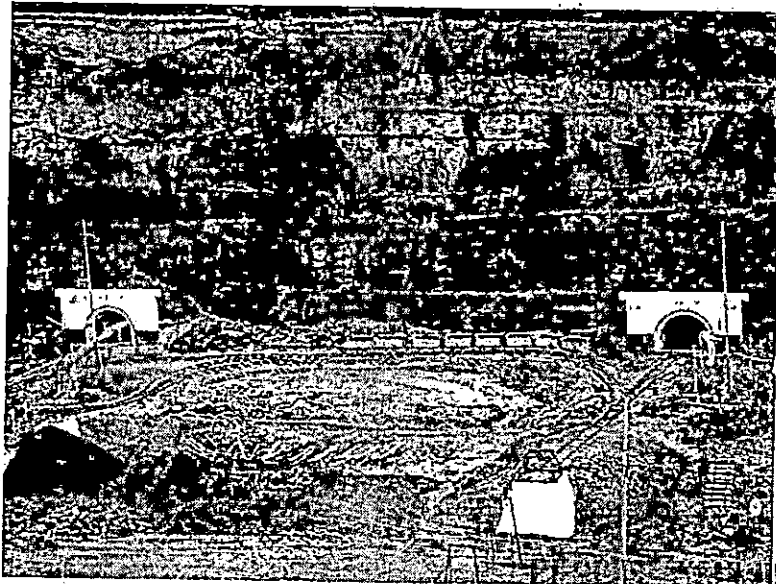


DASAR-DASAR VENTILASI TAMBANG BATUBARA BAWAH TANAH

Disampaikan Pada Acara Pembekalan Pengetahuan
Tambang Batubara Bawah Tanah Bagi Calon Karyawan
PT. Telagabara Makmur Sejahtera
Tanggal 2 s/d 5 Mei 2003



UNIV. NEGERI PADANG
TE' AM TERDAFTAR

MILIK PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG	
TERIMA TGL.	30 Agustus 2004
SUMBER HARGA	HADIAH
OLEKSI	K1
NO. INVENTARIS	189/K/2004-d.1(a)
KLASIFIKASI	622.42 Her-do

JUDUL	:	_____
PENYARANG	:	_____
Oleh: JENIS	:	_____
	:	_____
TARUHL	:	_____

Oleh: Drs. Bambang Heriyadi, MT

KEPALA,

PT. TELAGABARA MAKMUR SEJAHTERA
2003

Drs. Yunalidi, M. Si.
NIP 131598270

KATA PENGANTAR

Pertama-tama penulis mengucapkan puji-syukur kehadirat Allah SWT. Karena berkat rahmat dan karunia-Nya jualah makalah ini dapat sampai di tangan pembaca. Makalah ini dibuat dalam rangka pembekalan pengetahuan tambang batubara bawah tanah bagi calon karyawan PT. TMS.

Dalam system penambangan bawah tanah, masalah ventilasi tambang merupakan suatu hal yang mutlak harus diperhatikan. Karena tanpa ventilasi yang cukup, kenyamanan bekerja menjadi terganggu dan kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja seperti ledakan akibat konsentrasi gas yang melebihi ambang batas bisa saja terjadi. Yang pada gilirannya dapat mengakibatkan terancamnya keselamatan jiwa dan menurunkan tingkat produktivitas penambangan.

Dalam makalah ini akan disajikan hal-hal yang berkenaan dengan system ventilasi tambang bawah tanah, yang meliputi pengetahuan tentang udara tambang, pengendalian kualitas dan kuantitas udara tambang, serta pengetahuan tentang psikometri udara tambang.

Penulis menyadari bahwa apa yang disajikan dalam makalah ini belumlah mencakup keseluruhan materi yang berhubungan dengan ventilasi, namun setidaknya apa yang ada dalam makalah ini dapat menjadi langkah awal untuk lebih mengetahui betapa pentingnya ventilasi itu dalam system penambangan bawah tanah.

Penulis berharap semoga makalah ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian.

Sawahlunto, Juni 2003
Penulis;

Drs. Bambang Heriyadi, MT.

