

PENURUNAN KONSENTRASI GAS KARBON MONOKSIDA DENGAN MODEL FISIK TEROWONGAN SKALA LABORATORIUM

Decreasing Concentration of Carbon Monoxide Gas Using the Physical Tunnel Model at Laboratory Scale

RIRIN YULIANTI*, PANTJANITA N. HARTAMI** dan TAUFIQ HIDAYAT**

Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi, Universitas Trisakti
Jl. Kyai Tapa Grogol No. 1, Jakarta Barat 11440

Korespondensi e-mail: ririnyulianti@trisakti.ac.id

* Kontributor Utama ** Kontributor Anggota

ABSTRAK

Gas karbon monoksida (CO) merupakan salah satu gas berbahaya dan beracun yang biasa dijumpai di lorong tambang bawah tanah, berasal dari hasil sisa peledakan maupun pembakaran bahan bakar mesin yang tidak sempurna. Oleh karena itu, gas CO harus diencerkan secara maksimal dengan memerhatikan sirkulasi udara di lokasi kerja. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penurunan konsentrasi gas CO berdasarkan nilai koefisien difusi gas tersebut, dengan membuat model terowongan berskala 1:10 dengan model penampang 40 cm x 40 cm, menggunakan tipe ventilasi udara *overlap system*. Model terowongan yang dijadikan acuan adalah XC 13 B pada blok Cikoneng, PT Cibaliung Sumberdaya. Penelitian dilakukan dengan variasi posisi *vent duct* supaya kecepatan penurunan konsentrasi gas CO yang diuji dapat diketahui dengan mudah. Indikasi dilusi gas CO yang maksimal ditandai dengan nilai koefisien difusi yang tinggi. Variasi kecepatan udara di terowongan terjadi karena adanya jarak *vent duct* dengan muka kerja, sehingga nilai bilangan *Reynold* pada tiap kondisi berbeda akan memengaruhi koefisien difusi gas CO. Selain pengaruh kemajuan *vent duct*, nilai bilangan *Reynold* yang semakin besar menandakan kecepatan pendilusan gas CO semakin cepat, artinya semakin besar turbulensi udara yang terjadi, maka penurunan konsentrasi gas CO juga semakin cepat. Hal ini juga tergambarkan dari hasil pemodelan Ansys yang dilakukan.

Kata kunci: gas CO, koefisien difusi, *vent duct*, bilangan *Reynold*.

ABSTRACT

Carbon monoxide (CO) gas is one of the dangerous and toxic gases commonly found in underground mines that comes from residue of detonation or incomplete combustion of engine fuel. Therefore, CO gas must be maximally diluted by paying attention to air circulation at the work site. This study aims to determine the decrease in the concentration of CO gas based on the value of the gas diffusion coefficient, by making a 1:10 scale tunnel model with a cross-sectional model of 40 cm x 40 cm, using the overlap system air ventilation type. The tunnel model used as a reference was XC 13 B at Cikoneng block, PT Cibaliung Sumberdaya. This research was conducted by defining the variation of the vent duct position in order to easily determine the decreasing rate of the CO gas concentration. The indicator of the maximum dilution of CO gas was pointed by a high diffusion coefficient. The variation of air velocity in the tunnel occurred based on the distance of the vent duct with the working face, so that the Reynold's number value in each condition was different and affected the diffusion coefficient of CO gas. In addition to the effects of vent duct progress, the greater of Reynold's number value indicates the faster CO gas dilution rate, meaning that the greater air turbulence occurs, the lower CO gas concentration that happens faster. This phenomenon is also illustrated by the analysis result of the Ansys modeling.

Keywords: CO gas, diffusion coefficient, vent duct, Reynold's number.

PENDAHULUAN

Ventilasi udara pada tambang bawah tanah sangat berperan penting guna menyediakan udara bersih di area tambang serta mengeluarkan udara kotor. Sistem pertukaran udara harus dikendalikan agar resirkulasi udara tidak menyebabkan kualitas udara di area tersebut menurun. Selain itu, sistem ini harus dapat melarutkan gas-gas berbahaya dan beracun yang biasa dijumpai di tambang bawah tanah, salah satunya gas CO (Hartman *dkk.*, 1997).

Gas CO berasal dari pembakaran tidak sempurna yang dihasilkan oleh alat berat di dalam tambang bawah tanah, serta dari gas sisa kegiatan peledakan (Nursyamsu, 2017). Keberadaan gas CO menjadi perhatian utama ketika peledakan dilakukan pada lokasi *developing drift*, karena dapat menyebabkan keracunan bagi para pekerja jika gas tersebut tidak terdilusi dengan baik (Purawijaya, 2017). Proses dilusi (pengenceran) gas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti posisi *vent duct*, kecepatan *fan* dan kondisi sirkulasi udara di area tersebut.

