

BAB III

LANDASAN TEORI

Untuk melakukan kajian terhadap sistem ventilasi tambang di Blok Cikoneng yang terdiri dari 2 (dua) komponen yaitu rute jaringan X-cut-2 dan rute jaringan *Decline* Cikoneng, diperlukan parameter – parameter sistem ventilasi tambang baik secara teoritis maupun empiris. Parameter karakteristik sistem ventilasi tambang dapat diketahui dan ditentukan melalui:

3.1 Sifat – Sifat *Psychrometric* Udara

Psychrometry adalah ilmu yang mempelajari sifat *psychrometric* (panas dan kelembaban) udara dalam kondisi tertentu selama proses pengendalian kelembaban dan temperatur. Ilmu *psychrometry* juga mempelajari termodinamika campuran udara – uap air. Karena udara normal adalah campuran dari udara kering dan uap air. Karena perubahan kondisi berpengaruh pada uap air, penentuan campuran udara – uap air selama proses *air conditioning* menerapkan prinsip termodinamika.

Penentuan sifat psikrometrik udara pada kondisi tertentu merupakan persyaratan untuk memecahkan permasalahan yang berhubungan dengan proses *air conditioning*. Terdapat 2 (dua) cara mencari sifat psikrometrik ini dengan menggunakan tabel *psychrometric* dan grafik *psychrometric*.

Pada tekanan barometrik, 2 (dua) sifat *psychrometric* udara menentukan kondisi udara. Sifat *psychrometric* yang paling mudah diukur adalah suhu bola kering dan suhu bola basah. Sebenarnya masih banyak sifat – sifat *psychrometric*

lainnya yang dapat ditentukan, meskipun salah satu yang penting dalam proses entlapi adalah suhu bola kering dan suhu bola basah.

- Tekanan barometrik, (P_b) adalah tekanan atmosfer yang dibaca pada alat barometer, dalam satuan in.Hg atau psi (mm Hg atau Pa).
- Suhu bola kering (*Dry bulb temperature*) adalah suhu yang ditunjukkan oleh termometer kering, suatu ukuran kandungan panas yang ada pada udara; dalam satuan °C atau °F.
- Suhu bola basah (*Wet bulb temperature*) adalah suhu dimana air mengalami penguapan di udara yang membawa udara dalam keadaan jenuh secara adiabatik pada suhu tersebut, menjadi ukuran kapasitas penguapan udara dan ditunjukkan dengan termometer yang sumbu yang dibasahi; dalam satuan satuan °C atau °F.
- Kelembaban relatif (*Relatif humidity*) adalah perbandingan uap udara pada kondisi tertentu dan jenuh pada suhu konstan.

3.2 Perhitungan Kebutuhan Udara Segar

Jenis kegiatan manusia dapat dibedakan atas :

- Dalam keadaan istirahat
- Dalam melakukan kegiatan kerja yang moderat, misalnya kerja kantor
- Dalam melakukan kegiatan keras, misalnya olahraga atau kerja di tambang

Atas jenis kegiatan kerja yang dilakukan ini akan diperlukan udara segar yang berlainan jumlahnya. Dalam suatu pernafasan terjadi kegiatan menghirup udara segar dan menghembuskan udara hasil pernafasan. Laju pernafasan per menit didefinisikan sebagai banyaknya udara yang dihirup dan dihembuskan per satuan waktu 1 (satu) menit. Laju pernafasan ini akan berlainan bagi setiap kegiatan

manusia yang berbeda, makin keras kerja yang dilakukan makin besar angka laju pernafasannya.

Perlu juga dalam hal ini didefinisikan angka bagi atau nisbah pernafasan (*respiration quotient*) yang didefinisikan sebagai nisbah antara jumlah karbondioksida (CO_2) yang dihembuskan terhadap jumlah oksigen (O_2) yang dihirup pada suatu proses pernafasan. Pada manusia yang bekerja keras, angka bagi pernafasan ini (*respiration quotient*) sama dengan 1 (satu), yang berarti jumlah CO_2 yang dihembuskan sama dengan jumlah O_2 yang dihirup pada pernafasannya. Tabel 3.1 berikut memberikan informasi persyaratan pernafasan ketiga jenis kegiatan secara umum.

