

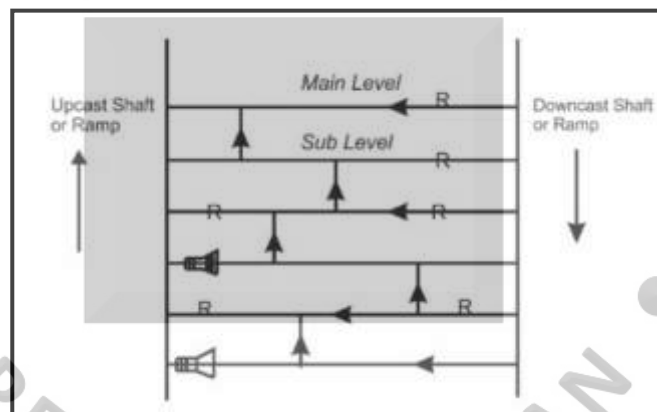
BAB III

LANDASAN TEORI

Untuk melakukan penelitian studi kinerja sistem ventilasi tambang dibutuhkan beberapa komponen penunjang baik secara teoritis maupun secara empiris. Komponen-komponen tersebut adalah sebagai berikut :

3.1 Sistem Ventilasi Tambang

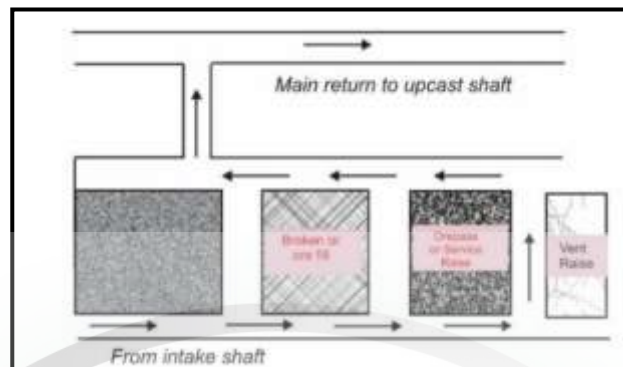
Ada dua tujuan dari ventilasi tambang. Pertama ventilasi utama harus mengalirkan udara melalui saluran utama ke *front* kerja sehingga kebutuhan udara segar terpenuhi. Kemudian udara kotor hasil aktifitas penambangan bawah tanah dihisap kembali ke permukaan. Kedua sistem ventilasi harus dirancang agar menghilangkan debu dan gas berbahaya. Tanpa adanya sistem ventilasi yang baik siklus produksi menjadi tidak efisien (Malcom and Mc Pherson 1994).



Sumber : Malcom and Mc Pherson, 1993.

Gambar 3.1
Komponen Sistem Ventilasi Untuk Tambang Logam

Dalam tambang bijih (*ore*) sistem ventilasi dirancang agar mensuplai udara bersih untuk manusia dan alat. Dikarenakan bentuk badan bijih bervariasi, maka ventilasi harus *flexible* untuk mensuplai udara ke *front* kerja. Dalam sistem ventilasi tambang bijih kipas tambahan diperlukan di masing-masing *drawpoint*, agar aliran udara melalui infrastruktur utama *stope*. Jaringan ventilasi pada area *stope* harus dijaga agar gas beracun hasil peledakan dapat dibersihkan dengan cepat dan efisien.



Sumber : Malcom and Mc Pherson, 1993.

Gambar 3.2

Contoh sistem ventilasi sederhana untuk *shrinkage* dan *cutt and fill*

3.1.1 *Fan*

Fan merupakan sumber udara utama selain ventilasi alami dalam tambang bawah tanah. *Fan* digunakan karena ventilasi alami sudah tidak dapat menjangkau kedalam tambang bawah tanah (Heriyadi, 2002). Mine Fan ditunjukkan untuk keadaan dinamis, karena aliran dan tekanan yang berubah – ubah secara konstan selama umur tambang beroperasi. Tambang logam yang lebih dalam diperlukan kontrol panas dan kelembaban agar kondisi area kerja dapat terpenuhi. Mine fan dipilih berdasarkan tekanan dan aliran yang sudah direncanakan sepanjang umur tambang mine (Gamble et al,2009).

Perancangan jaringan ventilasi yang dapat memenuhi kebutuhan udara, dibuat jalur yang cocok untuk udara mengalir menuju tambang bawah tanah terutama front kerja. Sistem ventilasi utama terdiri dari udara masuk (*intake*) yang mengalirkan udara segar ke area kerja tambang, dan menuju ke pembuangan (*exhaust*) setelah udara melewati ventilasi area kerja. Kipas angin (*fan*) dapat dipasang pada jalur udara masuk (*airshaft intake*), jalur udara keluar (*return airshaft*), atau keduanya, baik dipermukaan atau bawah.

A. Main Fan

Pada tambang bawah tanah *main fan* atau kipas utama diletakan dipermukaan. Terlebih dalam tambang bawah tanah batu bara kondisi tersebut merupakan sebuah keharusan. Dalam menyuplai udara masuk dapat dilakukan dua metode yaitu metode hembus (*blower*) dan metode hisap (*exhaust*). Dalam tambang bawah tanah biasanya juga dilakukan kombinasi tersebut guna memenuhi kebutuhan udara (Heriyadi, 2002).

Metode hembus menghasilkan tekanan lebih tinggi dibandingkan tekanan atmosfer dan mencegah terjebaknya gas berbahaya terperangkap dalam atmosfer di tambang bawah tanah, sedangkan metode hisap menghasilkan tekanan lebih rendah dibandingkan tekanan dalam tambang, sehingga dapat menarik gas berbahaya keluar (McPherson, 1993). Terdapat beberapa kerugian, karena apabila dioperasikan dengan tekanan sangat tinggi dekat jalur masuk udara, diperlukan pintu angin yang kuat agar tidak terjadi banyak kebocoran udara dan menyebabkan menurunnya efisiensi.