Proses dilusi gas CO dapat diketahui melalui laju difusi penyebaran gas tersebut. Laju difusi adalah perpindahan zat dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi lebih rendah dengan luasan tertentu tiap satuan waktu (Putro dan Abadi, 2012). Oleh karena itu, diperlukan sistem ventilasi yang baik agar gas CO dapat terdilusi dengan baik di sepanjang lajur terowongan tambang bawah tanah dengan mempertimbangkan laju difusi gas berdasarkan nilai koefisien difusi yang efektif (Harnoko, Widodo dan Ihsan, 2019). Dengan memperoleh nilai koefisien difusi gas yang efektif, kondisi aman dan nyaman dapat tercipta bagi para pekerja (Widodo *dkk.*, 2008).

XC 13 B yang menjadi lokasi penelitian ini merupakan salah satu muka kerja penambangan dari PT Cibaliung Sumberdaya di blok penambangan Cikoneng (Larasati, 2020). Pada kondisi tidak ada aktivitas penambangan, kandungan gas CO pada lokasi XC 13 B tersebut ditemukan sebesar 0,0025%. Hal ini menandakan bahwa pendilusian gas CO tidak terjadi secara maksimal karena adanya resirkulasi udara. Oleh karena itu, analisis mengenai pendilusian gas CO perlu dilakukan berdasarkan penempatan *vent duct*.

Penelitian sebelumnya mengenai analisis dilusi gas karbon monoksida pada pemuka kerja terowongan horizontal (Harnoko, Widodo dan Ihsan, 2019), menjelaskan bahwa jarak ujung *vent duct* dengan muka kerja sangat berpengaruh pada terjadinya resirkulasi udara. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan analisis tambahan dengan bantuan *software Ansys (Ansys Student License)* untuk mengetahui arah aliran dari udara.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penurunan konsentrasi gas CO berdasarkan nilai koefisien difusi gas tersebut, dengan membuat model terowongan berskala 1:10 dengan model penampang 40 cm x 40 cm, menggunakan tipe ventilasi udara *overlap system*.

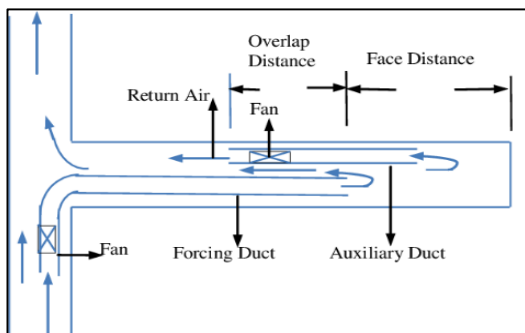
METODE

Model fisik terowongan dibuat dari bahan akrilik tebal 3 mm, dengan dimensi lebar 40 cm, tinggi 40 cm, dan panjang 300 cm. Pada muka kerja, ada 9 lubang simetris untuk menghitung kecepatan udara terowongan serta untuk injeksi gas CO, sedangkan pada ujung terowongan ada dua lubang masing-masing berukuran 7 cm guna menempatkan *vent duct*; pada *forcing duct* jarak masing-masing sebesar 5 cm dari atas dan kiri, pada *exhaust duct* jarak masing-masing sebesar 5 cm dari atas dan kanan. Sistem ventilasi yang digunakan berdasarkan penggunaan *fan* adalah *forcing and exhausting system* dengan perbandingan ukuran sesungguhnya sebesar 1:10. Data yang disimulasikan dalam pemodelan fisik merupakan data yang langsung diambil di lapangan yaitu pada lokasi muka kerja XC 13 B Blok Cikoneng, PT Cibaliung Sumberdaya, Pandeglang, Banten.

Sampel gas berasal dari asap kendaraan bermotor atau hasil pembakaran senyawa hidrokarbon yang ditampung pada wadah tertutup berukuran satu liter. Pada saat pengujian, injeksi gas CO dilakukan sebanyak tiga kali guna mendapatkan data yang akurat. Sensor menggunakan perangkat keras robotik dengan menjalankan koding pada *software Arduino 1.8.13*. Sensor yang digunakan adalah sensor MQ-7 yang dapat mendeteksi sekaligus menghitung kadar gas CO dengan satuan ppm. Jarak penempatan sensor, masing-masing sebesar 30 cm, diletakkan dari muka kerja dan

digantung dengan kawat sepanjang 25 cm dari bagian atas model fisik terowongan.