Tabel 3.1
Persyaratan Pernafasan

Kegiatan Kerja	Laju Pernafasan Per menit	Udara Terhirup per menit dalam in^3/menit ($10^{-4}\text{m}^3/\text{detik}$)	Oksigen dikonsumsi, cfm ($10^{-5}\text{m}^3/\text{detik}$)	Angka bagi pernafasan (<i>respiration quotient</i>)
Istirahat	12-18	300 - 800 (0,82 - 2,18)	0,01 (0,47)	0,75
Kerja Moderat	30	2800 - 3600 (7,64 - 9,83)	0,07 (3,3)	0,9
Kerja Keras	40	6000 (16,4)	0,10 (4,7)	1,0

Sumber : Forbes and Grove, 1954

Ada 2 (dua) cara perhitungan untuk menentukan jumlah udara yang diperlukan per orang untuk pernafasan, yakni :

- Atas dasar kebutuhan O_2 minimum, yakni 19,5%.

Jumlah udara yang dibutuhkan = Q cfm

Pada pernafasan, jumlah O_2 akan berkurang 0,1 cfm; sehingga akan dihasilkan persamaan untuk jumlah oksigen sebagai berikut :

$$0,21Q - 0,1 = 0,195Q$$

(Kandungan O₂) – (Jumlah O₂ pada pernafasan) = (Kandungan O₂ minimum untuk udara pernafasan)

$$Q = \frac{0,1}{(0,21-0,195)} = 6,7 \text{ cfm} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{detik}$$

- Atas dasar kandungan CO₂ maksimum, yaitu 0,5%.

Dengan harga angka bagi pernafasan = 1; maka jumlah CO₂ pada pernafasan akan bertambah sebanyak $1 \times 0,1 = 0,1$ cfm.

$$0,0003Q - 0,1 = 0,005Q$$

(Kandungan O₂) – (Jumlah O₂ pada pernafasan) = (Kandungan O₂ minimum untuk udara pernafasan)

$$Q = \frac{0,1}{(0,0003-0,005)} = 21,3 \text{ cfm} = 0,01 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Dari kedua cara perhitungan tadi, yaitu atas kandungan O₂ minimum 19,5% dalam udara pernafasan dan kandungan maksimum CO₂ 0,5% dalam udara pernafasan, diperoleh angka kebutuhan udara segar bagi pernafasan seseorang 6,7 cfm dan 21,3 cfm. Dalam hal ini angka kebutuhan udara yang digunakan adalah dengan jumlah yang paling besar, yakni 21,3 cfm sebagai angka kebutuhan seseorang untuk pernafasan.

3.3 Banyaknya Aliran Udara (*Quantity Flowrate*)

Banyaknya aliran udara (Q) merupakan volume udara yang mengalir pada suatu saluran atau jaringan per satuan waktu. Untuk menghitung banyaknya aliran udara (Q) dapat menggunakan rumus empiris sebagai berikut :

$$Q = A \times V$$

Keterangan :

Q : Banyaknya aliran udara (m^3/detik)

A : Luas penampang *airways* (m^2)

V : Kecepatan aliran udara (m/detik)

3.4 Tahanan Saluran Udara Tambang (*Airway Resistance*)

Karena hilangnya tekanan sebuah saluran udara berbanding lurus dengan kuadrat jumlah udara yang mengalir melalui itu, hubungan kuantitas *head* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan dengan memasukkan konstanta proporsionalitas. Jadi persamaan *Atkinson's* dapat ditulis sebagai berikut :

$$H_l = RQ^2$$

Dimana :

H_l : *Head Loss* (Pa)

R : Tahanan *Airways* ($\text{N}\cdot\text{s}^2 / \text{m}^8$)

Q : Banyaknya aliran udara (m^3/detik)

Sebenarnya, istilah konstanta K, O, L, L_e , dan A yang dikelompokkan ke konstanta tunggal, yaitu resistensi (R) seperti dibawah :

$$R = \frac{KO(L+L_e)}{5.2A^3}$$

Atau

$$R = \frac{KO(L+L_e)}{A^3}$$

Dimana :

