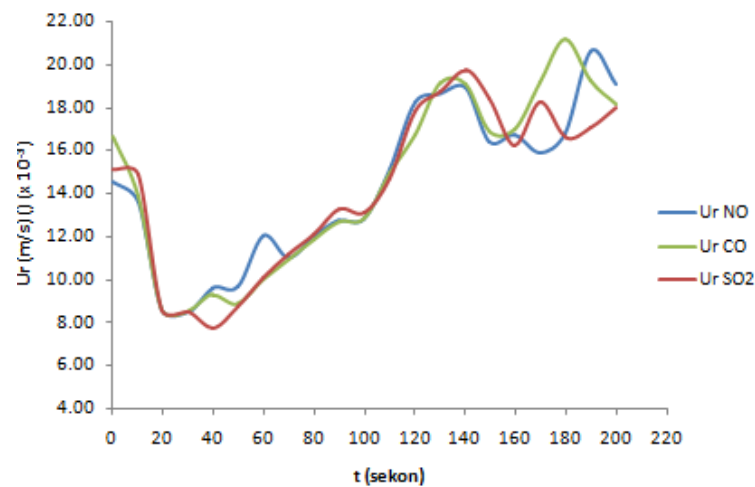
Tabel 3. Hasil simulasi laju alir gas dan tekanan gas SO₂.

t (s)	P (Pa)	U _x (10 ⁻³ m/s)	U _y (10 ⁻³ m/s)	U _z (10 ⁻³ m/s)	U _r (10 ⁻³ m/s)
0,78	0,0299	1,08	14,24	4,98	15,12
10,0	0,0199	0,82	8,37	12,30	14,90
20,2	0,0173	0,68	6,02	6,06	8,57
30,0	0,0192	0,78	7,50	3,93	8,50
40,0	0,0203	0,68	7,16	2,81	7,72
50,1	0,0245	0,58	8,10	3,21	8,73
60,2	0,0261	0,64	9,20	3,94	10,03
70,2	0,0257	0,79	9,85	5,22	11,18
80,2	0,0272	0,82	10,90	5,17	12,09
90,2	0,0310	0,81	12,10	5,30	13,23
100,0	0,0299	0,75	11,70	5,86	13,11
110,0	0,0321	0,89	12,50	7,71	14,71
120,0	0,0350	1,07	13,60	11,50	17,84
130,0	0,0351	1,16	13,40	13,00	18,71
140,0	0,0335	1,11	14,70	13,10	19,72
150,0	0,0333	1,04	12,60	13,40	18,42
160,0	0,0334	0,99	12,10	10,80	16,25
170,0	0,0370	1,18	14,40	11,10	18,22
180,0	0,0306	1,12	13,40	9,76	16,62
190,0	0,0339	1,12	13,50	10,30	17,02
200,0	0,0361	1,04	15,30	9,37	17,97

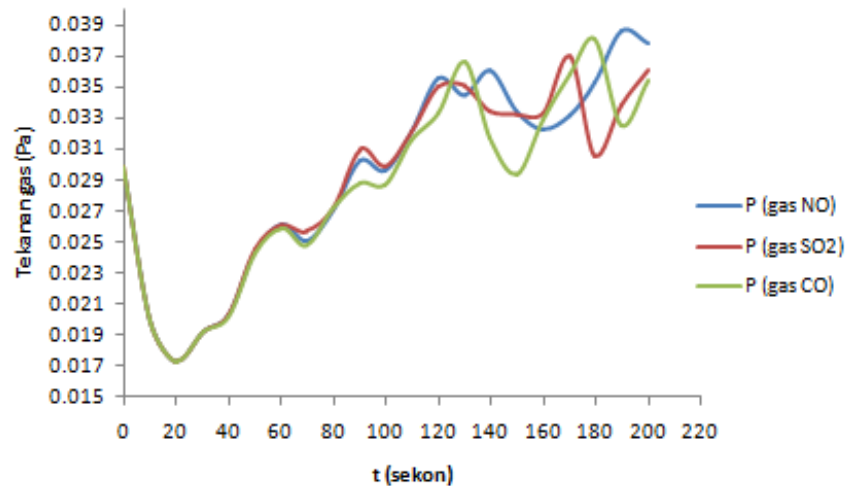
Tabel 4. Hasil simulasi laju alir gas dan tekanan gas CO.