B. Booster Fan

Fan Booster adalah kipas bawah tanah yang dipasang secara seri dengan Main Fan dan digunakan untuk meningkatkan tekanan udara dari ventilasi yang masuk. Tujuan booster fan adalah untuk mengatasi sebagian kecil *friction loss* dengan cara yang sama dengan kipas permukaan untuk mengatasi semua *head loss* suatu sistem ventilasi (Gamble et al, 2009). Penggunaan fan booster dapat meringankan biaya listrik karena dapat meringankan pekerjaan dari main fan. Dengan kata lain dapat memperpanjang umur dari main fan (Habibi and Gillies, 2012).

3.1.2 Airways

Terda

pat dua pertimbangan dalam menetapkan arah aliran udara. Pertama, mempertimbangkan mekanisme transportasi bahan tambang. Sistem antitropal adalah sistem dimana pergerakan transportasi batuan dengan arah aliran udara saling berlawanan. Sistem homotropal adalah pergerakan fragmentasi batuan dan arah aliran udara bergerak searah.

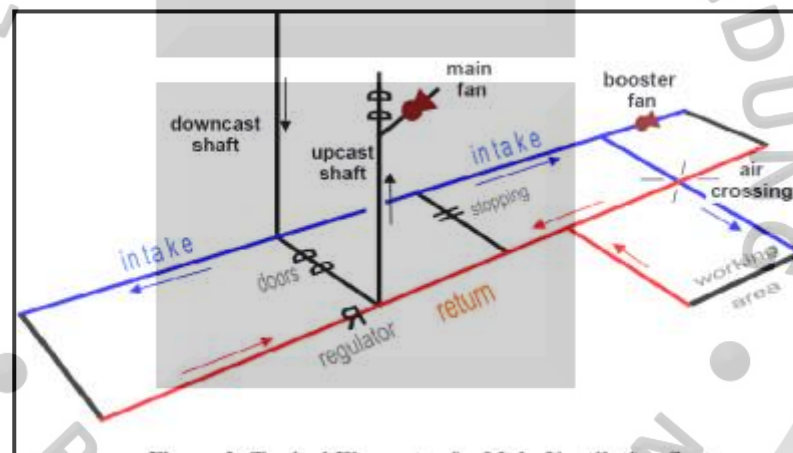
Pertimbangan kedua dalam menetapkan arah aliran udara adalah inklinasi dari aliran udara. Sistem ventilasi ascentional merupakan sistem ventilasi dimana aliran udara bergerak ke atas melalui *inclined workings*.

3.1.3 Control Device

Kondisi tambang PT CSD menggunakan sistem *fan exhaust* dengan *mainfan* utama terletak pada *footwall* dengan formasi batuan TMH (gambar 2.5). Komponen utama *control device* dalam sistem ventilasi tambang terdiri atas :

1. *Stopping*, yang merupakan dinding untuk pembatas udara.
2. *Overcast* atau *Undercast*, yaitu sebagai jembatan udara dimana aliran masuk maupun keluar.

3. *Regulator*, yaitu untuk mengurangi aliran udara yang masuk ke nilai yang diinginkan.
4. *Doors*, yang merupakan pintu, ini terpasang di *stopping* antara *intake* dan *return*.
5. *Air lock*, yaitu untuk mencegah hubungan arus pendek saat pintu dibuka untuk kendaraan atau orang.
6. *Line Brattice* atau *Vent Tubbing*, yang merupakan tabung ventilasi yang digunakan di dalam dan di sekitar area kerja untuk menyalurkan udara segar ketempat operasi penambangan.
7. *Booster* atau *Auxiliary Fans*, ini berfungsi untuk meningkatkan aliran udara.
8. *Machine – Mounted Watersprays and Scrubbers*, ini berfungsi untuk meningkatkan aliran udara segar pada area penambangan dan dapat membersihkan debu.



Sumber : Sumber : Malcom and Mc Pherson 1993

Gambar 3.3
Komponen Control Device Dalam Ventilasi Tambang

Di PT CSD menggunakan *main fan* bertipe *swedvent* dengan kapasitas daya 132 kw dan debit udara hisap maksimum 94 m³/detik. *Fan* dipasang secara parallel dengan jalur udara masuk melalui pintu *lower shaft* yang akan terhubung dengan *upper shaft*. Pada *Main Fan* terdapat 3 (tiga) macam metode pemasangannya (Gambar 3.4), yaitu:

1. *Sistem Blowing (Push)*

Pada sistem ini *fan* dipasang pada inti *air shaft* untuk menghasilkan efek tiup atau hembus. Pada prinsipnya udara dihembuskan masuk kedalam tambang bawah tanah. Pada sistem ini, tekanan udara dalam terowongan akan lebih tinggi (positif) jika dibandingkan dengan tekanan diluar terowongan. Untuk sistem ini

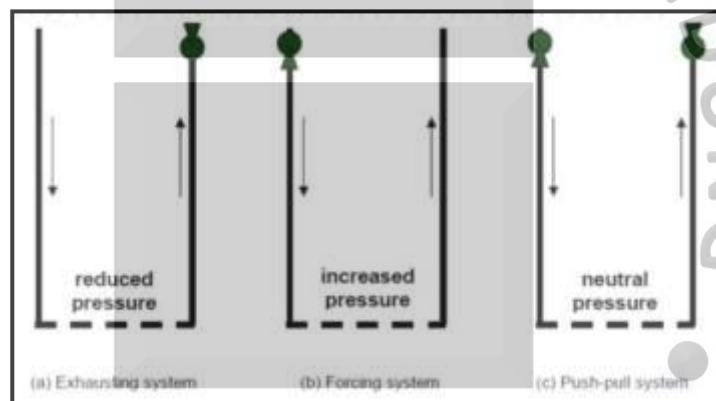
jarang digunakan dalam pertambangan bawah tanah. Akibat hembusan *fan*, tekanan udara disekitar *fan* menjadi tinggi sehingga mengakibatkan ketidaknyamanan pekerja dan berhamburnya debu dan partikel lain.