Gambar 1 menjelaskan sistem ventilasi tambang bawah tanah yang terdiri dari sistem hembus dan sistem hisap. Gabungan dari kedua sistem tersebut akan dijadikan model fisik dengan skala laboratorium. Langkah awal pengujian adalah menghitung kecepatan aliran udara pada muka kerja dengan kondisi kemajuan *vent duct* yang berbeda-beda menggunakan *anemometer*. Selanjutnya sampel gas CO diinjeksi kemudian sensor gas akan langsung mendeteksi konsentrasi gas CO hingga gas tersebut larut sempurna. Hasil yang diperoleh berupa nilai konsentrasi gas karbon CO berdasarkan waktu.



Sumber: Overlap sistem hisap dan hembus (McPherson, 1993)

Gambar 1. Sistem ventilasi hisap dan hembus (*forcing and exhausting system*)

skala laboratorium, sedangkan Gambar 3 merupakan model fisik dari *vent duct* yang digunakan dengan diameter 10 cm.

Kondisi aliran udara ditentukan melalui persamaan *Reynold*. Keadaan aliran udara tersebut dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu kekentalan (μ), densitas (ρ) dan diameter lajur udara (d) (Heriyadi, 2017). Hubungan antara μ , ρ , dan d yang terkait dengan kecepatan udara ini dikenal dengan bilangan *Reynold* yang ditulis dengan persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \dots \dots \dots (1)$$

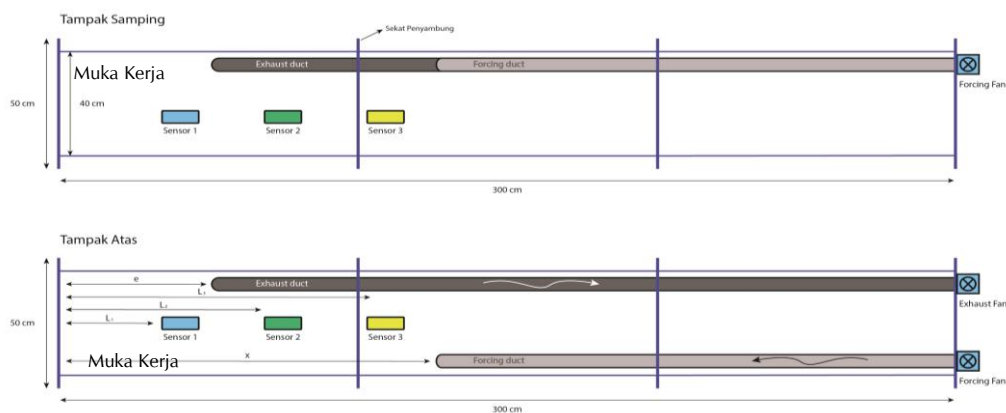
Keterangan:

- Re = Bilangan *Reynold*
- ρ = Bobot isi udara (kg/m^3)
- v = Kecepatan aliran udara (m/s)
- d = Diameter lajur udara (m)
- μ = Kekentalan udara (Ns/m^2)



Gambar 3. Model fisik terowongan skala laboratorium

Gambar 2 merupakan sketsa tampak samping dan tampak atas dari model fisik terowongan



Keterangan: sensor 1 (C) dengan jarak $L_1 = 30$ cm, sensor 2 (B) dengan jarak $L_2 = 60$ cm, sensor 3 (A) dengan jarak $L_3 = 90$ cm dan jarak $e = 1/2 x$

Gambar 2. Sketsa tampak samping dan tampak atas dari model fisik terowongan skala laboratorium

Bilangan *Reynold* digunakan untuk menentukan arah aliran laminar atau aliran turbulen. Untuk aliran laminar nilai $Re < 2.000$ sedangkan untuk aliran turbulen nilai $Re > 4.000$. Jika nilai Re antara 2.000 sampai 4.000, maka n disebut sebagai aliran transisi yang mengalami perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen.