t (s)	P (Pa)	U _x (10 ⁻³ m/s)	U _y (10 ⁻³ m/s)	U _z (10 ⁻³ m/s)	U _r (10 ⁻³ m/s)
0,02	0,0299	1,89	15,81	4,98	16,67
10,1	0,0199	0,81	6,37	12,30	13,88
20,1	0,0173	0,68	6,02	6,05	8,56
30,2	0,0192	0,77	7,52	3,93	8,52
40,0	0,0202	0,68	8,82	2,82	9,28
50,0	0,0243	0,57	8,25	3,21	8,87
60,1	0,0259	0,64	9,15	3,93	9,98
70,2	0,0248	0,77	9,63	5,04	10,90
80,0	0,0272	0,81	10,70	5,08	11,87
90,0	0,0288	0,76	11,40	5,44	12,65
100,0	0,0287	0,73	11,00	6,53	12,81
110,0	0,0316	0,85	12,80	7,60	14,91
120,0	0,0333	0,96	13,80	9,42	16,74
130,0	0,0366	1,03	15,70	10,90	19,14
140,0	0,0317	1,03	15,20	11,50	19,09
150,0	0,0294	0,95	13,20	10,50	16,89
160,0	0,0333	0,94	12,30	11,70	17,00
170,0	0,0358	1,02	14,10	12,90	19,14
180,0	0,0381	1,08	15,40	14,50	21,18
190,0	0,0326	1,05	14,10	13,00	19,21
200,0	0,0355	1,06	13,40	12,20	18,15

Besar resultan laju alir gas yang dihasilkan oleh ketiga jenis gas polutan diplotkan melalui grafik pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa karakteristik laju alir ketiga gas polutan memiliki pola grafik yang sama hingga pada detik ke-80. Perubahan terjadi setelah gas bergerak di atas 80 detik. Perubahan laju alir gas terjadi secara *transient* (berubah-ubah terhadap waktu) dimana relatif terjadi peningkatan. Sesuai dengan parameter input, gas CO memiliki nilai viskositas kinematik terbesar ($1,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) daripada gas NO dan SO₂. Besarnya viskositas kinematik gas CO menyebabkan lambatnya pergerakan gas CO. Sebaliknya gas SO₂ memiliki nilai viskositas kinematik terkecil ($0,689 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) sehingga menyebabkan pergerakan gas SO₂ lebih cepat daripada gas polutan lainnya.



Gambar 3. Grafik hubungan resultan laju alir (Ur) gas NO,SO₂,CO terhadap waktu.



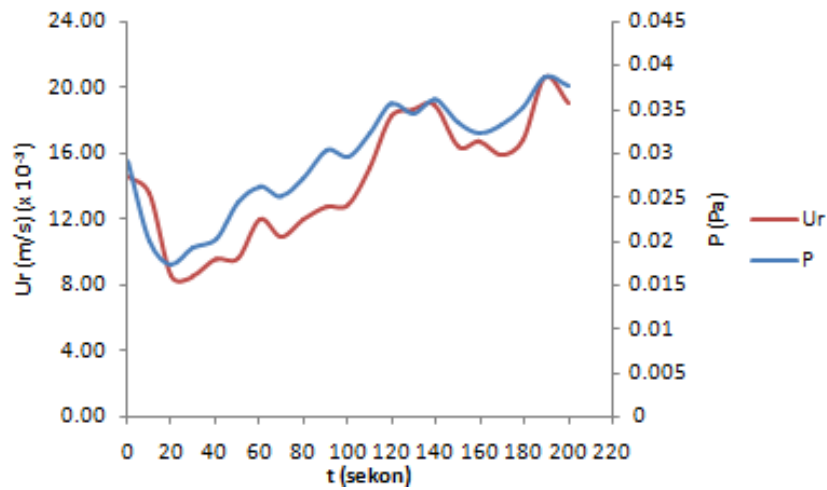
Gambar 4. Grafik hubungan antara tekanan gas NO, SO₂,CO terhadap waktu.

