

BAB III

DASAR TEORI

3.1 Ventilasi Umum

Ventilasi merupakan pengaplikasian dari adanya prinsip mekanika fluida pada aliran udara, oleh karena itu hukum-hukum mekanika fluida akan selalu dipergunakan dalam perhitungan untuk ventilasi tambang. Mekanika fluida itu sendiri merupakan ilmu yang mempelajari fluida (yang dapat berupa cairan dan gas). Mekanika fluida dapat dibagi menjadi fluida statik dan fluida dinamik. Fluida statis mempelajari fluida pada keadaan diam sementara fluida dinamis mempelajari fluida yang bergerak. Fluida itu sendiri adalah suatu zat yang terus-menerus berubah bentuk apabila mengalami tegangan geser dan tegangan geser akan terjadi apabila fluida mengalami deformasi (pergerakan).

Salah satu persamaan fundamental dalam persoalan mekanika fluida adalah persamaan Bernoulli. Persamaan ini memberi hubungan antara tekanan, kecepatan dan ketinggian pada titik-titik sepanjang garis alir. Prinsip Bernoulli adalah sebuah istilah di dalam mekanika fluida yang menyatakan bahwa pada suatu aliran fluida, peningkatan pada kecepatan fluida akan menimbulkan penurunan tekanan pada aliran tersebut. Prinsip ini sebenarnya merupakan penyederhanaan dari persamaan Bernoulli yang menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik di dalam suatu aliran tertutup sama besarnya dengan jumlah energi di titik lain pada jalur aliran yang sama. Prinsip ini diambil dari nama ilmuwan Belanda/Swiss yang bernama Daniel Bernoulli. Penurunan persamaan Bernoulli dapat dilakukan dengan menggunakan hukum kekekalan energi, dalam hal ini kerja total sama dengan perubahan energi mekanik total yaitu perubahan energi kinetik ditambah perubahan energi potensial ditambah kerja aliran.

Sehingga persamaan dari Bernoulli dapat ditulis sebagai berikut :

Total energi mekanik = energi kinetik + energi potensial + kerja dari aliran

$$E_{mekanik} = \frac{mv^2}{2} + mgh + m \frac{P}{\rho} \quad (3-1)$$

Dimana, m adalah masa zat (kg), v adalah kecepatan fluida (m/s), h adalah ketinggian (m), ρ adalah density (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan P adalah tekanan (Pa). Jika tidak ada perubahan energi mekanik selama melintasi jalur udara maka total energi mekanik dianggap konstan sehingga persamaan 2.1 menjadi :

$$\frac{mv_1^2}{2} + mh_1g + m \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{mv_2^2}{2} + mh_2g + m \frac{P_2}{\rho_2} = \text{konstan} \quad (3-2)$$

Akan tetapi persamaan diatas adalah persamaan Bernoulli tanpa adanya pengaruh *friction*. Sedangkan untuk persamaan Bernoulli yang dipengaruhi oleh adanya *friction* adalah sebagai berikut :

$$\frac{mv_1^2}{2} + mh_1g + m \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{mv_2^2}{2} + mh_2g + m \frac{P_2}{\rho_2} + F_{12} \quad (3-3)$$

Dimana F_{12} adalah Energi yang Hilang antara titik 1 dan titik 2 (J/kg).

Pada tahun 1884, seorang ilmuwan yang bernama Osborn Reynolds dari Universitas Manchester di Inggris telah meneliti tentang gejala aliran laminar dan aliran turbulen. Menurut Reynolds, ada tiga faktor yang mempengaruhi keadaan aliran yaitu kekentalan (μ) , densiti (ρ) dari fluida, dan diameter jalur udara (d). Hubungan antara μ , ρ , dan d yang mempunyai dimensi sama dengan kecepatan inilah yang nantinya dikenal dengan bilangan Reynolds sehingga dapat ditulis menjadi persamaan :

$$Re = \frac{\rho vd}{\mu} \quad (3-4)$$

Dimana, Re adalah bilangan Reynolds, ρ adalah densiti fluida (kg/m^3), d adalah diameter jalar udara (m), dan μ adalah kekentalan dari fluida (Ns/m^2) dan v adalah kecepatan (m/s). Bilangan reynolds digunakan untuk menentukan apakah aliran tersebut adalah aliren laminar atau aliran turbulen. Untuk aliran laminar nilai $Re < 2.000$ sedangkan untuk aliran turbulen nilai $Re > 4.000$. Untuk nilai Re antara 2.000 samapai 4.000 disebut aliran transisi dimana aliran mengalami perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen.

Nilai ini telah dibuktikan melalui eksperimen dan dapat diterapkan pada perhitungan-perhitungan rekayasa baik untuk pipa bundar yang mulus maupun untuk pipa kasar dengan bilangan Reynolds sampai sekitar 2.000. Dalam pecobaan di laboratorium kita memang bias membuat aliran laminar dengan bilangan Reynolds sampai 40.000 atau lebih, tetapi dalam system pipa di lapangan gangguan selalu ada sehingga orang hanya dapat membuat aliran laminar dengan bilangan Reynolds paling besar sampai 2.000.

3.2 Ventilasi UBPE Pongkor

3.2.1 Permasalahan Ventilasi UBPE Pongkor

Beberapa masalah ventilasi pada penambangan di UBPE Pongkor adalah sebagai berikut:

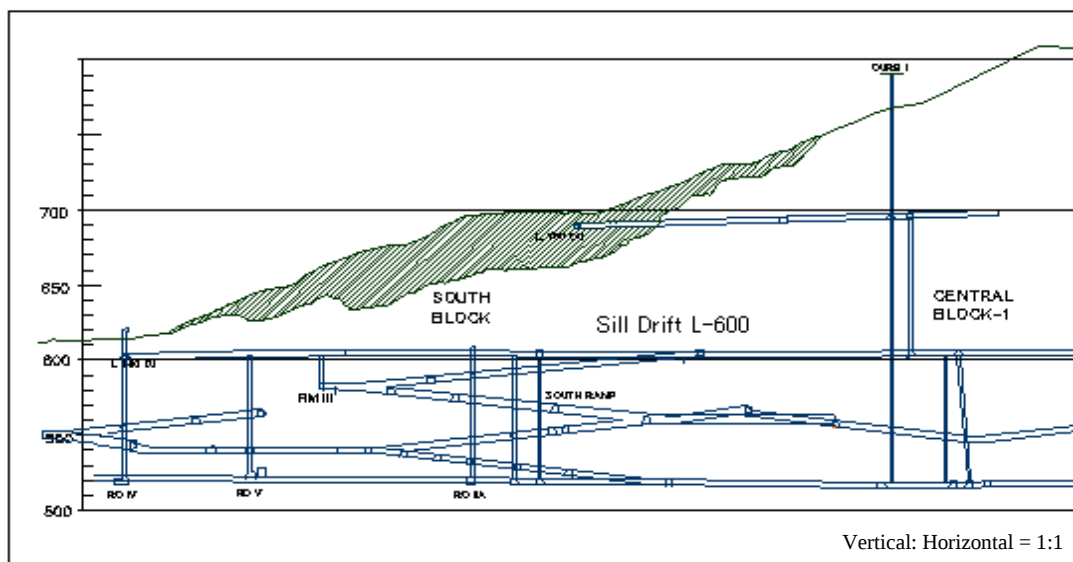
1. Kesulitan dalam penyaluran udara segar pada area penambangan.
2. Kesulitan pada pendeteksian kebocoran udara, konsentrasi udara, dan volume udara bersih.
3. Suhu dan kelembaban yang tinggi pada area penambangan.
4. Kesulitan dalam pengukuran udara pada daerah yang memiliki kecepatan aliran yang rendah (area kerja yang luas).
5. Kesulitan dalam pengukuran resistansi udara.
6. Adanya resirkulasi dan kebocoran udara.
7. Kesulitan pengukuran udara pada Intake karena kecepatan udara yang tinggi
8. Kesulitan pengukuran udara pada area yang berbahaya seperti pada *ore pass*

Pengukuran dengan Metode tracer gas menggunakan gas SF_6 (*sulphur hexafluoride*) dilakukan pada UBPE Pongkor. Pengukuran ini untuk memperkirakan rute aliran udara, untuk mendeteksi kebocoran udara dan untuk meneliti koefisien difusi udara yang turbulen pada area penambangan.