2. Sistem *Exhaust (Pull)*

Pada sistem ini *fan* dipasang pada puncak dari inti *air shaft* untuk menarik keluar udara dari dalam tambang. Sistem ini berlawanan dengan sistem hembus, tekanan udara dalam terowongan menjadi lebih kecil (negatif) dibanding tekanan luar. Sistem ini lebih sering digunakan pada tambang bawah tanah, tekanan negatif di terowongan juga memaksa gas – gas beracun untuk lebih mudah terbang sehingga tidak terakumulasi di dalam tambang.

3. Sistem Kombinasi (*Push – Pull*)

Pada sistem ini merupakan gabungan dari sistem *blowing (push)* dan sistem *exhaust (pull)* dengan *fan* dipasang dikeduanya, baik di *intake* dan *return shaft*.



Sumber : Malcom and Mc Pherson 1993

Gambar 3.4

Tipe Pemasangan *Main Fan*

3.2 Monitoring Kuantitas dan Kualitas Udara

A. Perhitungan Debit Udara

Kuantitas udara Q yang mengalir di *airways* biasanya tidak diukur secara langsung tetapi dihitung dari kecepatan rata-rata (V) dan luas penampang *airways* (A) pada titik pengukuran.

$$Q = V \times A \dots \dots \dots (3.1)$$

Q = Banyaknya aliran Udara (m^3/s)

A = Luas Penampang Airways (m^2)

V = Kecepatan Aliran Udara (m/detik)




Untuk alat ukur yang digunakan menggunakan *hot wire anemometer* dengan tingkat akurasi sampai 0,00001 m/detik. Pengukuran dilakukan pada setiap area *stope* dan pada ujung *fan duct*. Untuk area *stope* pengukuran akan dibagi menjadi 16 titik sehingga didapat nilai kecepatan rata-rata dalam satuan meter/detik. Pada gambar 3.5 merupakan alat ukur yang digunakan untuk menghitung debit aliran udara.



Gambar 3.5
Hot Wire Anemometer

Keakuratan nilai debit sangat tergantung pada pengukuran kecepatan aliran udara dan data geometri pengukuran penampang. Pengukuran kecepatan memanfaatkan berbagai instrument dan prosedur agar data yang dihasilkan valid. Untuk pengukuran penampang dibutuhkan data aktual hasil bukaan *development*. Dibawah ini adalah rumus untuk menentukan luas penampang lubang bukaan:

Tabel 3.1
Rumus Jenis Luas Penampang

No	Bentuk Penampang	Rumus Luas Penampang	Jenis
1.		$L = (1/8(3,14 \times l^2)) + ((t-1/2 l) \times l)$	<i>Archis</i>
2.		$L = P \times L$	<i>Rectangular</i>
3.		$L = 3,14 \times r^2$	<i>Round</i>

Sumber : Malcom and Mc Pherson, 1993

B. Kebutuhan Udara Segar

Untuk menentukan jumlah udara minimum yang dibutuhkan ditempat kerja pada suatu tambang bawah tanah berdasarkan Keputusan Dirjen Minerba no 185.k/ /3.04/DJB/2019 Tentang Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan, antara lain:

1. Kebutuhan pernapasan setiap orang sebesar 0.01 m³/s per orang.
2. Kecepatan udara minimum untuk mengendalikan kuantitas udara 0.3 m/s. Pada tambang yang banyak mengeluarkan gas – gas berbahaya, kecepatan minimum pada pemuka kerja 0.76 – 1.52 m/s.
3. Kecepatan udara minimum untuk mengendalikan suhu efektif dan kelembaban relatif sebesar 0.5 – 2.5 m/s.
4. Kecepatan udara minimum pada *front* kerja pembuatan lubang bukaan yaitu sebesar 0.3 m/s.

Adapun jenis kegiatan manusia, yaitu: dalam keadaan istirahat, dalam melakukan kegiatan kerja yang moderat, seperti kerja kantor, dalam melakukan kegiatan kerja keras, seperti olahraga atau kerja di tambang bawah tanah.

Berdasarkan kegiatan kerja yang dilakukan ini diperlukan udara segar sesuai dengan kebutuhannya. Dalam suatu pernafasan terjadi kegiatan menghirup udara segar dan menghembuskan udara hasil pernafasan. Laju pernafasan per menit di definisikan sebagai banyaknya udara yang dihirup dan dihembuskan per satuan waktu 1 (satu) menit. Laju pernafasan ini akan berbeda pada setiap kegiatan manusia, semakin keras kerjanya maka semakin besar angka laju pernafasannya. Perlu juga dalam hal ini didefinisikan angka bagi atau nisbah pernafasan (*respiration quotient*) yang didefinisikan sebagai nisbah antara jumlah karbondioksida (CO₂) yang dihembuskan terhadap jumlah oksigen (O₂) yang dihirup pada suatu proses pernafasan. Pada manusia yang bekerja keras, angka bagi pernafasan ini (*respiration quotient*) sama dengan 1 (satu), yang berarti jumlah CO₂ yang dihembuskan sama dengan jumlah O₂ yang dihirup pada pernafasannya. Adapun tabel 3.2 memberikan informasi mengenai persyaratan pernafasan ketiga jenis kegiatan secara umum.