R : Tahanan $\text{min}^2 / \text{ft}^6$ ($\text{N}\cdot\text{s}^2 / \text{m}^8$)

K : Koefisien Gesekan (kg/m^3)

O : Keliling *Airways* (m)

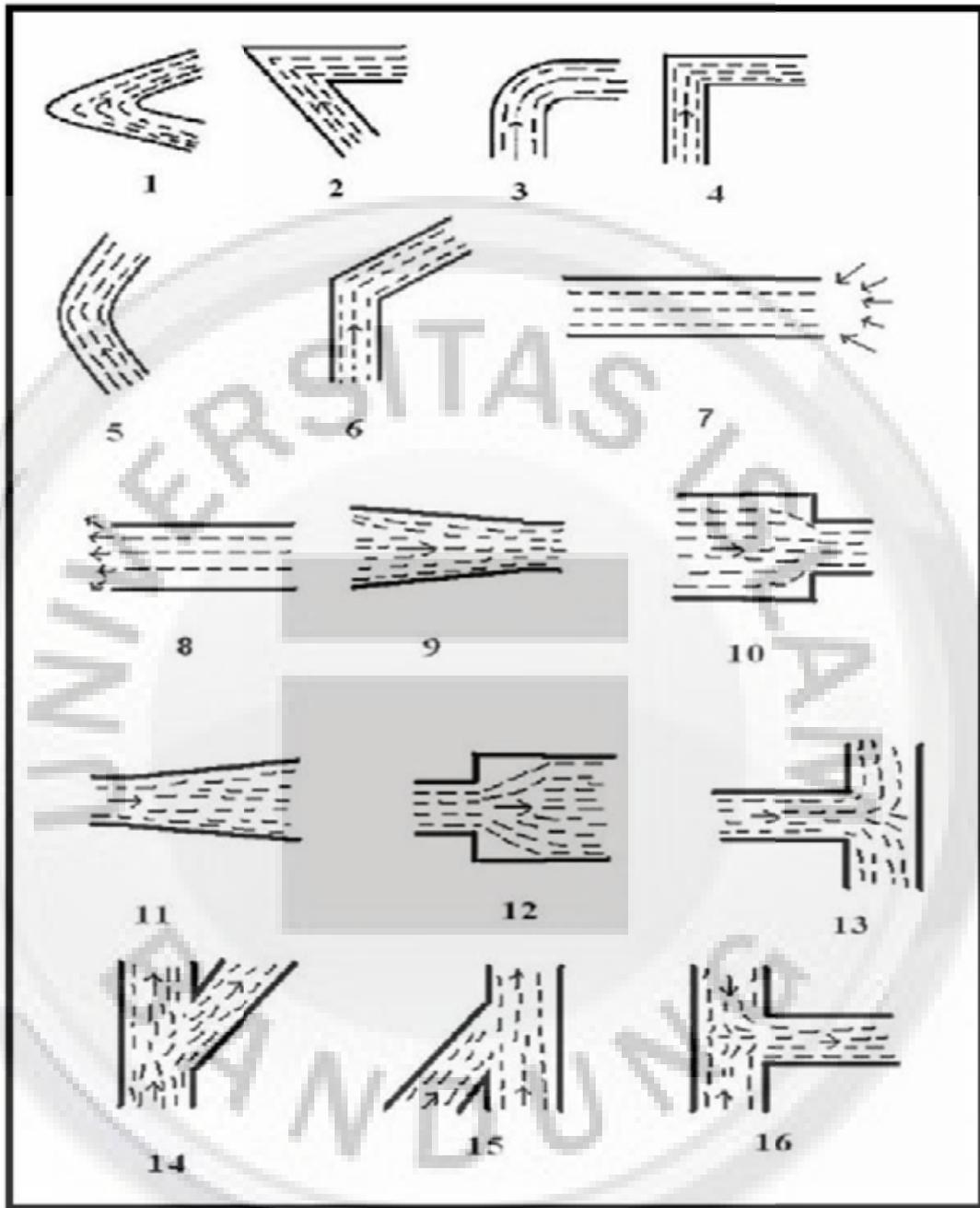
L : Panjang *Airways* (m)

Le : Panjang Ekivalen (m)

A : Luas *Airways* (m²)

Nilai koefisien gesekan (K) dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 3.3 yang didasarkan pada parameter material dinding *airways*. Untuk menentukan panjang ekivalen ditentukan dengan menggunakan Gambar 3.1 yang kemudian disesuaikan dengan Tabel 3.2 untuk menentukan nilainya.