Kebocoran udara pada kipas utama dan rendahnya debit aliran udara pada ventilasi tambang diukur dengan metode tracer gas. Koefisien difusi efektif pada udara yang turbulen diukur dan dihitung dengan simulasi numerik berdasarkan persamaan Taylor. Koefisien difusi efektif untuk jaringan ventilasi yang besar dijelaskan dengan hasil pengukuran yang dilakukan.

3.2.2 Jaringan Ventilasi UBPE Pongkor

Penelitian dan pengukuran dilakukan pada tambang Ciurug. Tambang Ciurug terdiri dari dua blok, sebelah selatan *Main Haulage Level* 500 Ciurug dinamakan Blok Selatan, sedangkan disebelah utara dinamakan Blok Sentral (lihat Gambar 3.1). Masing - masing blok terbentuk oleh batuan yang memiliki karakteristik yang berbeda. Blok Selatan lebih mudah mengalami keretakan dibandingkan Blok Utara. Pada kondisi ini, keberadaan air (akibat perembesan dan kebocoran dari material pengisi pada stope) lebih banyak ditemukan pada Blok Selatan.



Gambar 3.1 Penampang tegak tambang Ciurug

3.2.3 Pengukuran Ventilasi Awal

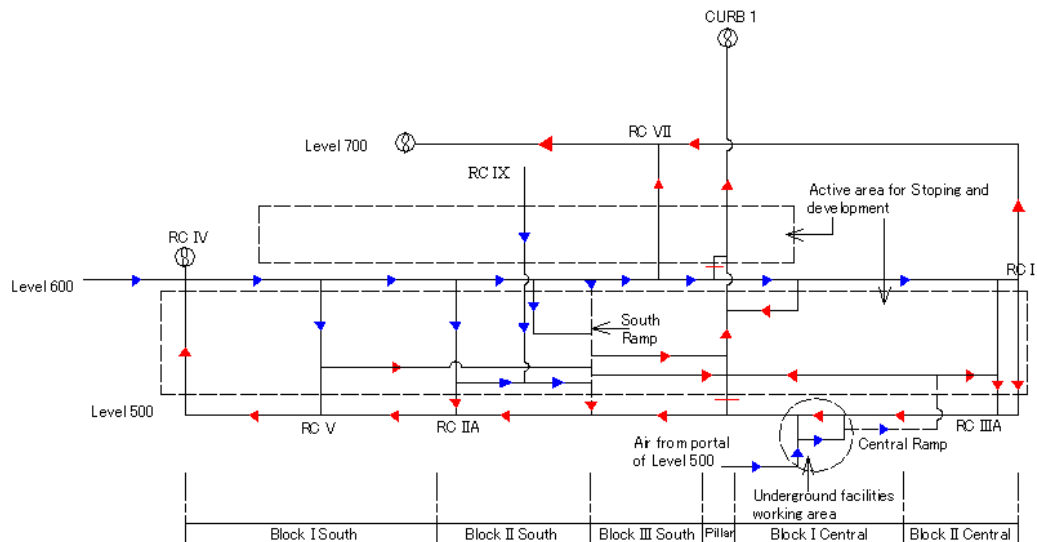
Untuk mengetahui sistem ventilasi, dilakukan beberapa pengukuran awal , yaitu pengukuran tekanan barometric pada portal level 500, 600, dan 700, pengukuran kecepatan sepanjang aliran udara, *cross cut – cross cut* dan *stope*, pengukuran dimensi pembukaan tambang, pengukuran suhu udara tambang, pengukuran *head statis* kipas (fan) dan *head velocity* didalam aliran udara. Pola aliran udara masuk dan udara keluar, tekanan karena ventilasi alami, dan kehilangan tekanan diabaikan.

Peralatan pengukuran yang dibutuhkan adalah barometer (mengukur tekanan absolut), anemometer (mengukur kecepatan aliran udara), alat pengukur panjang yang berbentuk rol (mengukur dimensi bukaan tambang), dan velocity meter (mengukur head statis fan dan kecepatan aliran udara).

3.2.4 Sistem Ventilasi Tambang

1. Jaringan Ventilasi dan Keseimbangan Kuantitas Udara

Ventilasi pada Ciurug dioperasikan oleh sistem exhaust menggunakan dua buah fan utama yaitu RC IV (Blok Selatan) dan CURB 1 (antara Blok Selatan dan Blok Sentral). Udara masuk berasal dari tiga jalur utama yaitu level 500, portal Level 600, dan RC VII (dari Level 700 menuju Level 600). Distribusi aliran udara pada tambang Ciurug diselidiki dengan cara pengukuran pada cabang–cabang dan pada persimpangan–persimpangan. Skema aliran udara pada sistem ventilasi tambang Ciurug diilustrasikan oleh Gambar 3.2.

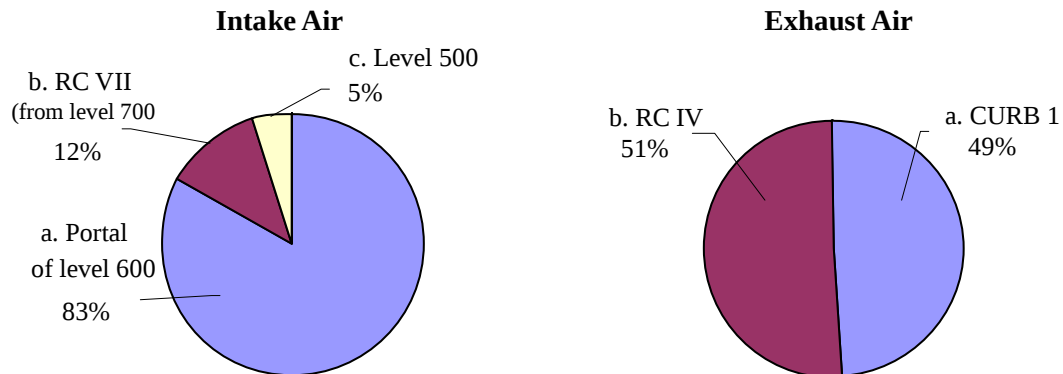


Gambar 3.2. Skema Sederhana Sistem ventilasi pada tambang Ciurug

Kuantitas aliran udara bisa dilihat pada Tabel 3.1. dan diilustrasikan pada Gambar 3.3. Dari Tabel 3.1 tersebut kita bisa mengetahui bahwa kesalahan ukuran aliran udara sekitar 7,6%. Udara masuk pada Level 600 memberikan kontribusi yang dominan untuk area penambangan Ciurug (83,1%). Untuk itu distribusi udara pada intake harus direncanakan dan ditangani dengan hati – hati. Tabel 3.3 memperlihatkan kebutuhan udara segar dan besarnya pasokan udara segar untuk kegiatan penambangan pada tambang Ciurug untuk masing–masing Blok. Dari data ini dapat kita ketahui bahwa total peralatan yang siap beroperasi pada Level 500 terkonsentrasi pada area servis dan area pemuatan material.