Tabel 3.2
Persyaratan Umum Pernafasan

Kegiatan Kerja	Laju pernafasan/menit	Udara terhirup/menit (in ³ /menit)	Oksigen Terkonsumsi, cfm(10 ⁻⁵ m ³ /detik)	Angka Pernafasan
Istirahat	12-18	300-800	0,01 (0,47)	0,75
Kerja Moderat	30	2800-3600	0,07 (3,3)	0,9
Kerja Berat	40	6000	0,10 (4,7)	1,0

Sumber: Hartman, 1982.

C. *Psychrometry* Udara Tambang

Psychrometry adalah ilmu yang mempelajari sifat panas dan kelembaban udara dalam kondisi tertentu selama proses pengendalian kelembaban dan temperatur. Ilmu *psychrometry* juga mempelajari termodinamika dan campuran udara – uap air. Karena udara normal adalah campuran dari udara kering dan uap air. 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, (Pb) adalah tekanan atmosfer yang dibaca pada alat barometer, dalam satuan in.Hg atau psi (mm Hg atau Pa).
- Suhu bola kering (*Dry bulb temperatur*) 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 temperatur*) 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 sumbunya dibasahi; dalam satuan satuan °C atau °F.

- d. Kelembaban relatif (*Relatif humidity*) adalah perbandingan uap udara pada kondisi tertentu dan jenuh pada suhu konstan.

Pengukuran temperatur tambang untuk mengetahui tingkat panas pada suatu front kerja. Temperatur yang diukur merupakan suhu basah, suhu kering, dan kelembaban relatif. Pada PT Cibaliung Sumberdaya menggunakan alat ukur *humidity and temperature* meter Krisbow. Dengan tingkat keakuratan 0°C-100°C. Untuk mengukur kinerja para pekerja tambang yang bekerja dibawah tanah maka dapat dilihat tingkat efisiensi kerja. Efisiensi kerja merupakan perbandingan suhu basah dan suhu kering. Perbandingan tersebut kemudian di plot pada grafik efisiensi.



Gambar 3.6
Humadity And Temperature Meter

D. Gas-Gas Dalam Tambang Bawah Tanah

Udara yang mengalir pada tambang bawah tanah merupakan campuran dari berbagai macam gas. Gas-gas yang umumnya terbentuk tergantung dari jenis bahan galian tambang, atau kegiatan bawah tanah yang lain. Gas-gas tersebut adalah O₂, CO₂, CO, N₂, SO₂, dan NO_x. Pada penelitian ini akan lebih diteliti kandungan gas O₂ dan gas CO.

1. Oksigen

Oksigen merupakan gas yang paling penting untuk pernafasan manusia dan bahan bakar *internal combustion engines*. Gas ini pada keadaan normal mempunyai persentase 21% pada udara. Penurunan konsentrasi oksigen dapat

disebabkan oleh pernafasan, pembakaran, emisi internal *combustion engines*, oksidasi mineral dan sebagainya.

Efek psikologis dari penurunan gas oksigen bervariasi diantaranya para pekerja bergantung dengan lamanya berada pada kondisi kekurangan tersebut. Oleh karena itu, berikut ini adalah efek yang mungkin muncul saat berada pada lingkungan yang kekurangan oksigen (Forbes and Goves, 1954).

Tabel 3.3
Efek Bagi Manusia Saat Kekurangan Oksigen

% Oksigen di Udara	Efek
17	Bernafas lebih cepat
15	Pusing telinga berdengung detak jantung cepat
13	Kemungkinan kehilangan kesadaran
9	Pingsan tidak sadarkan diri
17	Bernafas lebih cepat
6	Kematian

Sumber: Hartman, 1982.

2. Karbon Monoksida

Gas CO merupakan gas beracun tidak berbau dan tidak berasa. Gas CO ini dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna pada mesin. Berat jenis yang rendah dari gas ini menyebabkan gas CO sangat larut dalam udara. Efek bagi pernafasan adalah sifatnya mudah terikat dengan hemaglobin (300 kali lebih mudah). Membuat gas ini sangat berbahaya (menyebabkan *carboxy hemaglobin*, COHB), yang larut dalam darah dan mengurangi pasokan oksigen bagi sel-sel tubuh. Persentase COHb pada darah biasa digunakan untuk mengetahui efek racun yang mungkin disebabkan oleh CO. Pada saat persentase COHb 5% efek pertama dari racun CO akan muncul, yang kemudian ketika persentase COHb semakin bertambah maka efek yang akan didapat akan berbeda. Persentase COHb ini tergantung jumlah konsentrasi CO dan durasi terpapar oleh gas.

Tabel 3.4
Efek Keracunan Gas CO

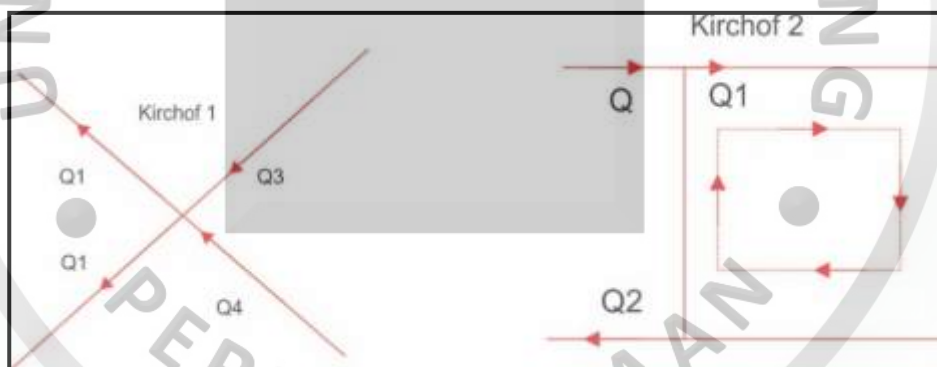
Blood Saturation % CoHB	Gejala-Gejala
5-10	Hilangnya Fungsi Kognitif Tubuh
10-20	Tegang, kepala mulai sakit
20-30	Kepala berdenyut
30-40	Sakit kepala berat, lemas, pusing, muntah, pingsan
40-60	Tidak sadarkan diri, koma, kejang-kejang
60-70	Koma, kematian
70-80	Gagak pernafasan, kematian

Sumber: Hartman, 1982.