Dispersi zat yang dilepaskan di aliran tertutup pada aliran laminar, akan dideskripsikan melalui koefisien difusi (Hartman, 1961). Koefisien difusi disebut sebagai *virtual diffusion coefficient* yang diperoleh dari pengamatan distribusi konsentrasi pada titik pengamatan. Hal tersebut dapat dianalogikan untuk aliran turbulen. Berikut adalah persamaan koefisien difusi aliran laminar dan turbulen oleh Taylor:

$$D = 10,1 r u' \dots\dots\dots (2)$$

$$u' = \frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{\rho}} = u \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{8}} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

D = Koefisien Difusi (m^2/s)

r = Jari-jari pipa jalur udara (m)

u' = Kecepatan friksi (m/s)

u = Kecepatan rata-rata udara (m/s)

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

τ = Tegangan geser (Pa)

f = Faktor friksi

Untuk permukaan licin, nilai *friction factor* dapat dihitung menggunakan persamaan *Blasius* (Blasius, 1913):

$$f = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

Re = Bilangan *Reynold*

Dengan menggunakan prinsip pengujian *Taylor*, nilai konsentrasi gas mengikuti teori distribusi *Gaussian* menggunakan asumsi satu dimensi sesuai persamaan berikut:

$$C_{(x,t)} = \frac{V}{2A\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-(x-ut)^2}{4Dt}\right) \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

Re = Bilangan *Reynold*

$C_{(x,t)}$ = Konsentrasi gas x dan waktu t

V = Volume gas awal (ml)

A = Luasan pipa saluran (m^2)

D = Koefisien Difusi (m^2/s)

t = Waktu (s)

x = Panjang aliran udara (m)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dengan menjadikan terowongan XC 13 B, blok Cikoneng PT Cibaliung Sumberdaya sebagai acuan dalam simulasi model fisik terowongan skala laboratorium sehingga dibutuhkan beberapa data untuk memantau pemodelan.

Tabel 1 merupakan data geometri *vent duct* di terowongan XC 13 B dan Tabel 2 merupakan data dimensi terowongan. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah posisi penempatan *vent duct* sebanyak 8 kondisi. Perbedaan posisi *vent duct* antara *forcing duct* dan *exhaust duct* terletak pada jarak muka kerja (Gambar 2) terhadap ujung *vent duct* keduanya. Jarak dari muka kerja ke *forcing duct* sebesar dua kali jarak muka kerja ke *exhaust duct*, hal ini bertujuan agar proses pendilusian gas CO maksimal dan tidak terjadi resirkulasi udara. Kecepatan udara pada ujung *forcing duct* diatur sedemikian rupa agar mirip dengan kondisi sebenarnya (Porras-Amores dkk., 2019). Kecepatan udara di ujung *forcing duct* dari hasil pengukuran adalah sebesar 4,11 m/s. Tabel 3 merupakan parameter kondisi pengambilan data.

Tabel 1. Data geometri *vent duct* XC 13 B

Parameter	XC13 B
Diameter (m)	0,7
Luas (m^2)	0,384
Keliling (m)	2,198
Kecepatan udara ujung <i>forcing duct</i> (m/s)	4,09
Debit aliran udara (m^3/s)	1,57

Tabel 2. Data dimensi terowongan XC 13 B

Parameter	XC13 B
Lebar (m)	4,408
Tinggi (m)	3,218
Luas (m^2)	14,187
Keliling (m)	17,088
Kecepatan udara terowongan (m/s)	0,31
Debit aliran udara (m^3/s)	4,47

Tabel 3. Parameter kondisi pengambilan data

Parameter	Kondisi							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Jarak muka kerja ke <i>forcing duct</i> (m)	2,6	2,4	2,2	2	1,8	1,6	1,4	1,2
Jarak muka kerja ke <i>exhaust duct</i> (m)	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Kecepatan udara pada terowongan bervariasi berdasarkan jarak antara muka kerja dengan *vent duct* dan kecepatan aliran *forcing duct*. Jika *vent duct* semakin mendekati muka kerja, maka kecepatan aliran terowongan juga semakin bertambah. Hal ini disebabkan oleh tekanan udara yang dihasilkan dari *forcing duct* akan lebih kuat jika lebih dekat dengan muka kerja, sehingga aliran udara yang mengalir belum tersebar merata (Massanés, Pera dan Moncunill, 2015). Perhitungan debit aliran udara model fisik terowongan didapatkan dari data kecepatan aliran udara rata-rata 9 titik pengukuran dikalikan dengan luas penampang model fisik terowongan dengan lebar 0,4 m dan tinggi 0,4 m. Jenis aliran udara yang terjadi di terowongan dapat ditentukan dari bilangan *Reynold* (Asrul dkk., 2018). Bilangan *Reynold* didapatkan dari perhitungan kecepatan aliran udara, bobot isi udara, kekentalan dinamik aliran udara dan diameter penampang terowongan. Kecepatan aliran udara yang digunakan adalah hasil rata-rata pengukuran dari 9 titik pengukuran pada muka kerja. Pengamatan dilakukan pada suhu ruangan sebesar 25°C sehingga nilai bobot isi udara sebesar 1,184 kg/m³ dan nilai kekentalan dinamik aliran udara sebesar 0,0000185

Ns/m². Diameter penampang model fisik terowongan sesuai desain yaitu 0,4 m. Tabel 4 merupakan data hasil pengukuran kecepatan udara, debit aliran udara serta bilangan *Reynold* tiap kondisi.