DAFTAR ISI

NO	SUB POKOK BAHASAN	HALAMAN
A.	PENDAHULUAN	1
1.	Fungsi Ventilasi Tambang	1
2.	Prinsip Ventilasi Tambang	1
3.	Lingkup Bahasan Ventilasi Tambang	2
4.	Pengertian mengenai udara tambang	2
B.	PENGENDALIAN KUALITAS UDARA TAMBANG	3
1.	Perhitungan keperluan udara segar	3
a.	Kandungan oksigen dalam udara	4
b.	Gas-gas pengotor	5
c.	Pengendalian gas-gas tambang	8
d.	Karakteristik Debu, Sumber, dan Cara Penanganannya	10
C.	PENGENDALIAN KUANTITAS UDARA TAMBANG	13
1.	Perubahan energi di dalam aliran fluida	13
2.	Prinsip pengaliran udara serta kebutuhan udara tambang	17
3.	Gradien Tekanan	18
4.	Keadaan aliran udara di dalam lubang bukaan	20
5.	Perhitungan head loss	21
6.	'Air horsepower'	24
7.	Teori perhitungan jaringan ventilasi	24
D.	PSIKOMETRI UDARA TAMBANG	30
1.	Kompresi adiabatic	33
2.	Peralatan listrik mekanik	33
3.	Aliran panas dinding batu	34
4.	Panas dari peledakan	35

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

VENTILASI TAMBANG

A. PENDAHULUAN

Dalam teknologi penambangan bawah tanah ada dua masalah pokok yang menjadi kendala pada saat pelaksanaan, yaitu :

- Segi Mekanika Batuan
Apakah sistem tambang bawah tanah yang akan diterapkan dapat ditunjang oleh sistem penyanggaan terhadap bukaan-bukaan di dalam tambang. Apakah masih menguntungkan untuk dilakukan penambangan dengan menggunakan sistem penyanggaan yang diperlukan.
- Segi Ventilasi Tambang
Apakah pada kedalaman tambang yang akan dihadapi masih dimungkinkan untuk melakukan pengaturan udara agar penambangan dapat dilaksanakan dengan suasana kerja dan lingkungan kerja yang nyaman.

Apakah jawaban dari kedua masalah diatas adalah ya?, Jika ya, maka dapatlah dimulai membuat rancangan dari jaringan ventilasi dari tambang tersebut.

1. Fungsi Ventilasi Tambang

Ventilasi tambang berfungsi untuk :

- a. Menyediakan dan mengalirkan udara segar kedalam tambang untuk keperluan menyediakan udara segar (oksigen) bagi pernapasan para pekerja dalam tambang dan juga bagi segala proses yang terjadi dalam tambang yang memerlukan oksigen.
- b. Melarutkan dan membawa keluar dari tambang segala pengotoran dari gas-gas yang ada di dalam tambang hingga tercapai keadaan kandungan gas dalam udara tambang yang memenuhi syarat bagi pernapasan.
- c. Menyingkirkan debu yang berada dalam aliran ventilasi tambang bawah tanah hingga ambang batas yang diperkenankan.
- d. Mengatur panas dan kelembaban udara ventilasi tambang bawah tanah sehingga dapat diperoleh suasana / lingkungan kerja yang nyaman.

2. Prinsip Ventilasi Tambang

Pada pengaturan aliran udara dalam ventilasi tambang bawah tanah, berlaku hukum alam bahwa;

- a. Udara akan mengalir dari kondisi bertemperatur rendah ke temperatur panas.
- b. Udara akan lebih banyak mengalir melalui jalur-jalur ventilasi yang memberikan tahanan yang lebih kecil dibandingkan dengan jalur bertahanan yang lebih besar.
- c. Hukum-hukum mekanika fluida akan selalu diikuti dalam perhitungan dalam ventilasi tambang.