3.3 Jaringan Ventilasi Tambang

Ventilasi tambang bawah tanah merupakan gabungan dari beberapa jalur udara yang saling berhubungan antara satu sama lain. Jalur-jalur udara tersebut digambarkan dengan titik-titik (node) yang saling berhubungan untuk membentuk suatu jaringan, oleh karena itu suatu jalur udara dapat terbagi lagi menjadi beberapa jalur udara. Dalam membuat sistem jaringan ventilasi tambang dibutuhkan beberapa elemen-elemen pendukung diantaranya adalah struktur jaringan (geometri, jalur udara, posisi regulator, *fan*), data pengukuran lapangan dan perhitungan (debit udara, resistensi, temperatur dll), *fan* (karakteristik dari *fan*).

Dalam pembuatan simulasi jaringan ventilasi tambang harus berpedoman pada hukum kirchhof 1 yang berbunyi debit udara masuk sama dengan debit udara keluar, dengan kata lain jumlah aljabar semua arus yang memasuki percabangan atau node sama dengan nol dan hukum Kirchof 2 yaitu jumlah tegangan pada satu lintasan tertutup sama dengan nol, atau penjumlahan tegangan pada masing-masing komponen penyusunnya yang membentuk satu lintasan tertutup akan bernilai sama dengan nol.

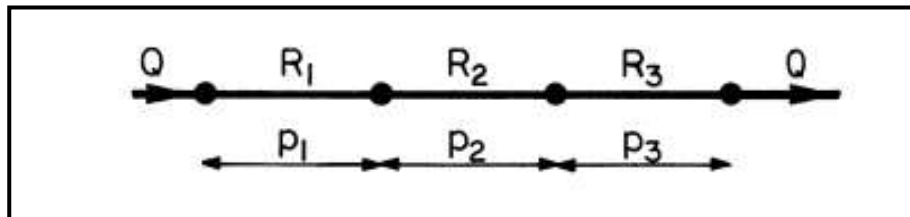


Sumber : Malcom and Mc Pherson 1993

Gambar 3.6
Hukum Kirchof 1 dan 2

3.3.1 Jaringan Ventilasi 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 3.8



Sumber : Malcom and Mc Pherson, 1993.

Gambar 3.8
Jalur Udara Seri

Jumlah aliran udara yang mengalir melalui masing-masing saluran adalah sama:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 \dots (3.2)$$

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

$$HL_1 + HL_2 + HL_3 - H_m = 0 \dots (3.3)$$

Maka persamaan head loss dapat ditulis sebagai berikut:

$$HL = R_1 Q^2 + R_2 Q^2 + R_3 Q^2 \dots (3.4)$$

Sehingga tahanan ekuivalen hubungan seri saluran adalah :

$$R_{eq} = HL / Q^2 \dots (3.5)$$

3.3.2 Jaringan Paralel

Bila jaringan ventilasi dihubungkan secara paralel, maka aliran udara dibagi menurut jumlah cabang paralel, yang besarnya masing-masing tergantung kepada tahanan salurannya. Di dalam ventilasi tambang, percabangan paralel ini disebut sebagai 'splitting' sedangkan cabangnya sendiri disebut 'split'. Kalau jumlah aliran udara dibagi ke percabangan paralel menurut karakteristik alamiahnya tanpa peraturan, hal ini disebut "natural splitting".

Sedangkan splitting terkendali berlaku bila pembagian jumlah aliran udara diatur dengan memasang beberapa penyekat (regulator) di dalam saluran udara yang dikehendaki. Menurut hukum Kirchoff 1

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots Q_n \dots (3.6)$$

Maka bila aliran udara didalurkan kepercabangannya paralel maka jumlah total aliran udara merupakan penjumlahan jumlah aliran udara setiap saluran. Demikian juga halnya dengan head loss. Menurut hukum Kirchoff 2

$$HL = HL_1 = HL_2 = HL_3 = \dots HL_n \dots (3.8)$$

Tahanan ekuivalen saluran hubungan paralel ditunjukkan pada gambar 3.9. Pada gambar ini tampak bahwa aliran udara Q dibagi menjadi Q₁, Q₂, dan Q₃ yang

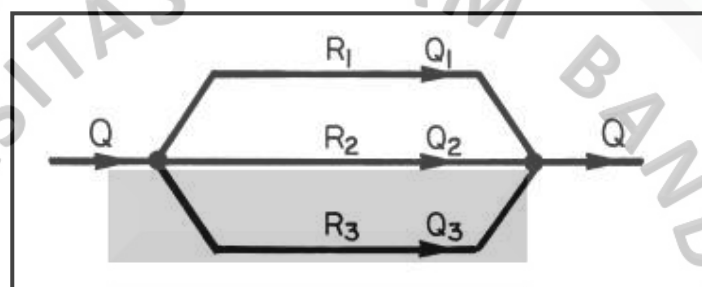
masing-masing melalui tahanan saluran R_1 , R_2 , dan R_3 . Bila tahanan saluran masing-masing dinyatakan dalam satu nilai atau didapat tahanan ekuivalen yang perhitungannya sesuai dengan cara yang dilakukan pada masalah listrik, maka persamaan Atkinson untuk Junction A adalah

$$Q = \sqrt{HL/R_1} + \sqrt{HL/R_1} + \sqrt{HL/R_1} \dots \dots \dots (3.9)$$

$$Q = \sqrt{HL(\sqrt{1/R_1} + \sqrt{1/R_2} + \sqrt{1/R_3})} \dots \dots \dots (3.10)$$

Sedangkan

$$\sqrt{1/R_{eq}} = 1/\sqrt{R_1} + 1/\sqrt{R_2} + 1/\sqrt{R_3} \dots \dots \dots (3.11)$$



Sumber : Sumber : Malcom and Mc Pherson, 1993.