Semua kondisi telah diketahui nilai bilangan *Reynold*-nya dan hasilnya menggambarkan bahwa aliran yang terjadi pada tiap kondisi adalah aliran turbulen ($Re > 4000$).

Nilai koefisien difusi analitik didapatkan dengan persamaan Taylor (Persamaan 2). Data yang dibutuhkan berupa jari-jari jalur udara pada terowongan, kecepatan rata-rata aliran udara dan *friction factor* yang berasal dari nilai bilangan *Reynold* menggunakan persamaan Blasius (Blasius, 1913), karena permukaan dari model fisik terowongan terbuat dari akrilik sehingga bersifat licin. Tabel 5 merupakan nilai koefisien difusi analitik menggunakan persamaan Taylor.

Hasil yang didapat berupa nilai koefisien difusi analitik awal ketika gas CO mulai diinjeksi pada detik ke-0. Nilai koefisien difusi analitik akan bernilai rendah karena gas CO belum terdilusi secara sempurna.

Tabel 4. Kecepatan udara, debit aliran udara dan bilangan *Reynold* pada kondisi pengamatan

Parameter	Kondisi							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Kecepatan udara rata-rata (m/s)	0,264	0,268	0,284	0,311	0,324	0,287	0,297	0,301
Debit aliran udara (m ³ /s)	0,042	0,043	0,046	0,05	0,052	0,046	0,048	0,048
Bilangan <i>Reynold</i>	6770	6884	7282	7964	8306	7367	7623	7708

Tabel 5. Nilai koefisien difusi analitik Taylor

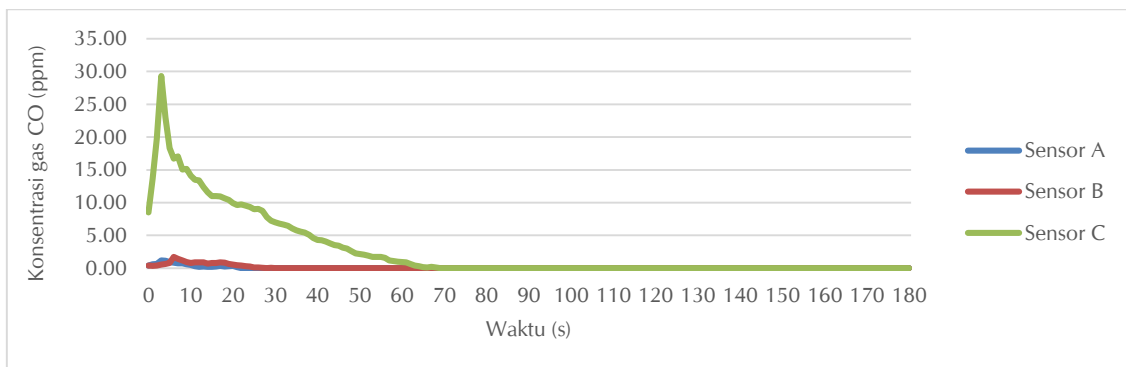
Parameter	Kondisi							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Friction Factor</i>	0,034837	0,034692	0,034208	0,03345	0,033101	0,034109	0,033818	0,033724
Kecepatan Friksi (m/s)	0,017451	0,017707	0,0186	0,020117	0,02087	0,018791	0,019361	0,01955
Koefisien Difusi Analitik (m ² /s)	0,03525	0,035768	0,037572	0,040637	0,042157	0,037957	0,039109	0,039492

Pengujian dilakukan pada 8 kondisi berbeda berdasarkan jarak antara muka kerja dan *vent duct*. Jarak antara *forcing duct* dan *exhaust duct* terhadap muka kerja berbeda yaitu jarak *forcing duct* ke muka kerja sebesar dua kali jarak *exhaust duct* ke muka kerja. Jarak ini berdasarkan kemampuan *fan* yang digunakan dengan perbandingan 1:10 sesuai kondisi *fan* dan *vent duct* sebenarnya di *tunnel* XC 13 B. Hal ini dilakukan agar resirkulasi udara tidak langsung terjadi dan proses dilusi menjadi lebih maksimal. Proses dilusi yang maksimal dapat diketahui jika sirkulasi udara baik dan penurunan gas CO berlangsung dengan cepat.