3. Lingkup Bahasan Ventilasi Tambang

Dalam membahas ventilasi tambang akan tercakup tiga hal yang saling berhubungan, yaitu;

- a. Pengaturan./Pengendalian--kualitas udara tambang. Dalam hal ini akan dibahas permasalahan persyaratan udara segar yang diperlukan oleh para pekerja bagi pernafasan yang sehat dilihat dari segi kualitas udara (Quality control).
- b. Pengaturan/pengendalian kuantitas udara tambang segar yang diperlukan oleh pekerja tambang bawah tanah. Dalam hal ini akan dibahas perhitungan untuk jumlah aliran udara yang diperlukan dalam ventilasi dan pengaturan jaringan ventilasi tambang sampai perhitungan kapasitas dari kipas angin
- c. Pengaturan suhu dan kelembaban udara tambang agar dapat diperoleh lingkungan kerja yang nyaman. Dalam hal ini akan dibahas mengenai penggunaan ilmu yang mempelajari sifat-sifat udara atau psikrometri (psychrometry).

Dalam membahas pengaturan ventilasi tambang yang bersifat mekanis perlu juga dipahami masalah yang berhubungan dengan kemungkinan adanya aliran udara akibat ventilasi alami, yaitu antara aliran udara sebagai akibat perbedaan temperatur yang timbul secara alami.

4. Pengertian mengenai Udara Tambang

Udara segar normal yang dialirkan pada ventilasi tambang terdiri dari ; Nitrogen, Oksigen, Karbondioksida, Argon dan Gas-gas lain seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1.
Komposisi Udara Segar

Unsur	Persen Volume (%)	Persen Berat (%)
Nitrogen (N ₂)	78,09	75,53
Oksigen (O ₂)	20,95	23,14
Karbondioksida (CO ₂)	0,03	0,046
Argon (Ar), dll	0,93	1,284

Dalam perhitungan ventilasi tambang selalu dianggap bahwa udara segar normal terdiri dari :

Nitrogen = 79% dan
Oksigen = 21%

Disamping itu selalu dianggap bahwa udara segar akan selalu mengandung karbondioksida (CO₂) sebesar 0,03%.

Demikian pula perlu diingat bahwa udara dalam ventilasi tambang selalu mengandung uap air dan tidak pernah ada udara yang benar-benar kering. Oleh karena itu akan selalu ada istilah kelembaban udara.

B. PENGENDALIAN KUALITAS UDARA TAMBANG

1. Perhitungan Keperluan Udara Segar

Jenis kegiatan manusia dapat dibeda-bedakan atas :

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

Atas dasar jenis kegiatan kerja yang dilakukan ini akan diperlukan juga 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 dihirup dan dihembuskan per satuan waktu 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 arti angka bagi atau nisbah pernafasan (respiratori quotient) yang didefinisikan sebagai nisbah-antara jumlah karbondioksida yang dihembuskan terhadap jumlah oksigen yang dihirup pada suatu proses pernafasan. Pada manusia yang bekerja keras, angka bagi pernafasan ini (respiratori quotient) sama dengan satu, yang berarti bahwa jumlah CO₂ yang dihembuskan sama dengan jumlah O₂ yang dihirup pada pernafasannya. Tabel 2 berikut memberikan gambaran mengenai keperluan oksigen pada pernafasan pada tiga jenis kegiatan manusia secara umum.

Tabel 2.
Kebutuhan Udara Pernafasan (Hartman, 1982)

Kegiatan kerja	Laju Pernafasan Per menit	Udara terhirup per menit dalam in ³ /menit (10 ⁻⁴ m ³ /detik)	Oksigen ter konsumsi cfm (10 ⁻⁵ m ³ /detik)	Angka bagi pernafasan (respiratori quotient)
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

Ada dua cara perhitungan untuk menentukan jumlah udara yang diperlukan perorang untuk pernafasan, yakni;

- Atas dasar kebutuhan O₂ minimum, yaitu 19,5 %.
Jumlah udara yang dibutuhkan = Q cfm

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

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

$$(Kandungan Oksigen) - (Jumlah Oksigen pada pernafasan) = (Kandungan Oksigen$$

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

minimum untuk udara pernafasan)

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

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

Dengan demikian akan didapat persamaan :