Gambar 3.9
Jalur Udara Paralel

3.4 Mine Head

Menentukan kuantitas udara yang diinginkan perlu disediakan untuk mengatasi kehilangan *head* (*head losses*) dan menghasilkan aliran yang diinginkan diperlukan penjumlahan dari semua kehilangan energi aliran. Ventilasi tambang yang menggunakan satu kipas atau sumber tekanan lain, energi kumulatif yang diperlukan untuk menutupi hilang energi di sebuah sistem disebut sebagai *mine head*. Kenyataannya arti dari *mine head* adalah perbedaan sebuah tekanan, yang ditentukan oleh prinsip Bernouli agar kuantitas udara sesuai dengan yang direncanakan (Hartman, 1997).

Aliran udara dalam ventilasi tambang yang baik merupakan suatu contoh aliran tunak (*Steady*), yang didapat dari perbedaan tekanan yang timbul antara dua titik dalam sistem, apabila kita tidak menganggap faktor faktor seperti perpotongan aliran udara, perubahan aliran udara, tekstur permukaan jalur udara dan ledakan. (Hartman, 1997). Adanya kegiatan penambangan seperti peledakan membuat ventilasi tambang menjadi *Non-steady* (Hartman, 1997).

3.4.1 Head Loss

Dalam sistem ventilasi tambang berdasar pada mekanika fluida, aliran udara terjadi karena perbedaan tekanan dua titik dalam sebuah sistem. Energi yang dimasukkan dalam kondisi (*steady*) dengan cara natural maupun mekanis menimbulkan tekanan yang akan hilang atau terkonsumsi oleh sistem yang disebut sebagai *head loss*. *Head loss* disebabkan oleh dua komponen yaitu *Friction Loss* (H_f) dan *Shock loss* (H_s)(McPherson, 1993). Menghasilkan Persamaan (3.13).

$$H_l = H_f + H_s \dots \dots \dots (3.12)$$

H_l = Head Loss (Pa)

H_f = Friction Loss (Pa)

H_s = Shock Loss (Pa)

3.4.2 Friction Loss

Friction loss merupakan kehilangan udara yang disebabkan oleh gesekan udara ke dinding airways (McElroy, 1935). Kehilangan tekanan yang disebabkan oleh gesekan merupakan 70 – 90% dari total *Head Loss* dalam sistem ventilasi tambang (Hartman, 1997). Persamaan mekanika fluida *Friction Loss* pada saluran berbentuk lingkaran dapat ditentukan dengan rumus *Darcy* (Munson et al., 1994). Menghasilkan Persamaan (3.14).

$$H_f = \frac{K.L.V}{D.g^2} \dots \dots \dots (3.13)$$

H_f = Friction Loss (Pa)

L = Panjang Airways (m)

V = Kecepatan Udara (m/s)

D = Diameter Airways (m)

G = Gravitasi (m/s^2)

Perhitung disederhanakan pada bermacam macam bentuk saluran udara guna mempermudah perhitungan, diperoleh dengan menyatakan *head loss* dalam bentuk radius hidrolis (R_h), yaitu perbandingan antara luas penampang terhadap perimeter keliling P dari saluran. Sehingga rumus Atkinson dapat digunakan dengan parameter K menghasilkan persamaan (3.15)

$$H_f = \frac{K.O.L.Q^2}{A^3} \dots \dots \dots (3.14)$$

H_f = Friction Loss (Pa)

V = Kecepatan Aliran (m/s^2)

- K = Faktor gesekan untuk densitas udara standar (kg/m³)
 A = Luas Penampang Saluran (m²)
 O = Keliling Saluran (m)
 L = Panjang Airways (m)
 Q = Debit Udara (m³/s)

3.4.3 Shock Loss

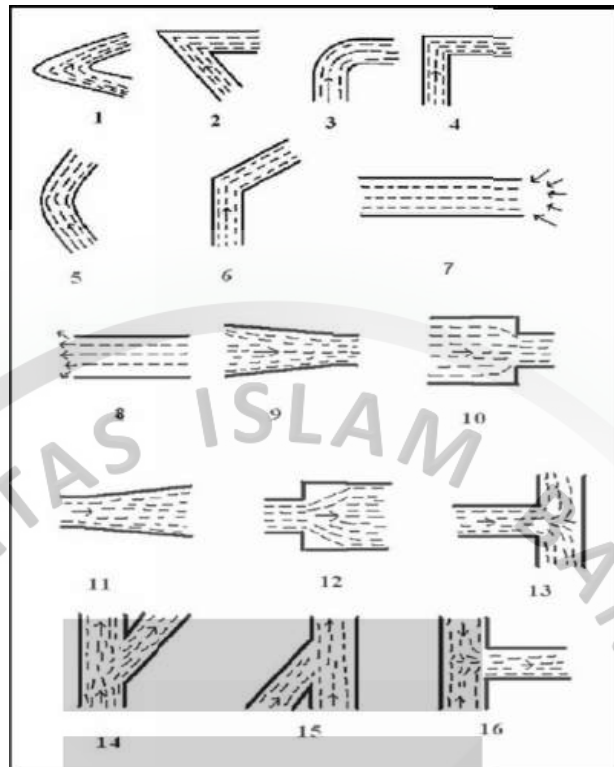
Kehilangan tekanan udara yang disebabkan oleh perubahan arah, bentuk dan ukuran saluran aliran udara. Kehilangan akibat ini merupakan 10 – 30 % dari total *head loss*. Kehilangan akibat guncangan ini tidak dapat dihitung secara tepat karena luasnya variabel (Hartman, 1997).