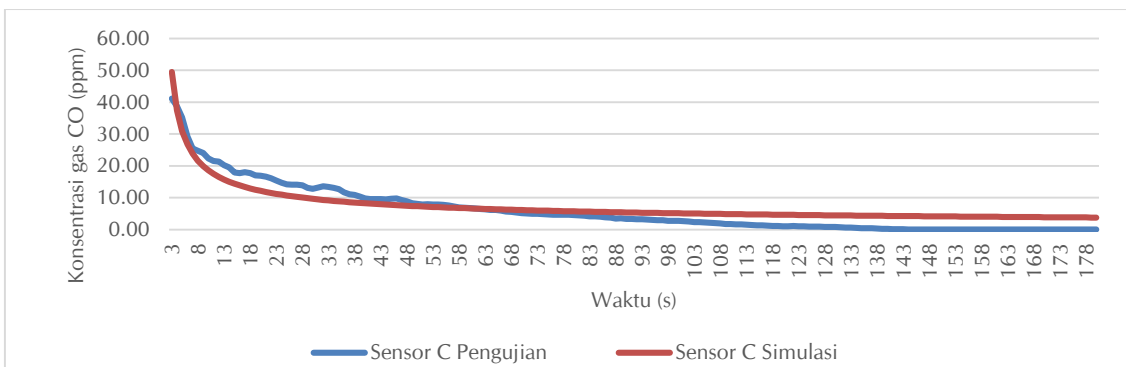
Gambar 4 menunjukkan penurunan konsentrasi gas CO terhadap waktu pada kondisi 1. Kenaikan konsentrasi gas CO dimulai pada saat pertama kali sampel gas diinjeksi, kemudian naik hingga mencapai titik maksimum (*peak*) pada pembacaan alat sensor gas. Nilai *peak* ketiga sensor berada pada waktu yang sama, kemudian gas mengalami pendilusan sehingga konsentrasi gas CO

mengalami penurunan. Sensor C memiliki nilai *peak* yang paling tinggi dikarenakan lokasi sensor pembaca gas berada lebih dekat dengan titik injeksi sampel gas, sedangkan sensor A dan sensor B relatif memiliki nilai *peak* yang sama, namun pada sensor A lebih cepat mengalami penurunan karena lokasi alat pembaca sensor yang berada lebih jauh dari titik injeksi. Nilai koefisien difusi simulasi didapatkan dari grafik penyebaran gas CO dalam beberapa kondisi posisi *vent duct* dan kecepatan udara pada *forcing duct*. Perolehan nilai koefisien difusi didapatkan secara empiris berdasarkan perhitungan dengan persamaan koefisien difusi Taylor menggunakan Persamaan 5 dengan metode *matching curve* (*trial and error* pada *Solver* di *Microsoft Excel*).

Gambar 5 merupakan analisis data nilai konsentrasi gas CO dari pengujian pada sensor C di kondisi 1, dengan konsentrasi gas CO hasil simulasi menggunakan Persamaan 5, hasil yang didapat berupa koefisien difusi secara empiris.



Gambar 4. Grafik penurunan konsentrasi gas CO terhadap waktu pada kondisi 1



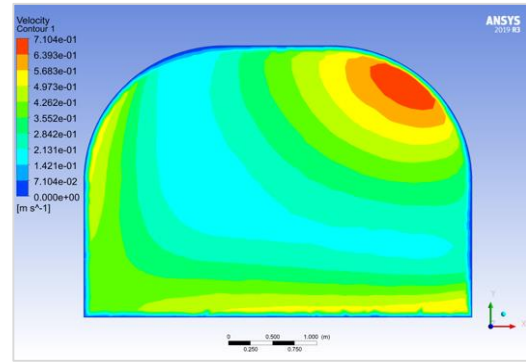
Gambar 5. Grafik perbandingan penurunan konsentrasi gas CO pada pengujian dengan hasil simulasi sensor C terhadap waktu

Hasil percobaan simulasi menggunakan metode *matching curve* menghasilkan nilai koefisien difusi simulasi (D_x). Tabel 6 merupakan nilai koefisien difusi simulasi (D_x) dari penurunan konsentrasi gas CO.