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

$$\left| \begin{array}{l} \text{(Kandungan CO}_2 \\ \text{dlm udara normal)} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{(Jumlah CO}_2\text{-} \\ \text{hasil pernafasan)} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{(kandungan CO}_2\text{ maksimum} \\ \text{dálâm udara)} \end{array} \right|$$

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

Dari kedua cara perhitungan tadi, yaitu atas kandungan oksigen minimum 19,5 % dalam udara pernafasan dan kandungan maksimum karbon dioksida sebesar 0,5 % dalam udara untuk pernafasan, diperoleh angka kebutuhan udara segar bagi pernafasan seseorang sebesar 6,7 cfm dan 21,3 cfm. Dalam hal ini tentunya angka 21,3 cfm yang digunakan sebagai angka kebutuhan seseorang untuk pernafasan.

Dalam merancang kebutuhan udara untuk ventilasi tambang digunakan angka kurang lebih sepuluh kali lebih besar, yaitu 200 cfm per orang (= 0,1 m³/detik per orang)

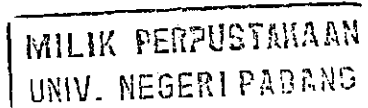
a. Kandungan Oksigen Dalam Udara

Oksigen merupakan unsur yang sangat diperlukan untuk kehidupan manusia. Pada pernafasannya, manusia akan menghirup oksigen, yang kemudian bereaksi dengan butir darah (haemoglobine) menjadi oksihemoglobin yang akan mendukung kehidupan. Dalam udara normal, kandungan oksigen adalah 21 % dan udara dianggap layak untuk suatu pernafasan apabila kandungan oksigen tidak boleh kurang dari 19,5 %.

Banyak proses-proses dalam alam yang dapat menyebabkan pengurangan kandungan oksigen dalam udara; terutama untuk udara tambang bawah tanah. Peristiwa oksidasi, pembakaran pada mesin bakar dan pernafasan oleh manusia merupakan contoh dari proses kandungan pengurangan oksigen.

Kandungan oksigen dalam udara juga akan berkurang pada keadaan ketinggian (altitude) yang makin tinggi.

Kekurangan oksigen dalam udara yang digunakan bagi pernafasan akan berpengaruh terhadap keadaan fisiologi manusia, seperti diperlihatkan pada tabel 3 berikut;



Tabel 3
Pengaruh Kekurangan Oksigen

Kandungan O ₂ Di Udara	Pengaruh
17 %	- Laju pernapasan meningkat (ekuivalen dengan ketinggian 1600 m)
15 %	- Terasa pusing, suara mendesing dalam telinga dan jantung berdetak cepat
13 %	- Kehilangan kesadaran
10 %	- Pucat dan jatuh pingsan
7 %	- Sangat membahayakan kehidupan
6 %	- Kejang-kejang dan kematian

b. Gas-Gas Pengotor

Ada beberapa macam gas pengotor dalam udara tambang bawah tanah. Gas-gas ini berasal baik dari proses-proses yang terjadi dalam tambang maupun berasal dari batuan ataupun bahan galiannya.

Mesin-mesin yang digunakan dalam tambang misalnya merupakan salah satu sumber dari gas pengotor. Demikian juga proses peledakan yang diterapkan dalam tambang untuk pembeaian dapat merupakan sumber gas pengotor. Dalam tambang batubara, gas metan (CH₄) merupakan gas yang selalu ada dalam lapisan batubara. Gas-gas pengotor yang terdapat dalam tambang bawah tanah tersebut, ada yang berifat gas racun, yakni; gas yang bereaksi dengan darah dan dapat menyebabkan kematian. Dapat juga gas pengotor ini menyebabkan bahaya, baik terhadap kehidupan manusia maupun dapat menyebabkan peledakan. Tabel-4 menunjukkan bermacam gas yang dapat berada dalam tambang bawah tanah.