Tabel 3.1. Kuantitas udara segar hasil pengukuran

No.	Deskripsi	Debit (m ³ /min)	Persentase
1	Udara Masuk		
	a. Portal Level 600	5.170,00	83,10%
	b. RC VII (dari Level 700)	766	12,30%
	c. Level 500	288	4,60%
	Total Udara Masuk	6.224,00	100,00%
2	Udara Keluar		
	a. CURB 1	2.798,00	48,70%
	b. RC IV	2.950,00	51,30%
	Total Udara Keluar	5.748,00	100,00%
	Sisa	476	7,60%



Gambar 3.3. Diagram udara masuk dan udara keluar pada area Ciurug

Dari Tabel 3.2. bisa dilihat bahwa total debit udara segar kurang dibandingkan dengan kebutuhan udara segar untuk kegiatan penambangan. Blok II dan III Selatan, Blok I dan II Sentral, dan Level 500 membutuhkan udara segar yang lebih besar lagi untuk menunjang kegiatan penambangan. Kenyataannya terlihat bahwa debit udara segar sebesar 2.345 m³/menit (45,4%) dari Level 600 mengalir menuju RC V (Blok I Selatan).

Tabel 3.2. Kebutuhan udara segar dan suplai udara segar untuk kegiatan penambangan pada tambang Ciurug

No	Deskripsi	Blok I Selatan		Blok II & III		Blok I & II Sentral		Level 500		Total
		Unit	Q (m ³ /mnt)	Unit	Q (m ³ /mnt)	Unit	Q (m ³ /mnt)	Unit	Q (m ³ /mnt)	Q (m ³ /mnt)
1	Peralatan Tambang									
	a. LHD	1x120 kW	432	2x120 kW 1x185 kW	864 666	2x120 (kW)	864	1x104 kW	375	3.201
	b. Wheel Loader			1x56 kW	202	1x56 kW	202	1x56 kW	202	606
	c. Jumbo Drill	1x7.6 kW	27	1x7.6 kW	27	1x7.6 kW	27	1x7.6 kW	27	108
	d. Dozer			1x50 kW	180					180
2	Pekerja Tambang	10 orang	60	60 orang	360	25 orang	150	40 orang	240	810
3	Kompresor							4 unit	52	52
4	Bengkel Kerja							30.8 m ²	462	462
	Kebutuhan		519		2.299		1.243		1.358	5.419
	Suplai Udara Segar		2.345		2.182		1.068		629	6.224
	Perbedaan		1.826		-117**		-175**		-729**	805

- Tanda ** menunjukkan bahwa ketersediaan udara masih kurang dari yang dibutuhkan. Jadi kondisi udara Blok II dan Blok III Selatan kurang ideal dan terasa panas karena kurangnya pasokan udara, begitu juga dengan Blok I dan Blok II Sentral
- Kebutuhan peralatan diesel adalah 3,6 m³/menit/kW, kebutuhan pekerja adalah 6,0 m³/menit/orang, untuk area kerja 15,0 m³/menit/area.

b) Peralatan Diesel

Peralatan diesel yang digunakan di Pongkor adalah Load Haul Dump (LHD), Jumbo Drill, Bulldozer and Wheel Loader. Pada area Ciurug terdapat bengkel untuk perbaikan mesin/alat penambangan yaitu pada level (bisa dilihat pada gambar 3.4). Daya peralatan diesel berkisar pada 7,7 kW hingga 136 kW. Peralatan ini membutuhkan udara sebanyak 0,05m³/detik/kW.



Gambar 3.4 Bengkel LHD pada level 515 Ciurug

c) Tekanan Ventilasi Alami

Pada area tambang Ciurug terdapat tekanan ventilasi alami (Tabel 3.3) Perhitungan tekanan ventilasi alami ini bisa dilihat pada Tabel 3.3. Hasil perhitungan terlihat bahwa NVP mendukung fan tambang CURB 1 tetapi berlawanan dengan fan RC IV. Suhu udara yang mempengaruhi perhitungan, memberikan pengaruh terhadap keberadaan air dan kegiatan penambangan. Karena karakteristik batuan dan kontur topografi, keberadaan air lebih besar pada Blok I Selatan (RC IV) dibandingkan dengan keberadaan air pada Blok III Selatan atau Blok I Sentral (CURB 1), sehingga aliran ventilasi alami berbeda arah pada area ini.

Tabel 3.3. Prediksi nilai tekanan ventilasi alami

No.	Deskripsi Aliran udara	L vertikal	T_{dalam}	T_{luar}	P_b	P_n	Keterangan Arah aliran (pengaruh pada <i>fan</i>)
		(m)	(°C)	(°C)	(Pa)	(Pa)	
1	Level 500-600 (500 - RC IV)	100	25.7	26	94.616,00	1.26	Dari RC IV ke 500 (berlawanan dengan fan)
2	Level 500-780 (500 - CURB 1)	280	26.3	26	93.571,90	-5.53	Dari 500 ke CURB 1 (searah fan)
3	Level 600-780 (600 - CURB 1)	180	26.4	26	93.018,00	-2.55	dari 600 ke CURB 1 (searah fan)
4	Level 600-700 (600 - RC VII)	100	25	26.3	93.461,10	4.47	Dari 700 tke 600

Keterangan

1. L : panjang aliaran

2. T_{dalam} : suhu udara kering didalam shaft

3. T_{luar} : suhu udara kering pada portal

4. P_b : tekanan absolut rata-rata

5. P_n : tekanan ventilasi alami

6. Formula: $P_n = (g \times P_b \times L) / R \times (1/T_1 - 1/T_2)$

7. T_1 : T_{dalam} temperatur absolut = 273,15 + T_{dalam} (K)

8. T_2 : T_{luar} temperatur absolut = 273,15 + T_{luar} (K)

9. $g = 9.8$ (m/s²) dan $R = 287,1$ (m²/s²K)

d) Tekanan Ventilasi

Kehilangan tekanan pada masing – masing arah pada penambangan dihitung dengan:

$$1) P_t = P_s + P_v, \quad (3-5)$$

dimana P_t = tekanan total (Pa), P_s = tekanan statis (Pa), P_v = tekanan dinamik (Pa)

$$2) P_v = (\rho v^2) / 2 \quad (3-6)$$

dimana ρ = massa jenis udara (kg/m³), v = kecepatan udara (m/detik)

$$3) P_s = P_f + P_x = (K p_{\text{er}} (L + L_e) Q^2) / A^3 \quad (\text{persamaan Atkinson}), \quad (3-7)$$

dimana, P_f = penurunan tekanan friksi (Pa), P_x = penurunan tekanan akibat *shock loss* (Pa), K = faktor friksi empirik (kg/m³) (McElroy, 1935), L = panjang aliran

udara (m), Le = panjang ekuivalen dari *shock loss* (m), p_{et} = keliling (m), Q = debit udara ($m^3/detik$), A = luas area (m^2)

Tabel 3.4 memperlihatkan perkiraan besarnya kehilangan tekanan pada tambang dan tekanan fan sesungguhnya berdasarkan NVP pada Ciurug. Bantuan NVP pada CURB 1 mengurangi tekanan aktual fan, dari 515,52 Pa menjadi 509,99 Pa (1,1%). Sebaliknya terhadap RC IV, NVp meningkatkan tekanan aktual fan dari 408,85 pa menjadi 410,11 Pa (0,35%) dari perkiraan ini, bisa disimpulkan bahwa NPV tidak memberikan efek yang signifikan terhadap pengoperasian fan pada tambang Ciurug.