Tekanan gas dari ketiga jenis gas polutan juga diplotkan ke dalam grafik perubahan tekanan gas polutan terhadap waktu seperti pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, tekanan dari ketiga gas polutan menghasilkan pola grafik yang sama pada detik awal hingga detik ke-60. Perbedaan dari pola grafik tekanan gas polutan dapat diamati pada rentang waktu 60–110 detik. Grafik tekanan gas juga diplotkan bersama laju alir gas dari setiap gas polutan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh tekanan gas terhadap laju alir gas polutan.

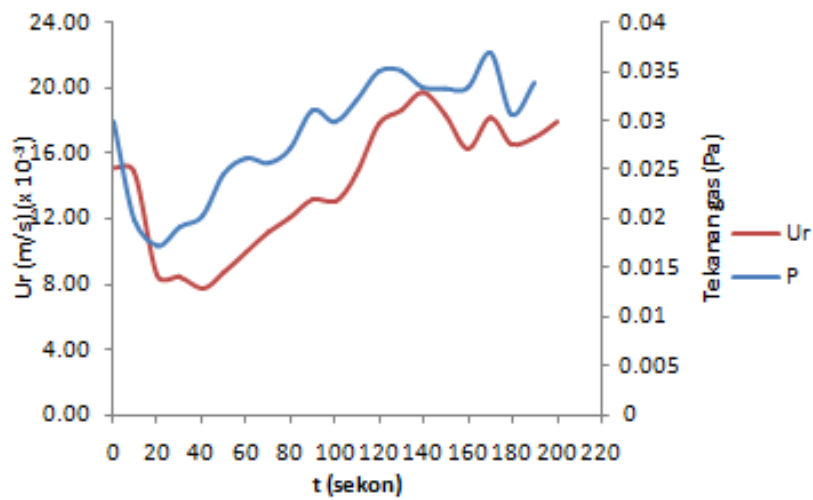
Hubungan laju alir dan tekanan gas NO terhadap waktu disajikan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, pada detik ke-10 hingga 140, hubungan laju alir gas dan tekanan gas NO berbanding lurus dan terus meningkat. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar laju alir gas maka tekanan gas yang dihasilkan juga semakin besar. Detik berikutnya yaitu 140–180 detik, tekanan gas NO mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena gas yang keluar dari geometri silinder bergerak bebas ke udara sehingga tekanan gas NO menjadi kecil.

Hubungan laju alir dan tekanan gas SO₂ terhadap waktu disajikan pada Gambar 6. Gas SO₂ juga menghasilkan tekanan gas yang berubah setiap waktu. Hal yang berbeda dapat diamati dari karakteristik tekanan gas SO₂ dari detik ke-10 dimana laju alir gas dan tekanan gas SO₂ meningkat secara linier hingga mencapai nilai maksimum pada detik ke-130. Berdasarkan rentang waktu terjadinya peningkatan laju alir dan tekanan, gas SO₂ lebih memiliki rentang waktu yang cepat daripada gas NO. Hal ini dikarenakan pengaruh dari *properties* gas polutan yang dimiliki yaitu massa jenis gas yang besar dan viskositas kinematik gas yang kecil.