1) Karbondioksida (CO₂)

Gas ini tidak berwarna dan tidak berbau, tidak mendukung nyala api dan bukan merupakan gas racun. Gas ini lebih berat dari pada udara, karenanya selalu terdapat pada bagian bawah dari suatu jalan udara. Dalam udara normal kandungan CO₂ adalah 0,03 %. Dalam tambang bawah tanah sering terkumpul pada bagian bekas-bekas penambangan terutama yang tidak terkena aliran ventilasi; juga pada dasar sumur-sumur tua. Sumber dari CO₂ berasal dari hasil pembakaran, hasil peledakan atau dari lapisan batuan dan dari hasil pernafasan manusia.

Pada kandungan CO₂ = 0,5 % laju pernafasan manusia mulai meningkat, pada kandungan CO₂ = 3 % laju pernafasan menjadi dua kali lipat dari keadaan normal, dan pada kandungan CO₂ = 5 % laju pernafasan meningkat tiga kali lipat dan pada CO₂ = 10 % manusia hanya dapat bertahan beberapa menit. Kombinasi CO₂ dan udara biasa disebut dengan '*blacdamp*'.

2) Methan (CH_4)

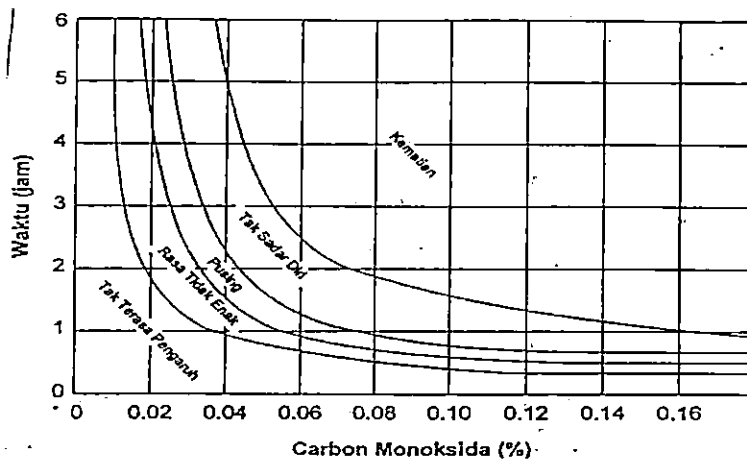
Gas methan ini merupakan gas yang selalu berada dalam tambang batubara dan sering merupakan sumber dari suatu peledakan tambang. Campuran gas methan dengan udara disebut '*Firedamp*'. Apabila kandungan methan dalam udara tambang bawah tanah mencapai 1 % maka seluruh hubungan mesin listrik harus dimatikan. Gas ini mempunyai berat jenis yang lebih kecil dari pada udara dan karenanya selalu berada pada bagian atas dari jalan udara.

Methan merupakan gas yang tidak beracun, tidak berwarna, tidak berbau dan tidak mempunyai rasa. Pada saat proses pembatubaraan terjadi maka gas methan terbentuk bersama-sama dengan gas karbondioksida. Gas methan ini akan tetap berada dalam lapisan batubara selama tidak ada perubahan tekanan padanya. Terbebasnya gas methan dari suatu lapisan batubara dapat dinyatakan dalam suatu volume per satuan luas lapisan batubara, tetapi dapat juga dinyatakan dalam satuan volume per satuan waktu. Terhadap kandungan gas methan yang masih terperangkap dalam suatu lapisan batubara dapat dilakukan penyedotan dari gas methan tersebut dengan pompa untuk dimanfaatkan. Proyek ini dikenal dengan nama '*seam methane drainage*'.

3) Karbon Monoksida (CO)

Gas karbon monoksida merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak ada rasa, dapat terbakar dan sangat beracun. Gas ini banyak dihasilkan pada saat terjadi kebakaran pada tambang bawah tanah dan menyebabkan tingkat kematian yang tinggi. Gas ini mempunyai afinitas yang tinggi terhadap haemoglobin darah, sehingga sedikit saja kandungan gas CO dalam udara akan segera bersenyawa dengan butir-butir haemoglobin (COHb) yang akan meracuni tubuh lewat darah. Afinitas CO terhadap haemoglobin menurut penelitian (Forbes and Grove, 1954) mempunyai kekuatan 300 kali lebih besar dari pada oksigen dengan haemoglobin. Gas CO dihasilkan dari hasil pembakaran, operasi motor bakar, proses peledakan dan oksidasi lapisan batubara.