Tabel 3.4. Perkiraan pengurangan nilai tekanan pada tambang Ciurug dan tekanan fan yang dioperasikan

No.	Aliran Udara	P_s (Pa)	P_v (Pa)	P_t (Pa)	P_n (Pa)	P_m (Pa)
1	Fan CURB 1					
	a. Portal 600 – X cut 7 FW – CURB 1	420,9	73,5	494,4	-2,6	491,9
	b. Portal 600 – Stope Blok I Sentral - CURB1	421,1	73,5	494,6	-2,6	492
	c. Portal 600 – Ramp Selatan– Ramp Connect - CURB 1	437,9	77,6	515,5	-5,5	510
2	Fan RC IV					
	Portal 600 – ramp down – RC IV	321,7	87,2	408,9	1,26	410,1

Keterangan:

1. P_s : tekanan statis

2. P_v : tekanan dinamik

3. P_t : tekanan total

4. P_n :tekanan ventilasi alami

5. P_m : tekanan aktual fan

3.3 Tracer Gas

3.3.1 Penjelasan Metode

Metode penelitian yang digunakan adalah **Metode Tracer Gas**. Suatu metode yang bekerja dengan cara menangkap suatu campuran udara, kemudian campuran udara masuk ke dalam suatu filter optik yang berfungsi untuk menyeleksi gas tertentu yang terperangkap didalam alat ini. Gas yang terperangkap inilah yang akan dihitung konsentrasinya dalam selang waktu tertentu lalu dilakukan analisis.

Metode Tracer Gas biasanya menggunakan zat organik dan anorganik (zat kimia) atau dengan menggunakan bahan radio aktif. Tes menggunakan zat kimia memiliki kekurangan dibandingkan dengan tes menggunakan bahan radio aktif yaitu sukar dideteksi pada konsentrasi yang sangat rendah serta mudah terabsorpsi pada permukaan. Sedangkan kelemahan bahan radio aktif adalah mudah meluruh sehingga sangat sukar untuk ditangani dan beresiko terhadap pekerja karena sifat radio aktifnya.

Peralatan yang digunakan dengan Metode Tracer Gas adalah Brüel & Kjær Multi Gas Monitor Type 1302. Kegunaan dari The Brüel & Kjær Multi Gas Monitor Type 1302:

1. Untuk menganalisis kuantitas gas serta uap air dalam suatu campuran udara
2. Untuk mengukur kualitas udara didalam ruangan serta untuk pengukuran suatu sistem ventilasi.
3. Untuk mendeteksi gas – gas yang bisa menimbulkan bahaya atau kecelakaan kerja.

Kelebihan dari The Brüel & Kjær Multi Gas Monitor Type 1302 adalah :

1. Pemakaiannya mudah, bisa dioperasikan oleh non teknisi sekalipun.
2. Akurasi tinggi terhadap pembacaan nilai konsentrasi gas pada suatu sampel udara.
3. Peralatannya tidak memberikan efek terhadap kesehatan sehingga aman untuk digunakan.

4. Merupakan *analyzer* yang baik karena stabil dalam pembacaan kuantitas gas dengan menggunakan kontrol mikroprosesor.
5. Prinsip kerjanya berdasarkan Metode Deteksi Photo Infra Merah
6. Mampu melakukan pencatatan sendiri (operasi manual hanya pada setting awal)
7. Mampu menganalisis kuantitas gas/udara yang terabsorbsi oleh cahaya infra merah sampai 5 macam gas dalam suatu sampel campuran udara.
8. Kemampuan penyimpanan data sebelum ditransfer ke PC (Komputer).
9. Pemasangan *Filter* Optik sebagai selektor terhadap perbedaan gas serta perubahan konsentrasi gas.
10. Respon yang berbanding lurus terhadap perubahan besar yang dinamis.
11. Memiliki pembacaan yang bebas, tetapi biasanya pembacaan berada pada kisaran 10^{-3} ppm (ppb).
12. Langsung menampilkan nilai – nilai yang terukur.
13. Akurat dalam pembacaan fluktuasi suhu, pencampuran udara, serta pencampuran dari berbagai macam gas dan ditampilkan pada layar monitor.
14. Bisa dihubungkan dengan peralatan computer atau peralatan lainnya.
15. Dengan *Multi Point Doser* dan *Sampler Units*, The Brüel & Kjær Multi Gas Monitor Type 1302 bisa memonitor udara dan mengumpulkan data – data atau nilai – nilai konsentrasi dari 6 - 12 lokasi yang berbeda.

3.3.2 Pengukuran Ventilasi Menggunakan Tracer Gas

Metode Tracer Gas memiliki dua cara pengukuran dasar ventilasi. Pengukuran tersebut adalah :

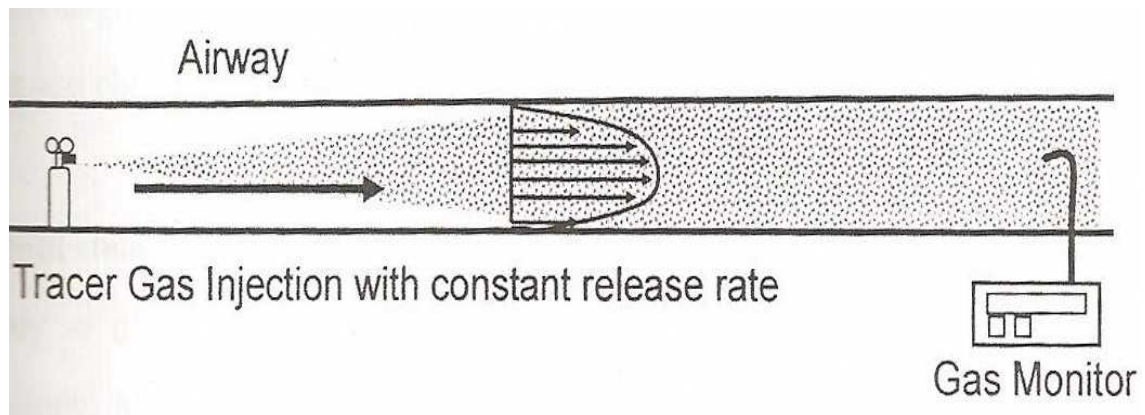
1. Pengukuran Aliran Udara dalam Jaringan Udara atau Suatu Saluran Udara

Pengembangan dan promosi terhadap metode *tracer gas* ini dilakukan oleh Kennedy *et al.* (1987, 1989), CANMET (Canada Centre of Mining and Energy Technology) Mining Research Laboratories. Awalnya aplikasi metode *tracer gas* ini adalah untuk membuktikan indikasi kualitatif kondisi aliran udara.