Perhitungan *shock loss* dapat menggunakan hubungan shock loss dan tahanan dengan metode panjang ekuivalen menggunakan K faktor (tabel 3.6) pada friction loss (McElroy, 1935). Panjang ekuivalen dapat dilihat pada tabel 3.5 dan gambar 3.9.

Tabel 3.6
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>Spliting</i> lurus	30	10
14	<i>Sitting</i> 90°	200	60
15	<i>Junction</i> lurus	60	20
16	<i>Junction</i> 90	30	10

Sumber : Malcom and Mc Pherson, 1993.



Sumber : Mc Pherson, 1993.

Gambar 3.10
Parameter Penentuan Panjang Ekuivalen

$$H_s = \frac{K \cdot O \cdot L_e \cdot Q^2}{A^3} \dots \dots \dots (3.11)$$

H_s = Shock Loss (Pa)

V = Kecepatan Aliran (m/s^2)

K = Faktor gesekan untuk densitas udara standar (kg/m^3)

A = Luas Penampang Saluran (m^2)

O = Keliling Saluran (m)

L_e = Panjang Airways Ekuivalen (m)

Q = Debit Udara (m^3/s)

3.4.4 Hubungan antara Resistansi, Friction Loss dan Shock Loss

Hilangnya tekanan sebuah saluran udara berbanding lurus dengan kuadrat jumlah udara yang mengalir melalui saluran tersebut. Sehingga persamaan *Atkinson* dapat ditulis sebagai dengan Persamaan (3.16).

$$R = \frac{K \cdot O \cdot (L_e + L)}{A^3} \dots \dots \dots (3.12)$$

Dimana :

R = Tahanan ($N \cdot S^2/m^8$)

- K = Faktor gesekan untuk densitas udara standar (kg/m^3)
 O = Keliling Saluran (m)
 L_e = Panjang Airways Ekuivalen (m)
 L = Panjang Airways (m)
 A = Luas Penampang Saluran (m^2)
 Hl = $R \cdot Q^2 \dots \dots \dots (3.13)$

Tabel 3.6
Parameter Penentuan Koefisien Gesekan Dan Faktor Gesekan

Type Airways	Friction Factor (kg/m^3)	Coefficient of Friction
<i>Rectangular Airways</i>		
Smooth Concrete Lined	0,004	0,0067
Shocrate	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	0,02
Unlined, irregular sides	0,014	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
<i>Steel arched airways</i>		
Smooth concrete all round	0,004	0,0067
Bricked between arches all round	0,006	0,01
<i>Concrete slabs or timber lagging between</i>		
Flanges all round	0,0075	0,0125
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0,009	0,015
Lagged behind arches	0,0012	0,02
Arches poorly aligned, rough conditions	0,0016	0,027
<i>Shafts^b</i>		
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	0,001	0,0167
Unlined, major irregularities removed	0,012	0,02
Unlined, mesh bolted	0,014	0,023
Tubbing lined, no fittings	0,007-0,0014	0,0012-0,023
Brick lined, two side buntions	0,018	0,03
Two side bun tons, each with a tie girder	0,022	0,037
<i>Longwall faceline with steel conveyor and powered support</i>		
Good conditions, smooth wall	0,035	0,058
Typical conditions, coal on conveyor	0,05	0,083

Lanjutan

Type Airways	Friction Factor (kg/m ³)	Coefficient of Friction
Rough conditions, uneven faceline	0,06	0,108
<i>Ventilation ducting</i>		
Collapsible fabric ducting (forcing systems only)	0,0037	0,0062
<i>Flexible ducting with fully stretched spiral spring reinforcement</i>		
spring reinforcement	0,018	
Fibreglass	0,0024	0,004
Spiral-wound galvanized steel	0,0021	0,0035

Sumber : Mc Pherson, *Sub Surface Ventilation Book*, 1993.

3.5 Kinerja Fan

Main fan atau kipas utama merupakan hal utama dalam proses pengaliran udara dengan tekanan yang cukup yang dibutuhkan untuk operasi kendaraan dan aktifitas pekerja didalam tambang bawah tanah sehingga terciptanya kondisi kerja yang aman dan nyaman.

Untuk memastikan kinerja *Main Fan* dalam kondisi yang baik, maka perlu dilakukan pengontrolan terhadap *Main Fan* secara rutin dengan meninjau nilai resistansi udara, *air power*, dan juga efektivitas dari *fan* itu sendiri.

A. Resistensi

Resistensi merupakan jumlah kehilangan tekanan dalam suatu sistem, untuk volume udara tertentu. *Fan* dalam sistem dengan saluran sempit dan banyak tikungan dengan radius pendek, maka akan bekerja lebih keras untuk mengatasi resistensi sistem yang lebih besar dibandingkan sistem dengan saluran yang lebih besar dengan sedikit jumlah belokan dan panjang.

Jalur udara yang panjang dan sempit dengan banyak belokan atau tikungan akan memerlukan lebih banyak energi untuk menarik udara pada jalur tersebut. Sebagai akibatnya, untuk kecepatan *fan* yang sama maka *fan* dalam sistem ini akan mampu menarik sedikit udara dibandingkan jalur *fan* dengan jalur pendek tanpa adanya belokan. Persamaan yang digunakan, yaitu:

$$R = P_s/Q^2 \dots \dots \dots (3.14)$$

Dimana R merupakan resistensi (Ns²/m⁸), Q adalah jumlah volume udara atau kuantitas udara (m³/s) dan Ps merupakan tekanan statik (*static pressure*) dengan satuan *pascal* (Pa).