Sumber : LIPI ITB 2012

Gambar 3.1
Parameter Penentuan Panjang Ekuivalen (L_e)

Tabel 3.2
Nilai Panjang Ekuivalen (Le)

No	Tipe Jalur Udara	Le	
		(ft)	(m)
1	Belokan, sudut tajam, membulat	3	1
2	Belokan, sudut tajam, meruncing	150	45
3	Belokan, sudut 90°, membulat	1	1
4	Belokan, sudut 90°, meruncing	70	20
5	Belokan, sudut tumpul, membulat	1	1
6	Belokan, sudut tumpul, meruncing	15	5
7	Jalur udara masuk	20	6
8	Jalur udara keluar	65	20
9	Jalur menyempit secara bertahap	1	1
10	Jalur menyempit langsung	10	3
11	Jalur meluas secara bertahap	1	1
12	Jalur meluas langsung	20	6
13	<i>Splitting</i> lurus	30	10
14	<i>Sliting</i> 90°	200	60
15	<i>Junction</i> lurus	60	20
16	<i>Junction</i> 90°	30	10

Sumber : LIPI ITB 2012

Tabel 3.3
Parameter Penentuan Koefisien Gesekan dan Faktor Gesekan

	Friction factor, k kg/m ³	Coefficient of friction, f (dimensionless)
Rectangular Airways		
Smooth concrete lined	0.004	0.0067
Shotcrete	0.0055	0.0092
Unlined with minor irregularities only	0.009	0.015
Girders on masonry or concrete walls	0.0095	0.0158
Unlined, typical conditions no major irregularities	0.012	0.020
Unlined, irregular sides	0.013	0.023
Unlined, rough or irregular conditions	0.016	0.027
Girders on side props	0.019	0.032
Drift with rough sides, stepped floor, handrails	0.04	0.067
Steel Arched Airways		
Smooth concrete all round	0.004	0.0067
Bricked between arches all round	0.006	0.01
Concrete slabs or timber lagging between flanges all round	0.0075	0.0125
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0.009	0.015
Lagged behind arches	0.012	0.020
Arches poorly aligned, rough conditions	0.016	0.027
Metal Mines		
Arch-shaped level drifts, rock bolts and mesh	0.010	0.017
Arch-shaped ramps, rock bolts and mesh	0.014	0.023
Rectangular raise, untimbered, rock bolts and mesh	0.013	0.022
Bored raise	0.005	0.008
Beltway	0.014	0.023
TBM drift	0.0015	0.0025
Coal Mines: Rectangular entries, roof-bolted		
Intakes, clean conditions	0.009	0.015
Returns, some irregularities/sloughing	0.01	0.017
Belt entries	0.005 to 0.011	0.0083 to 0.018
Cribbed entries	0.05 to 0.14	0.08 to 0.23
Shafts¹		
Smooth lined, unobstructed	0.003	0.006
Brick lined, unobstructed	0.004	0.0067
Concrete lined, rope guides, pipe fittings	0.0065	0.0108
Brick lined, rope guides, pipe fittings	0.0075	0.0125
Unlined, well trimmed surface	0.01	0.0167
Unlined, major irregularities removed	0.012	0.020
Unlined, mesh bolted	0.0140	0.023
Tubing lined, no fittings	0.007 to 0.014	0.0012 to 0.023
Trick lined, two sides buntons	0.018	0.030
Two side buntons, each with a tie girder	0.022	0.037
Longwall faceline with steel conveyor and powered supports²		
Good conditions, smooth wall	0.035	0.058
Typical conditions, coal on conveyor	0.05	0.083
Rough conditions, uneven faceline	0.055	0.108
Ventilation ducting³		
Collapsible fabric ducting (forcing systems only)	0.0037	0.0062
Flexible ducting with fully stretched spiral spring reinforcement	0.011	0.018
Fibreglass	0.0024	0.0040
Spiral wound galvanized steel	0.0021	0.0035