Pengembangan selanjutnya dilakukan oleh Hardcastle *et al* (1992) untuk menghitung pengukuran kuantitatif dan kualitatif. Hardcastle melakukan pengukuran aliran udara dengan melakukan satu kali pengambilan sampel menggunakan alat semprot pada area yang spesifik seperti pada *crusher* dilokasi proses produksi. Kemudian sampel dianalisis untuk mendeteksi kebocoran udara. Penaksiran dilakukan dengan cara mengevaluasi sistem ventilasi tambahan, efisiensi terhadap pemindahan polutan, resistansi udara serta karakteristik kebocoran. Jika ditemukan adanya masalah dalam aliran udara, maka dilakukan pengambilan sampel pada area yang ditaksir mengalami kebocoran udara, sampai ditemukannya posisi yang tepat yang mengalami kebocoran.

Tingkat akurasi untuk pengukuran aliran udara menggunakan Anemometer sangat kecil. Kompleksnya aliran udara serta kecepatan udara yang diakibatkan oleh percabangan aliran, belokan atau tikungan akan menyebabkan sulitnya mengukur *profile* udara dengan alat Anemometer. Tetapi kesulitan ini bisa diatasi dengan Teknik Tracer Gas menggunakan debit konstan. Gas dengan konsentrasi yang telah diukur dilepaskan secara konstan dalam selang waktu yang tetap. Kemudian Alat akan mengukur/mencatat perubahan konsentrasi yang terjadi.

Ilustrasinya bisa dilihat pada Gambar 3.5 :



Gambar 3.5 Aliran udara pada jalur penambangan atau saluran (Sasaki.,2002)

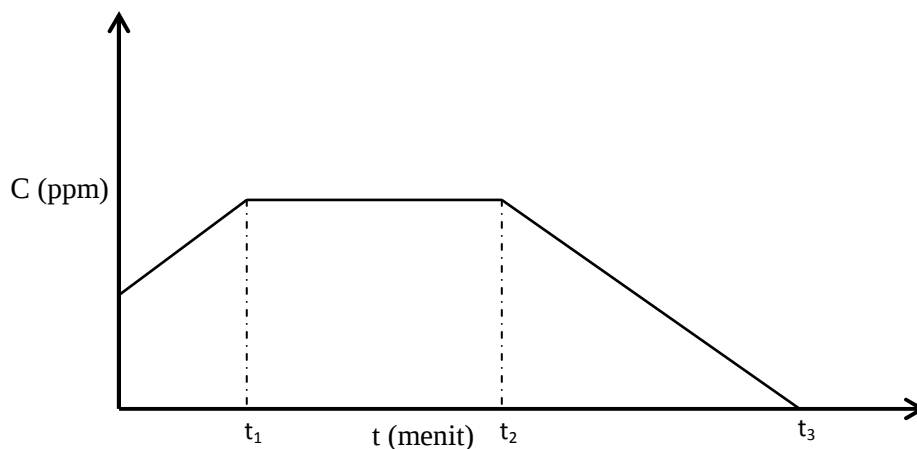
Berbeda dengan pengukuran menggunakan Anemometer, pengukuran dengan menggunakan Metode Tracer Gas mudah dilaksanakan walaupun aliran udara selalu

berubah-ubah secara fluktuatif dan mengakibatkan terjadinya peningkatan pencampuran udara pada suatu aliran udara tambang. Ketika memulai pengukuran, pertama harus ditetapkan bahwa jarak antara titik pelepasan gas dengan titik pengambilan sampel (titik pengukuran) sudah cukup jauh. Tujuan dari penetapan jarak ini adalah untuk meningkatkan kemampuan bercampurnya gas sampel dengan gas-gas yang ada didalam aliran udara tambang sepanjang diameter jaringan udara agar data yang kita dapatkan lebih akurat. Panjangnya jarak antara titik pelepasan gas dengan titik pengukuran biasanya sekitar 25 kali diameter area yang dilalui udara.

Jika dalam suatu jaringan terdapat satu atau dua buah belokan/tikungan dan cabang, maka aliran udara akan menjadi turbulen. Untuk itu, jarak antara titik pelepasan dengan titik pengukuran direkomendasikan sekitar 10 kali diameter area aliran udara.

Perhitungan kecepatan aliran udara

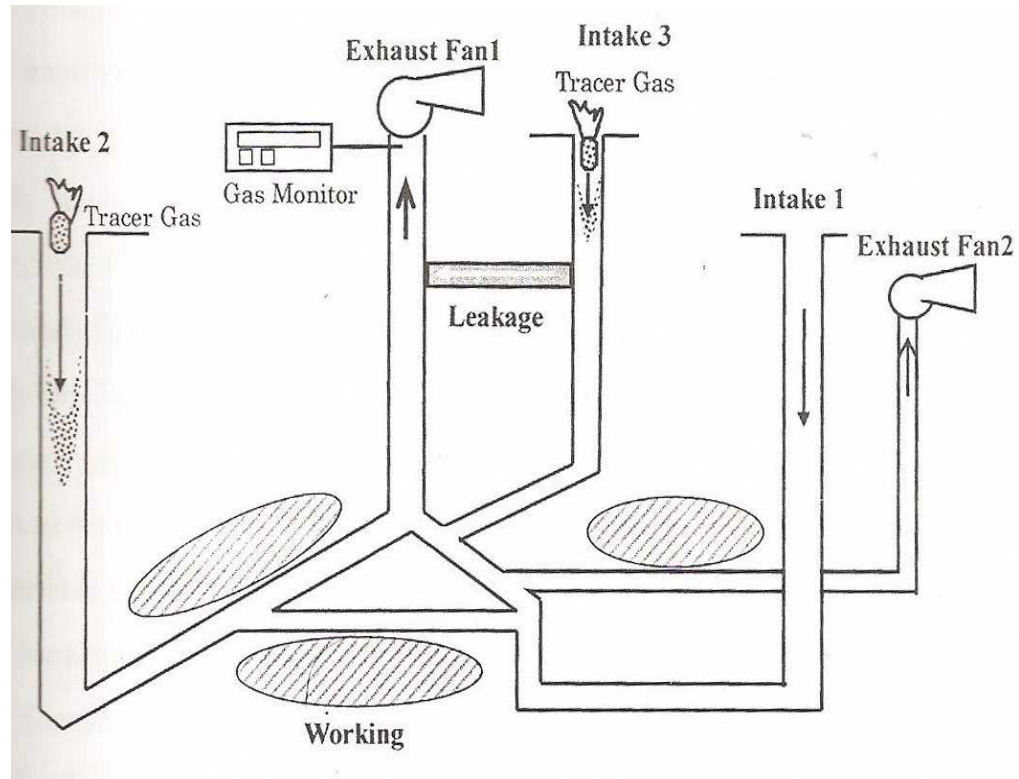
Hubungan antara besarnya konsentrasi dengan lamanya waktu tempuh udara dalam selang jarak tertentu bisa dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Grafik Mekanisme Konstan