Karbon monoksida merupakan gas beracun yang sangat mematikan karena sifatnya yang kumulatif, seperti terlihat pada gambar 1. Misalnya gas CO pada kandungan 0,04 % dalam udara apabila terhirup selama satu jam baru memberikan sedikit perasaan tidak enak, namun dalam waktu 2 jam dapat menyebabkan rasa pusing dan setelah 3 jam akan menyebabkan pingsan/ tidak sadarkan diri dan pada waktu lewat 5 jam dapat menyebabkan kematian. Kandungan CO sering juga dinyatakan dalam ppm (part per milion). Sumber CO yang sering menyebabkan kematian adalah gas buangan dari mobil dan kadang-kadang juga gas pemanas air. Gas CO mempunyai berat jenis 0,9672 sehingga selalu terapung dalam udara.



Gambar 1.
Pengaruh Racun Gas CO Sebagai Fungsi Waktu

4) Hidrogen Sulfida (H₂S)

Gas ini sering disebut juga *'stinkdamp'* (gas busuk) karena baunya seperti bau telur busuk. Gas ini tidak berwarna, merupakan gas racun dan dapat meledak, merupakan hasil dekomposisi dari senyawa belerang. Gas ini mempunyai berat jenis yang sedikit lebih berat dari udara. Merupakan gas yang sangat beracun dengan ambang batas (TLV-TWA) sebesar 10 ppm pada waktu selama 8 jam terdedah (*exposed*) dan untuk waktu singkat (TLV-STEEL) adalah 15 ppm. Walaupun gas H₂S mempunyai bau yang sangat jelas, namun kepekaan terhadap bau ini akan dapat rusak akibat reaksi gas H₂S terhadap syaraf penciuman. Pada kandungan H₂S = 0,01 % untuk selama waktu 15 menit, maka kepekaan manusia akan bau ini sudah akan hilang.

5) Sulfur Dioksida (SO₂)

Sulfur dioksida merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak bisa terbakar. Merupakan gas racun yang terjadi apabila ada senyawa belerang yang terbakar. Lebih berat dari pada udara, dan akan sangat membantu pada mata, hidung, dan tenggorokan. Harga ambang batas ditetapkan pada keadaan gas = 2 ppm (TLV-TWA) atau pada waktu terdedah yang singkat (TLV-STEEL) = 5 ppm.

6) Nitrogen Oksida NO_x)

Gas nitrogen oksida sebenarnya merupakan gas yang *'inert'*, namun pada keadaan tekanan tertentu dapat teroksidasi dan dapat menghasilkan gas yang sangat beracun. Terbentuknya dalam tambang bawah tanah sebagai hasil peledakan dan gas buang dari motor bakar. NO₂ merupakan gas yang lebih sering terdapat dalam tambang dan merupakan gas racun. Harga ambang batas ditetapkan 5 ppm, baik untuk waktu terdedah singkat maupun untuk waktu 8 jam kerja. Oksida nitrogen yang merupakan gas racun ini akan bersenyawa dengan kandungan air dalam udara membentuk asam nitrat, yang dapat merusak paru-paru apabila terhirup oleh manusia.

7) Gas Pengotor Lain

Gas yang dapat dikelompokkan dalam gas pengotor lain adalah gas Hidrogen yang dapat berasal dari proses pengisian aki (battery) dan gas-gas yang biasa terdapat pada tambang bahan galian radioaktif seperti gas radon.

c. Pengendalian Gas-Gas Tambang

Beberapa cara pengendalian berikut ini dapat dilakukan terhadap pengotor gas pada tambang bawah tanah :

- 1) Pencegahan (Prevention)
 - a) Menerapkan prosedur peledakan yang benar
 - b) Perawatan dari motor-motor bakar yang baik
 - c) Pencegahan terhadap adanya api
- 2) Pemindahan (Removal)
 - a) Penyaliran (drainage) gas sebelum penambangan-
 - b) Penggunaan ventilasi isap lokal dengan kipas