Tabel 6 menjelaskan bahwa kondisi 5 menghasilkan nilai koefisien difusi rata-rata gas CO paling tinggi dibandingkan dengan kondisi yang lain. Hal ini berarti bahwa proses pendilusian gas CO terjadi lebih cepat dan dapat dipastikan tidak terjadi resirkulasi udara. Kemudian pada tiap sensor gas, sensor B memiliki nilai koefisien difusi yang paling besar. Hal ini diakibatkan oleh turbulensi udara di lokasi 0,6 m dari muka kerja terjadi sangat cepat sehingga dapat dengan mudah melarutkan gas CO. Tabel 7 merupakan perbandingan koefisien difusi simulasi (D_x) dengan koefisien difusi analitik (D_A).

Koefisien difusi analitik diperoleh pada saat gas CO pertama kali diinjeksi, sehingga belum terjadi turbulensi yang sempurna. Koefisien difusi simulasi diperoleh pada saat terjadi turbulensi sempurna pada aliran udara, kemudian gas CO mengalami dilusi dari kondisi konsentrasi maksimum (*peak*) hingga larut sempurna. Pada simulasi model fisik terowongan XC 13 B, perbedaan yang sangat besar (21-32 kali) terjadi karena turbulensi udara yang membentur muka kerja dari *forcing duct* terjadi sangat cepat dan bervariasi berdasarkan kemajuan *vent duct*.

Setelah dilakukan simulasi menggunakan model fisik terowongan skala laboratorium, simulasi dengan software *Ansys Fluent* (*Ansys Student License*) dilakukan untuk mengetahui aliran turbulensi udaranya (Porras-Amores dkk., 2019).



Gambar 6. Hasil simulasi numerik aliran turbulensi di kondisi 5 dengan model terowongan di lapangan (*Ansys Student License*)

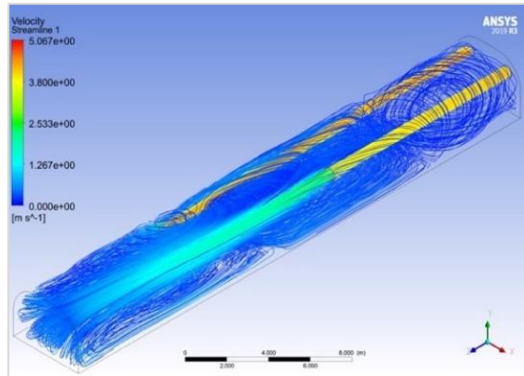
Gambar 6 menunjukkan bahwa aliran turbulensi udara di terowongan sangat bervariasi berdasarkan aliran udara yang dialirkan melalui *forcing duct*. Udara yang membentur muka kerja akan mengalami turbulensi hingga kecepatan udara tersebut berkurang lalu akan dihisap oleh *exhaust duct*. Penempatan *vent duct* di kondisi 5 tidak menunjukkan tanda-tanda adanya resirkulasi udara, sehingga proses pendilusian gas yang berbahaya dapat berlangsung dengan baik dan cepat. Tabel 6 menjelaskan bahwa kondisi 5 menghasilkan nilai koefisien difusi rata-rata gas CO paling tinggi dibandingkan dengan kondisi yang lain. Hal ini berarti bahwa proses pendilusian gas CO terjadi lebih cepat dan dapat dipastikan tidak terjadi resirkulasi udara. Profil kecepatan udara rata-rata simulasi *software* pada muka kerja sebesar 0,332 m/s, nilai persen kesalahan yang dihasilkan adalah 2,16% dari nilai kecepatan rata-rata di model fisik terowongan. Gambar 7 adalah profil kecepatan udara di muka kerja.

Tabel 6. Nilai koefisien difusi simulasi (D_x) dari penurunan konsentrasi gas CO tiap sensor

Kondisi	Kecepatan udara (m/s)	Koefisien Difusi Simulasi (m ² /s)			
		Sensor A	Sensor B	Sensor C	Rata-rata
1	0,2644	0,892348	0,852672	0,801714	0,8489115
2	0,2689	0,912618	0,877570	0,831920	0,8740361
3	0,2844	0,970599	0,991313	0,916704	0,9595387
4	0,3111	1,102312	1,126735	1,081668	1,1035715
5	0,3244	1,175726	1,254366	1,131785	1,1872925
6	0,2878	1,058625	1,077773	1,010989	1,0491298
7	0,2978	1,065819	1,110457	1,021384	1,0658870
8	0,3011	1,095497	1,126390	1,064064	1,0953169

Tabel 7. Perbandingan koefisien difusi simulasi (D_x) dengan koefisien difusi analitik (D_A)