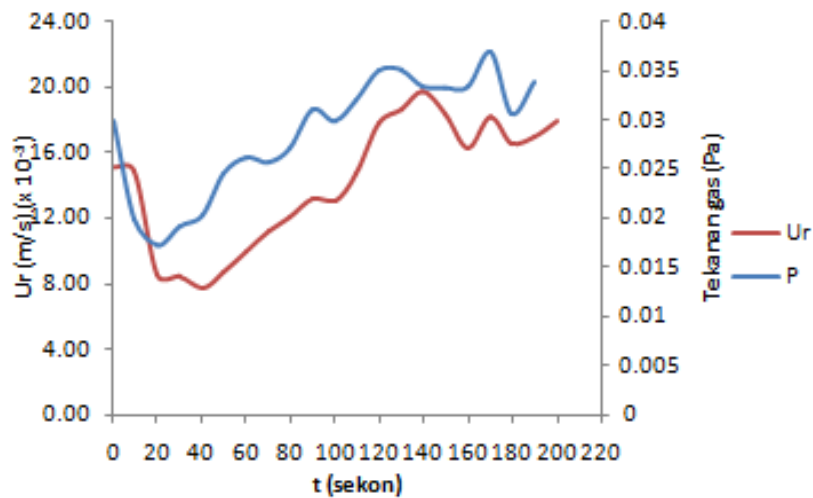
Hubungan laju alir dan tekanan gas CO terhadap waktu disajikan pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa awal mula tekanan gas memiliki nilai yang kecil ketika keluar dari geometri silinder. Turunnya nilai tekanan gas CO pada 20 detik pertama menyebabkan laju alir gas CO juga kecil. Seiring dengan pergerakan gas CO dalam geometri silinder yang bentuknya mengerucut ke atas sehingga gas CO menghasilkan kecepatan atau laju alir dan tekanan gas yang besar. Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa laju alir gas semakin meningkat pada 20–130 detik. Pergerakan gas CO kemudian mulai menurun sesaat pada 130–150 detik dan meningkat secara berturut-turut hingga mencapai laju alir maksimum pada 180 detik. Berdasarkan nilai viskositas kinematik gas CO ($\nu = 1,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) merupakan nilai terkecil daripada gas lainnya yang mengakibatkan pergerakan gas CO menjadi lambat.



Gambar 5. Grafik hubungan resultan laju alir dan tekanan gas NO terhadap waktu.



Gambar 6. Grafik hubungan resultan laju alir dan tekanan gas SO₂ terhadap waktu



Gambar 7. Grafik hubungan resultan laju alir dan tekanan gas CO terhadap waktu

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan dari ketiga jenis gas polutan (NO, SO₂, CO). Laju alir gas polutan cenderung meningkat pada rentang waktu 80 detik hingga 200 detik. Laju alir gas CO mencapai nilai tertinggi pada 180 sekon sebesar 21,18 m/s. Gas NO mencapai nilai tertinggi pada 190 sekon sebesar 20,60 m/s. Sedangkan gas SO₂ menghasilkan laju alir maksimum sebesar 19,72 m/s pada detik 140 sekon. Viskositas kinematik gas polutan yang semakin kecil menyebabkan laju alir gas semakin cepat bergerak. Tekanan yang dihasilkan oleh gas polutan memiliki hubungan yang linier terhadap laju alir gas polutan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Jember yang telah memberikan bantuan pendanaan riset melalui Hibah Keris Tahun 2018.

Daftar Rujukan

- [1] White, *Mekanika Fluida Jilid 1*. Terjemahan oleh Manahan Hariandja. Jakarta: Erlangga, 1994.
- [2] Y. Nakayama, *Introduction to Fluid Mechanics*, 2 Ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [3] E. Gholamalizadeh and J. D. Chung, "A comparative study of CFD models of a real wind turbine in solar chimney power plants," *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 167, 2017.
- [4] T. Kajishima and K. Taira, *Computational Fluid Dynamics*. New York, USA: Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [5] M. F. Suhaimi, M. H. Yusof, M. N. H. Rashid, and M. F. Basrawi, "The effect of tube length, cold exit diameter and working gas on the cold flow temperature of vortex tube," in *MATEC Web of Conf.*, vol. 225, p. 02010, 2018.
- [6] H. K. Versteeg and Malalasekera, *An Introduction of Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*. New York: John Wiley Sons Inc., 1995.
- [7] B. R. Munson, *Mekanika Fluida*. Jakarta: Erlangga, 2003.