Sumber : Malcolm J. Mc.Pherson, 1993

Persamaan Atkinson's menyatakan bahwa hilangnya *head* (h_l) untuk saluran udara (*airways*) yang diberikan adalah sama dengan tahanan kali kuadrat dari jumlah udara yang mengalir melalui saluran udara. Namun secara teoritis, *head loss* (h_l) adalah kehilangan energi pada aliran udara di dalam sistem jaringan ventilasi tambang bawah tanah yang disebabkan oleh faktor gesekan antara udara dengan dinding saluran udara dan akibat adanya belokan, percabangan dan perubahan luas penampang saluran udara.

3.5 Hubungan Antara *Head* dan Banyaknya Aliran Udara

Hubungan dasar antara *head* dengan banyaknya aliran udara pada kondisi densitas udara standar, dinyatakan dengan persamaan *Atkinson's* sebagai berikut :

$$H = R \times Q^2$$

Keterangan :

H : *Head* (Pa)

R : Tahanan *Airways* ($N \cdot s^2 / m^8$)

Q : Banyaknya aliran udara ($m^3/detik$)

Sedangkan untuk lokasi dengan kondisi udara tidak standar, maka persamaan *Atkinson's* di atas perlu dikoreksi dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$H = R \times Q^2 \times \frac{w}{w_{std}}$$

Keterangan :

H : *Head* (Pa)

R : Tahanan saluran udara ($N \cdot s^2 / m^8$)

Q : Banyaknya aliran udara ($m^3/detik$)

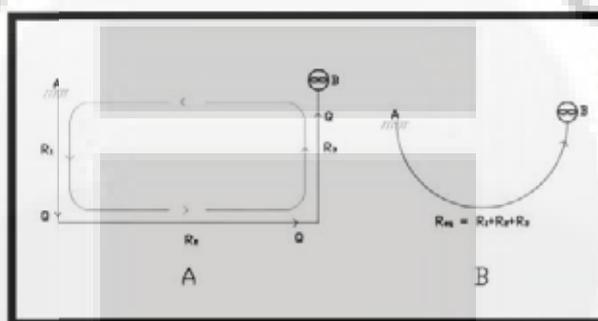
w : *Density* udara (gr/m^3)

w_{std} : *Density* udara standar ($0,075 \text{ gr/m}^3$)

3.6 Jaringan Ventilasi Tambang Rangkaian Seri

Dalam sistem jaringan ventilasi, ada 2 (dua) kombinasi sambungan lubang – lubang bawah tanah (*airyaws*), yaitu seri, paralel dan seri paralel. Ada kemungkinan kedua rangkaian tersebut dapat dikombinasikan menjadi rangkaian yang kompleks.

Rangkaian seri didefinisikan sebagai rangkaian yang saluran udara diatur dari ujung ke ujung, jumlah udara yang mengalir melalui setiap saluran udara adalah sama. Contoh rangkaian seri ditampilkan dalam Gambar 3.2



Sumber : Malcolm J. Mc.Pheron, 1993

Gambar 3.2

(a) Jalur Udara Seri (b) Jumlah Jalur Udara

Gambar 3.2 menggambarkan rangkaian seri sederhana yang terdiri dari saluran udara 1, 2 dan 3 dengan tahanan R_1 , R_2 , R_3 dan dan *head loss* H_1 , H_2 dan H_3 , masing-masing. *Head statis fan* adalah H_m . Jumlah udara yang mengalir melalui setiap jalur udara adalah sama; sehingga dalam bentuk umum