Tabel 4
Sifat Bermacam Gas

Nama	Sim Bol	Berat Jenis Udara =1	Sifat fisik	Pengaruh	Sumber Utama	Amban g batas TLU- TWA (%)	Amb ang bata s TLU- C (%)	Kisar ledak
Oksigen	O2	1,1056	Tdk berwarna tdk berbau,tdk ada rasa	Bukan racun tdk berbahaya	Udara normal			
Nitrgen	N2	0,9673	Tdk berwarna, tdk berbau,tdk ada rasa	Bukan Racun tapi Menyesak kan	Udara normal lapisan			
Karbon Dioksida	CO2	1,5291	Tdk berwarna, tdk berbau,rasa agak asam	Sesak nafas berkering at	Pernafasan,lapisan,motor bakar,peledakan	0,5		
Methan	CH4	0,5545	Tdk berwarna, tdk berbau,tdk ada rasa	Menyesak kan nafas dapat meledak	Lapisan, motor bakar, peledakan			5 – 15
Karbon Monoksida	CO	0,9672	Tdk berwarna, tdk berbau,tdk ada rasa	Racun dapat meledak	Nyala api,peledakan ,motor bakar, oksidasi	0,005		12.5 –74

Hidrogen sulfida	H ₂ S	1,1912	Tdk berwarna, bau telur busuk, rasa asam	Racun dapat meledak	Lapisan air tanah, peledakan	0,001		4 – 44
Sulfur Dioksida	SO ₂	2,2636	Tdk berwarna, bau mengganggu, rasa asam	Racun	Pembakaran sulfida, motor bakar	0,0005		
Nitrogen Oksida	NO ₂ N ₂ O	1,5895	Bau tajam, warna coklat; rasa pahit	Racun	Peledakan, motor bakar		0,0005	
Hidrogen	H ₂	0,0695	Tdk berwarna, tdk berbau, tdk ada rasa	Dapat meledak	Air pada api, panas bateray			4 – 74
Radon	RA	7,665		Radio aktif	lapisan	IWL	?	-

3) Absorpsi (Absorption)

- a) Penggunaan reaksi kimia terhadap gas yang keluar dari mesin
- b) Pelarutan dengan percikan air terhadap gas hasil peledakan

4) Isolasi (Isolation)

- a) Memberi batas sekat terhadap daerah kerja yang terbakar
- b) Penggunaan waktu-waktu peledakan pada saat pergantian gilir atau waktu-waktu tertentu

5) Pelarutan

- a) Pelarutan lokal dengan menggunakan ventilasi lokal
- b) Pelarutan dengan aliran udara utama

Biasanya cara pelarutan akan memberikan hasil baik, tetapi sering beberapa cara tersebut dilakukan bersama-sama.

Jumlah udara segar yang diperlukan untuk mengencerkan suatu masukan gas sampai pada nilai MAC adalah:

$$Q = (Q_g / (MAC) - B) - Q_g$$

Dimana ; Q_g = masukan gas pengotor
 B = konsentrasi gas dalam udara normal

Contoh.:

Suatu masukan gas pengotor dengan laju 10 cfm memasuki suatu ruang kerja. Apabila MAC = 10 % maka banyaknya udara segar yang diperlukan adalah:

$$Q = (10 / (0,1-0)) - 10 = 100 - 10 = 90 \text{ cfm}$$

d. Karakteristik Debu, Sumber dan Cara Penanganannya

1) Perilaku Dinamik Partikel Debu

Debu yang dihasilkan dalam operasi tambang bawah tanah dapat menimbulkan masalah kesehatan bagi para pekerjaanya.

Partikel debu yang sering dijumpai di alam biasanya terdiri dari partikel-partikel yang berukuran lebih besar dari pada 40 mikron. Sedangkan partikel terkecil yang dapat dilihat melalui mikroskop adalah 0,25 mikron. Kurang lebih 80 % debu hasil dari operasi tambang mempunyai ukuran partikel sekitar dibawah 1 mikron.