Dari grafik terlihat bahwa konsentrasi gas dalam selang waktu tertentu berubah secara tetap (tanpa ada perubahan yang terlalu signifikan)

2. Pengukuran Kebocoran Udara dengan Mekanisme Injeksi Seketika

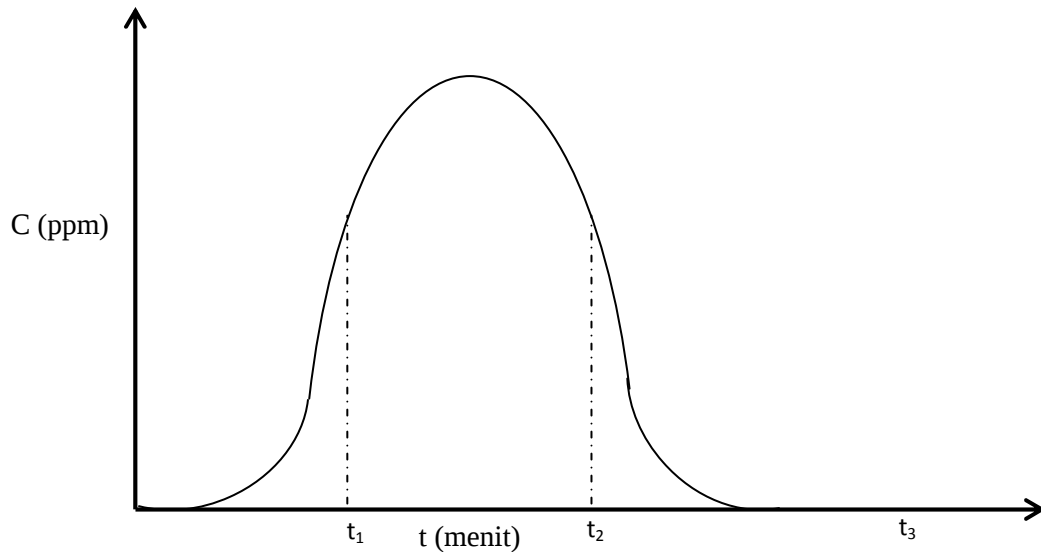


Gambar 3.7 Mekanisme injeksi seketika (Sasaki,2002)

Meskipun kita mengetahui terjadinya kebocoran udara pada suatu tambang, tapi akan sangat sulit untuk menentukan lokasi kebocoran serta kuantitas dari kebocoran udara tersebut. Untuk itu dibutuhkan suatu metode yang bisa memberikan solusi terhadap kesulitan yang terjadi yaitu dengan menggunakan Metode *Tracer Gas*.

Untuk mencari dan mengetahui keberadaan kebocoran udara, Tracer Gas dilepaskan pada jalur aliran udara masuk dan akan keluar melalui *Exhaust Fan*. Sepanjang perjalanan udara menuju jalur keluar, terjadi perubahan konsentrasi gas yang sebelumnya telah bercampur dengan campuran udara lain (Gambar 3.7). Perubahan konsentrasi ini yang akan kita ukur dengan menggunakan alat ukur *Tracer Gas*. Pemodelan bisa dilakukan untuk mengoptimalkan sistem ventilasi suatu tambang,

tetapi akan membutuhkan waktu yang banyak karena kompleks dan rumitnya masalah ventilasi. Dengan menggunakan Metode *Tracer Gas*, kita secara cepat bisa mengetahui masalah kebocoran udara serta lokasi kebocoran udara pada tambang.



Gambar 3.8 Grafik Mekanisme Pulsa

3.4 GAS SF_6

Gas yang digunakan sebagai Gas Tracer adalah SF_6 . Sifat-sifat gas SF_6 adalah sebagai berikut :

1. Titik didih

Gas akan mengalami pendidihan pada suhu $63,8^{\circ}\text{C}$, jika suhu ditingkatkan maka gas akan mengalami penguapan.

2. Titik beku

Gas akan mengalami pembekuan pada saat suhu $-50,8^{\circ}\text{C}$.

3. Berat molekul

Berat molekul dari gas SF_6 adalah 146,06 gram/mol. Berat molekul ini merupakan penjumlahan dari berat tiap-tiap unsur penyusun gas tersebut yakni 1 unsur Sulfur dan 2 unsur Flour.

4. Massa Jenis

Massa Jenis gas pada tekanan 1 atm adalah $6,06 \text{ kg/m}^3$. Perhitungan massa jenis dilakukan dengan membandingkan berat molekul gas terhadap berat molekul air kemudian dikalikan dengan berat jenis air.

5. Mudah larut dalam air

Hal ini disebabkan ikatan kimia antara dua buah unsur pembentuknya tidak begitu kuat.

6. Tidak beracun

Tetapi dalam konsentrasi yang tinggi akan menyebabkan pengurangan oksigen karena terjadinya pengikatan O_2 dan H^+ yang membentuk asam Sulfat sehingga membahayakan kehidupan.

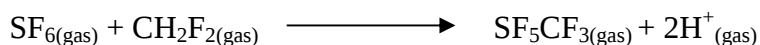
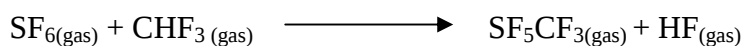
7. Tidak berbau dan tidak meledak.

8. Penggunaan dalam kelistrikan tidak membahayakan.

9. Bersifat stabil

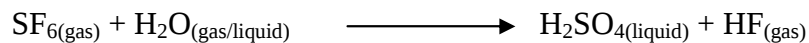
Gas SF_6 bersifat stabil karena reaksi kimianya dengan senyawa yang lain sangat rendah

SF_6 pada industri kelistrikan digunakan sebagai gas penyekat untuk menghindari kerusakan sirkuit pada tegangan tinggi, tetapi efek samping dari penguapan gas SF_6 ini adalah terbentuknya gas SF_5CF_3 dan gas HF . Hal ini disebabkan reaksi kimia antara gas SF_6 dengan CHF_3 dan CH_2F_2 . Gas SF_5CF_3 berbahaya untuk kesehatan karena menghasilkan *Fluorocarbon*



Jika gas SF_6 dalam jumlah yang besar, maka Gas HF (asam) yang terbentuk juga memiliki konsentrasi besar sehingga berbahaya terhadap kesehatan manusia.

Gas SF₆ merupakan sejenis zat kimia yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun, tidak meledak, dan dapat larut dalam air atau cairan. Gas SF₆ memiliki berat jenis 6.2 gram/Liter. Gas SF₆ sering digunakan secara luas sebagai pencari jejak, maksudnya gas ini sering digunakan untuk mengetahui arah dan pola aliran udara suatu sistem penambangan. Gas ini bereaksi dengan uap air sehingga membentuk asam anorganik yaitu *Asam Fluoride* (HF) dan *Asam Sulfat* (H₂SO₄).



Kedua asam ini tidak membahayakan karena penggunaan gas SF₆ tidak dalam konsentrasi yang besar sehingga aman bagi pekerja dan alat kerja. Keberadaan sumber-sumber yang mudah menyala seperti gas alam, lilin, lampu akan menyebabkan *dissosiasi* (pemisahan) dari gas SF₆ dan mengalami pencampuran atau bereaksi dengan emisi yang ditimbulkan oleh sumber-sumber tersebut.