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots$$

Menerapkan hukum kedua *Kirchhoff* untuk rangkaian ini dalam hasil arah berlawanan sebagai berikut:

$$H_{l_1} + H_{l_2} + H_{l_3} - H_m = 0$$

Untuk kasus ini, *head fan* sama dengan total *head loss* (*head statis*) dari poin A ke B. Karena kita sering berhubungan dengan bagian-bagian dari sebuah rangkaian ventilasi yang mungkin tidak berkaitan, persamaan umum berikut dapat ditulis:

$$H_l = H_{l_1} + H_{l_2} + H_{l_3} + \dots$$

Ini menyatakan bahwa total *head loss* untuk rangkaian seri sama dengan penjumlahan dari *head loss* saluran udara individu. Persamaan dapat dinyatakan dalam hal kuantitas dan tahanan masing-masing saluran udara oleh:

$$H_l = R_{1|Q|Q} + R_{2|Q|Q} + R_{3|Q|Q}$$

Dalam rangkaian seri, kuantitas dan arah aliran udara melalui setiap saluran yang sama. Oleh karena itu, persamaan sebelumnya dapat ditulis sebagai berikut tanpa mendistribusikan keabsahan tanda konvensi yang diadopsi:

$$H_l = R_1 Q^2 + R_2 Q^2 + R_3 Q^2 + \dots$$

eliminasi konstanta Q^2 :

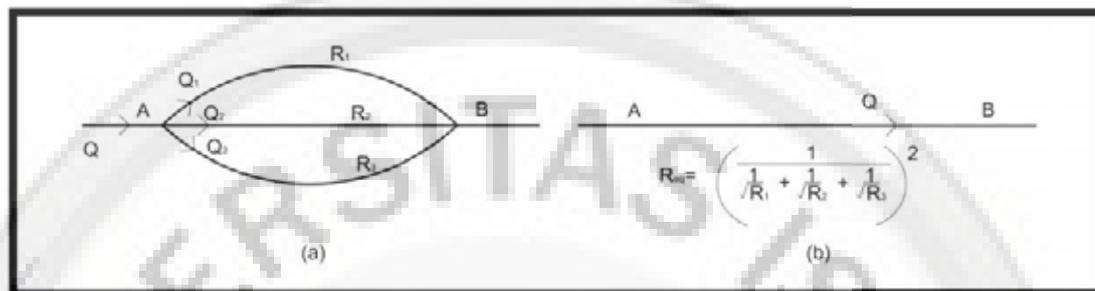
$$H_l = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots) Q^2 = R_{eq} Q^2$$

di mana R_{eq} disebut sebagai tahanan ekivalen dengan rangkaian seri. persamaan ini sehingga mendefinisikan tahanan ekivalen untuk rangkaian seri sebagai penjumlahan dari saluran udara individu. Oleh karena itu, persamaan umum berikut untuk tahanan seri dapat ditulis:

$$R_{eq} = \frac{H_l}{Q^2} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

3.7 Jaringan Ventilasi Tambang Rangkaian Paralel

Saluran udara dikatakan terhubung secara paralel ketika saluran udara yang bergabung pada saat yang sama dua node dan total aliran udara dibagi di antara kedua saluran udara (Gambar 3.3).



Sumber : Malcolm J. Mc.Pheron, 1993

Gambar 3.3
(a) Jalur Udara Paralel (b) Jumlah Jalur Udara

Dalam ventilasi tambang, praktik ini disebut pembagian dan percabangan. Ada dua bentuk pemisahan, diantaranya pemisahan alami terjadi ketika jumlah udara dibagi di antara cabang-cabang paralel dengan sendirinya tanpa regulasi dan pemisahan dikendalikan terjadi ketika kuantitas ditetapkan udara dibuat untuk mengalir melalui masing-masing cabang paralel dengan cara regulasi. Menurut hukum pertama *Kirchhoff's*, persamaan umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

Sehingga ketika saluran udara disusun secara paralel, jumlah total aliran udara adalah penjumlahan dari jumlah aliran udara yang mengalir melalui saluran udara individu. Menurut hukum kedua *Kirchhoff's*, juga dapat menunjukkan bahwa kerugian *head* untuk paralel saluran udara adalah sama.

$$H_1 = H_2 = H_3 = \dots$$