B. Air Power

Air Power atau daya penggerak atau kekuatan *fan* dalam menghisap udara, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yaitu:

$$\text{Air Power (kW)} = \text{Pressure (Pa)} \times \text{Quantity (m}^3/\text{s)} \dots \dots \dots (3.15)$$

C. Efficiency Fan (Efisiensi Kipas)

Efficiency Fan (Efisiensi Kipas) merupakan perbandingan antara daya yang dipindahkan ke aliran udara dengan daya yang didistribusikan oleh motor fan. Daya aliran udara adalah hasil dari tekanan dan aliran. Persamaan yang digunakan yaitu:

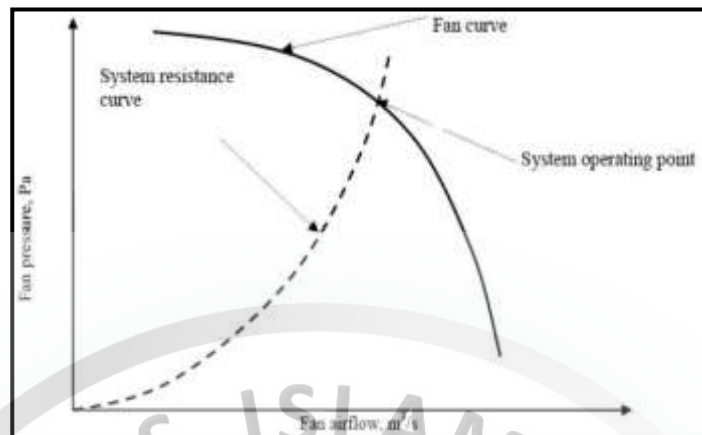
$$\text{Fan Efficiency (\%)} = \frac{\text{Air Power (kW)}}{\text{Input Power (kW)}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.16)$$

Efficiency Fan ini tergantung pada jenis *fan* dan impelernya, dengan meningkatnya laju aliran maka efisiensi akan meningkat juga.

D. Penggambaran Kurva Kinerja

Untuk mengetahui kinerja *main fan* dapat digambarkan dengan kurva kinerja dari *fan* itu sendiri. Kurva kinerja ini merupakan penggambaran grafik dari *fan pressure* dan *sistem resistance curve*. Perpotongan dari sistem resistance curve dan *fan curve* merupakan titik operasi (*duty point*) yang berarti pertemuan antara jumlah tekanan yang diberikan dengan jumlah volume udara yang dihisap. Apabila sistem resistance berubah maka titik operasi juga berubah.

Garis kelanjutan dari *sistem resistance* ke arah atas melewati *fan curve* disebut garis kinerja. Semakin ke kanan arahnya, maka semakin baik kinerjanya, dan sebaliknya maka semakin buruk kinerjanya. Jika pertemuan *fan curve* dan *sistem resistance* pada garis datar atau lengkungan atas dari *fan curve*, maka disebut *performance stall* yang artinya tekanan yang diberikan maksimum tetapi volume alirannya tidak meningkat. *Performance stall* harus dihindari dan jika pertemuannya pada sebelah kiri puncak *fan curve*, maka disebut *out of stall*. Kondisi *out of stall* berbahaya karena mampu membuat *blade* terlepas karena tidak sanggup menahan tekanan yang terlalu tinggi.



Sumber : Brake D.J, 2012

Gambar 3.11
Kurva Kinerja Fan

3.6 Software Ventsim 5.2

Ventilasi telah menjadi perhatian utama pada tambang bawah tanah selama ratusan tahun, namun sampai diperkenalkannya analisis secara komputerisasi dalam 40 tahun terakhir, perencanaan dan pemodelan ventilasi sebagian besar adalah *block art*, mengandalkan pengalaman tebakan dan perhitungan yang luas.

Meskipun ketika perangkat lunak ventilasi sudah memungkinkan dilakukan dengan simulasi dengan model yang kompleks, proses memasukan dan menafsirkan hasil masih tetap sebuah pekerjaan para ahli yang sudah berpengalaman di lapangan. Perangkat lunak ventsim ini bertujuan mempermudah proses simulasi ventilasi tambang bawah tanah bagi setiap insinyur tambang, sekalipun mereka tidak memiliki pengalaman yang luas di lapangan. Perangkat lunak ventsim telah diperkenalkan pada tahun 1991. Secara umum perangkat lunak ini sudah membantu meakukan analisis-analisis berikut ini.

1. Mensimulasikan dan merencanakan debit udara dan tekanan.
2. Membantu perencanaan ventilasi jangka pendek dan jangka panjang.
3. Membantu dalam menentukan pemilihan tipe *fan* yang sesuai dengan desain tambang.
4. Mensimulasikan jalur dan konsentrasi dari asap, debu, atau gas untuk perencanaan atau situasi darurat.
5. Melakukan analisis termodinamika terhadap panas, kelembaban, dan *refrigiration* pada tambang bawah tanah.

6. Memerhitungkan kompresibilitas udara pada tambang bawah tanah yang lebih dalam.
7. Menampilkan analisis berdasarkan waktu dinamis dari kontaminan gas, asap disel, atau panas yang menyebar melalui tambang dari berbagai aktifitas.
8. Melakukan simulasi terkait resirkulasi tambang.
9. Melakukan simulasi konsentrasi *Diesel Particulate Matter* (DPM) di tambang, dsb.