Akibat dari pencampuran SF₆ yang terdissosiasi dengan sumber panas ini menyebabkan berkurangnya konsentrasi gas SF₆ sekitar 5% karena terjadinya aliran udara. Bentuk penggabungan gas SF₆ dengan sumber panas tersebut berasal dari produk utama dan produk kedua dari dissosiasi gas SF₆, terutama H₂SO₄, SO₂, HF, dan *Particulate Matter* (PM). Penggabungan gas SF₆ yang terdissosiasi akan menurun dengan signifikan jika konsentrasi gas SF₆ tetap dijaga pada kadar yang rendah (dalam ukuran *part per billion/ppb*). Sehingga produk sampingan ini dipastikan tidak akan membahayakan kesehatan dan keselamatan kerja di front penambangan.

Pada pelaksanaan pengukuran, dilakukan penyiapan berbagai ukuran gas SF₆ untuk tiap-tiap lokasi pengukuran. Selain untuk mendapatkan keseragaman dari sampel-sampel pencampuran udara yang akan dibaca juga untuk menentukan nilai rata-rata dari konsentrasi gas yang terbaca setelah melewati *filter*. Untuk melakukan penghitungan rata-rata, sampel diambil dari tiap – tiap aliran udara (gas SF₆ telah dilepaskan sebelumnya). Sampel – sampel ini diambil untuk menetapkan volume gas yang akan dilepaskan pada percobaan berikutnya.

Pencatatan konsentrasi gas SF₆ yang terjadi secara terus menerus sampai waktu yang telah ditentukan atau sampai konsentrasi gas SF₆ benar-benar tidak terdeteksi lagi (terjadi perubahan konsentrasi yang signifikan).

3.5 Koefisien Difusi

3.5.1 Konsep Difusi

Suatu zat yang masuk kedalam aliran udara dalam selang jarak dan waktu tertentu akan mengalami penyebaran ke segala arah. Penyebaran ini tidak akan merubah zat tersebut secara kimia, tetapi akan merubah gas tersebut secara fisik, artinya terjadi perubahan konsentrasi gas yang semula terkumpul dalam jumlah besar menjadi tersebar dengan konsentrasi yang lebih kecil dari konsentrasi semula. Perubahan ini merupakan perubahan karena faktor internal zat, sedangkan akibat faktor eksternal seperti adanya aliran udara akan menyebabkan zat tersebut bergerak kesegala arah secara acak.

Dispersi suatu zat yang dilepaskan pada suatu aliran tertutup pada aliran laminar, dideskripsikan oleh koefisien difusi. Koefisien difusi yang merupakan fungsi dari profil kecepatan pada saluran tertutup pada arah aksial dan difusi molekuler pada arah radial. Koefisien difusi tersebut disebut sebagai *virtual diffusion coefficient* yang diperoleh dari pengamatan distribusi konsentrasi pada titik pengamatan. Hal yang sama dapat dianalogikan untuk aliran turbulen. Penyebaran zat yang terdifusi secara acak sepanjang aliran dideskripsikan dengan persamaan umum:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} \quad (3-8)$$

dimana K adalah koefisien difusi teoritik, C adalah konsentrasi zat yang terdifusi dan $x_1 = x - \bar{u}t$ ($\bar{u}$ adalah kecepatan aliran)

Taylor (1954) menemukan bahwa koefisien difusi virtual untuk aliran turbulen adalah

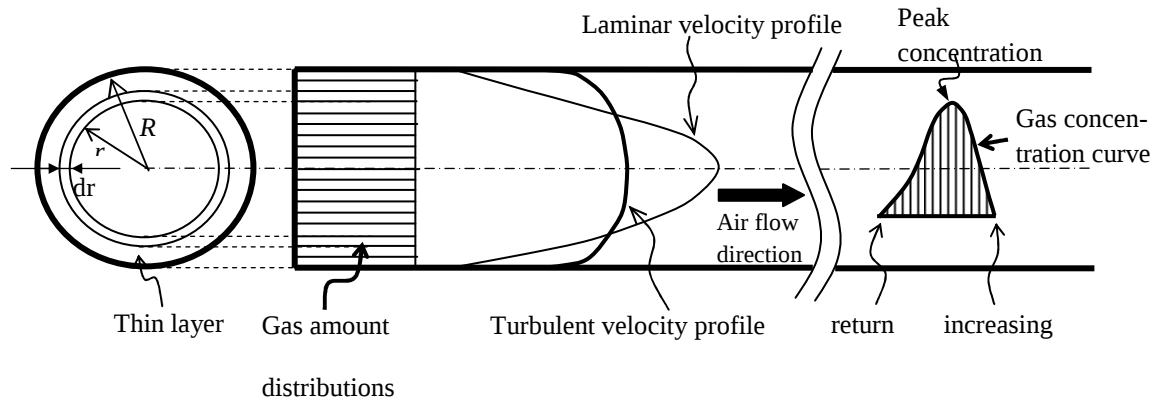
$$D = 10.1Ru^* \quad (3-9)$$

dimana D adalah koefisien difusi virtual, R adalah panjang pipa dan u^* adalah kecepatan friksi.

Koefisien difusi virtual, D , bisa dihitung berdasarkan gradien konsentrasi. Dimensi dari D adalah (L^2/t) atau $(m^2/menit)$, sama seperti K . Nilai D untuk turbulen sangat tergantung oleh distribusi kecepatan pada penampang saluran, hal ini berbeda dengan kondisi laminar dimana nilai D tergantung oleh sifat molekuler zat yang terdifusi. Nilai koefisien difusi yang diperoleh dari pengamatan konsentrasi terhadap waktu dengan cara perbandingan kurva hasil pengukuran dilapangan dengan kurva hasil perhitungan, simbol D diganti dengan simbol E .

3.5.2 Koefisien Difusi Taylor untuk Aliran Turbulen

Gambaran mengenai difusi suatu zat yang dilepaskan pada suatu aliran dapat dilihat pada Gambar 3.9. Pada ilustrasi tersebut digambarkan peranan profil kecepatan terhadap konsentrasi gas, dimana pada tengah saluran kecepatan lebih besar dibandingkan dengan di pinggir saluran sehingga zat juga akan terbawa sesuai dengan kecepatan tersebut. Selain itu dimungkinkan juga perpindahan posisi zat kearah radial. Pada akhirnya kurva konsentrasi terhadap waktu di titik pengamatan mendekati bentuk kurva simetrik Gaussian.



Gambar 3.9 Perubahan konsentrasi gas dalam aliran udara (Widodo, 2006)

Persamaan Taylor (1954) untuk menentukan konsentrasi di titik pengukuran adalah sebagai berikut::

$$C_{(x,t)} = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-(x - \bar{u}t)^2}{4Dt}\right) \quad (3-10)$$

Keterangan:

- M adalah volume gas (ml atau cc).
- A adalah luas permukaan (m²).
- D adalah koefisien difusi (m²/detik).
- t adalah total waktu (menit).
- x adalah panjang aliran udara (m).
- $\bar{u}$ adalah kecepatan aliran udara (m²/menit).

Dimana D merupakan nilai koefisien difusi gas.