Parameter	Kondisi							
	1	2	3	4	5	6	7	8
D_x (m ² /s)	0,84891	0,8740361	0,9595387	1,1035715	1,1872925	1,0491298	1,0658870	1,0953169
D_A (m ² /s)	0,03525	0,035768	0,037572	0,040637	0,042157	0,037957	0,039109	0,039492
D_x/D_A	30,24	30,85	31,60	21,51	22,76	28,86	26,83	21,50



Gambar 7. Profil kecepatan aliran udara simulasi numerik di kondisi 5 dengan model terowongan sebenarnya di lapangan (Ansys Student License)

KESIMPULAN

Kecepatan udara pada terowongan sangat memengaruhi proses pendilusan gas CO: semakin cepat aliran udara di terowongan, maka semakin cepat pula proses pendilusan gas tersebut sehingga koefisien difusi gas bernilai lebih tinggi. Nilai bilangan *Reynold* berbanding lurus dengan koefisien difusi simulasi. Semakin tinggi nilai bilangan *Reynold*, maka semakin tinggi koefisien difusi simulasi yang dihasilkan. Hal ini karena semakin maksimal aliran udara mengalami turbulensi, maka semakin cepat proses dilusi yang dialami oleh sampel gas yang diuji.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT Cibaliung Sumberdaya yang telah memberikan kesempatan untuk proses pengambilan data dan menerbitkan naskah. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas Trisakti khususnya kepada Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi yang telah mendukung secara finansial melalui dana penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Asrul, J., Salwin, A., Efendi, E. and Putra, M. D. (2018) 'Rancang Bangun Alat Monitoring Gas Metan di dalam Tambang Batubara Berbasis Android', *Jurnal Teknik Elektro Institut Teknologi Padang*, 7(1).
- Blasius, H. (1913) 'Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten', in Ingenieure, V. deutscher (ed.) *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–41. doi: 10.1007/978-3-662-02239-9_1.
- Harnoko, A. W., Widodo, N. P. and Ihsan, A. (2019) 'Analysis of Carbon Monoxide Gas Dilution on Horizontal Tunnel Front using Laboratory Scale Physical Model', *Indonesian Mining Professionals Journal*, 1(1), pp. 36–42. doi: 10.36986/impj.v1i1.10.
- Hartman, H. L. (1961) *Mine Ventilation and Air Conditioning*. New York: Ronald Press.
- Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V and Wang, Y. J. (1997) *Mine Ventilation and Air Conditioning*. 3rd Editio. John Willey & Sons, Inc.
- Heriyadi, B. (2017) 'Rancangan dan Pembuatan Alat Simulasi Sistem Ventilasi Tambang Pada Laboratorium Untuk Pembelajaran Ventilasi Tambang', *Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 17(2), p. 147. doi: 10.36275/stsp.v17i2.74.
- Larasati, B. (2020) *Evaluasi Jaringan Ventilasi Blok Cikoneng di PT Cibaliung Sumberdaya, Kecamatan Cimanggu, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten*. Universitas Trisakti.
- Massanés, M. B., Pera, L. S. and Moncunill, J. O. (2015) 'Ventilation management system for underground environments', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, pp. 516–522. doi: 10.1016/j.tust.2015.09.001.

- McPherson, M. J. (1993) *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. 1st Editio. Springer, Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-011-1550-6.
- Nursyamsu (2017) *Perencanaan Ulang Sistem Jaringan Ventilasi Tambang dengan Pemasangan Exhausting Main Fan System di Tunnel I dan II Tambang Batubara Bawah Tanah PT. Allied Indo Coal Jaya*. Universitas Negeri Padang.
- Porras-Amores, C., Mazarrón, F. R., Cañas, I. and Villoría Sáez, P. (2019) 'Natural ventilation analysis in an underground construction: CFD simulation and experimental validation', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, pp. 162–173. doi: 10.1016/j.tust.2019.04.023.
- Purawijaya, J. A. (2017) *Analisis Dilusi Gas Karbon Monoksida di Developing Front pada Raise Vertical-Inclined Jalur Lurus Skala Laboratorium*. Institut Teknologi Bandung.
- Putro, I. A. E. and Abadi, I. (2012) 'Rancang Bangun Alat Ukur Emisi Gas Buang, Studi Kasus: Pengukuran Gas Karbon Monoksida (CO)', *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, pp. 1–9. Available at: <https://digilib.its.ac.id/ITS-paper-24021130001677/23334>.
- Widodo, N. P., Sasaki, K., Gautama, R. S. and Risono (2008) 'Mine ventilation measurements with tracer gas method and evaluations of turbulent diffusion coefficient', *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22(1), pp. 60–69. doi: 10.1080/17480930701474869.