Perhitungan Koefisien Difusi (bilangan Reynold, $Re > 4000$) untuk aliran turbulen digunakan dengan persamaan Taylor :

$$D = 10.1Ru^* \quad \text{maka } u^* = \bar{u} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (3-11)$$

dimana f adalah nilai faktor friksi , $\bar{u}$ adalah nilai kecepatan rata-rata, dan R adalah panjang aliran udara

Untuk permukaan yang tidak kasar, nilai *friction factor* dihitung dengan persamaan Blasius :

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (3-12)$$

Re merupakan bilangan Reynold

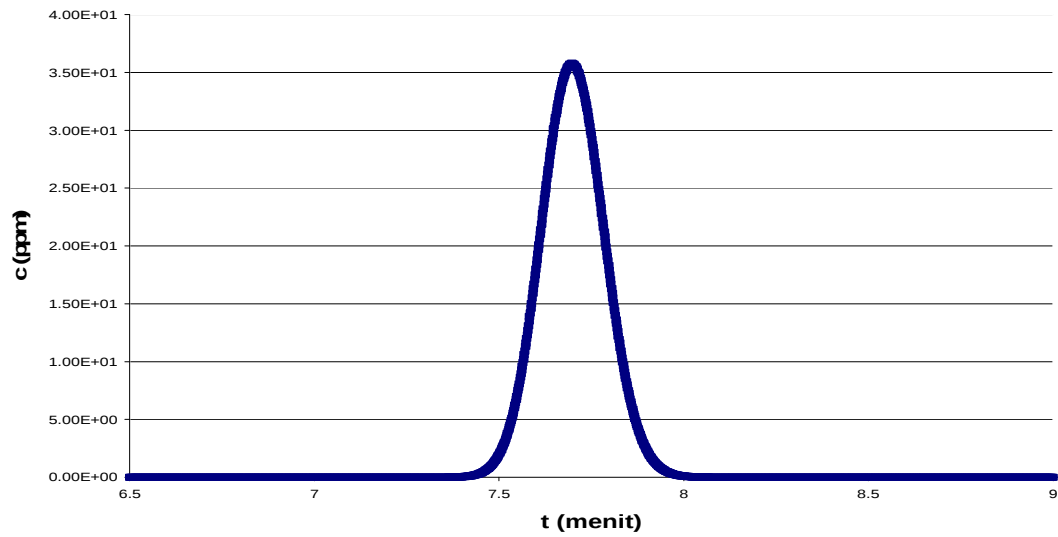
Sedangkan untuk permukaan yang kasar, nilai *friction factor* dihitung dengan persamaan Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \frac{R}{K} + 1.74 \quad (3-13)$$

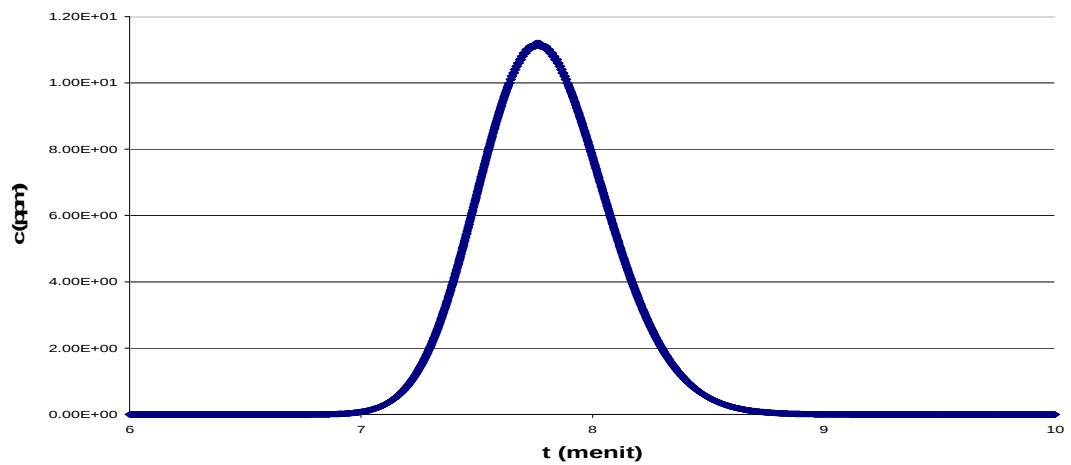
Dimana nilai K/R adalah nilai kekasaran relatif

Untuk nilai koefisien difusi yang sangat kecil, selang waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *peak* lebih kecil karena kecepatan penyebaran udara juga relatif kecil. Sedangkan dengan nilai koefisien difusi yang besar, selang waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *peak* juga akan besar. *Peak* dengan koefisien difusi lebih kecil akan bernilai lebih tinggi dibandingkan *peak* dengan koefisien difusi yang besar.

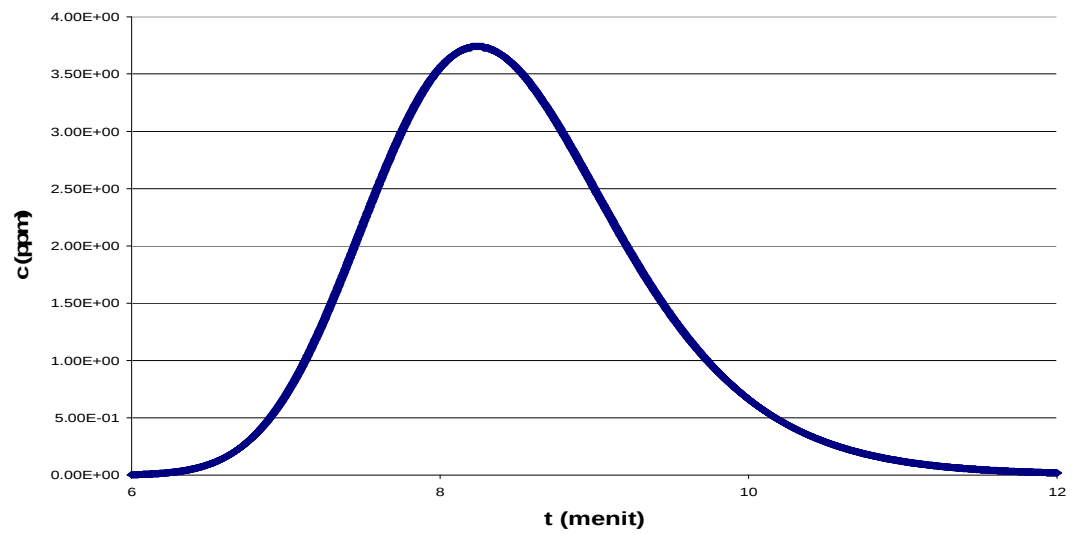
Tipikal kurva konsentrasi terhadap waktu untuk pengukuran *tracer gas* di *downstream* bisa dilihat pada Gambar 3.10 sampai 3.12



Gambar 3.10 Grafik Konsentrasi terhadap Waktu dengan Koeifisien Difusi yang sangat kecil ($D \ll$)



Gambar 3.11 Grafik Konsentrasi terhadap Waktu dengan Koeifisien Difusi yang Ideal atau Normal (D Ideal atau Normal)



Gambar 3.12 Grafik Konsentrasi terhadap Waktu dengan Koeifisien Difusi yang sangat besar ($D \gg$)