Partikel debu, baik yang dapat menimbulkan efek patologis atau terbakar, umumnya berukuran lebih kecil dari 10 mikron. Sedangkan partikel debu yang lebih kecil dari 5 mikron diklasifikasikan sebagai debu yang terhisap (respirable dust). Partikel debu dengan ukuran lebih besar dari 10 mikron sangat sulit untuk tersuspensi di udara dalam waktu yang lama, kecuali kecepatan aliran udara sangat tinggi. Sedangkan partikel debu yang sering dijumpai di tambang bawah tanah mempunyai ukuran rata-rata antara 0,5 – 3 mikron.

Partikel debu dengan ukuran dibawah 10 mikron, yang berbahaya bagi kesehatan, tidak mempunyai inerti sehingga akan tersuspensi di aliran udara. Oleh karenanya kontrol debu selalu berhubungan dengan debu yang berukuran tersebut.

2) Klasifikasi Debu

Klasifikasi debu pada dasarnya dapat dibedakan menurut tingkat bahaya terhadap fisiologis dan kemampuledakannya. Berikut ini adalah klasifikasi yang diurut menurut menurunnya tingkat bahaya.

a) Debu Fibrogenik (berbahaya terhadap pernafasan);

- (1) Silika (kuarsa dan chert)
- (2) Silikat (asbestos, talk mika dan silimanit)
- (3) Metal fumes/ asap logam
- (4) Bijih timah
- (5) Bijih besi (beberapa)
- (6) Karborondum
- (7) Batubara (anthracite dan bituminous)

b) Debu Karsinogenik

- (1) Kelompok Radon
- (2) Asbestos
- (3) Arsenik

c) Debu Racun (racun terhadap organ tubuh dan jaringan/tissués)

- (1) Bijih berilium
- (2) Arsenik
- (3) Timah hitam
- (4) Uranium
- (5) Radium
- (6) Torium
- (7) Kromium
- (8) Vanadium
- (9) Air raksa
- (10) Kadmium
- (11) Antimoni
- (12) Selenium

- (13) Mangan
 - (14) Tungsten
 - (15) Nikel
 - (16) Perak (khusus oksida dan karbonat)
- d) Debu Radioaktif (membahayakan karena radiasi sinar alpha α dan sinar betha β)
 - (1) Bijih uranium
 - (2) Radium
 - (3) Torium
 - e) Debu Ledak (terbakar diudara)
 - (1) Debu logam (magnesium, aluminium, seng, timah, dan besi)
 - (2) Batubara (bituminous dan lignit)
 - (3) Bijih sulfida
 - (4) Debu organik
 - f) Debu pengganggu (sedikit mengganggu)
 - (1) Gypsum
 - (2) Kaolin
 - (3) Gamping
 - g) Debu inert (tidak membahayakan)
 - Tidak ada

3) Efek Fisiologis dari Debu Fibrogenik

Pengaruh buruk dari debu fibrogenik dapat dipahami bila komponen dan fungsi dari sistem pernafasan diketahui dengan baik.

Jalur dari lubang dan mulut terus berhubungan dengan trachea di dalam tenggorokan yang selanjutnya ke bronchial. Jalur ini mengalirkan udara ke paru-paru bagian kiri dan kanan. Kemudian masing-masing bercabang lagi ke jalur-jalur kecil, yaitu bronchioli. Pada ujung bronchioli terdapat kantung-kantung alveoli dimana terjadi oksiginasi darah.

Sistem pernafasan manusia dilengkapi dengan sistem perlindungan terhadap debu. Rambut/bulu hidung akan menyaring partikel debu yang besar ($> 5 - 10 \mu\text{m}$). "Mucous membrane" yang melapisi hidung dan tenggorokan juga akan menangkap debu. Selanjutnya di dalam trachea dan bronchi; sejenis rambut/bulu akan menahan partikel debu berukuran ($5 - 10 \mu\text{m}$). dapat dikatakan tidak ada debu berukuran $> 1\mu$ yang masuk ke aveoli.

4) Penyakit Pernafasan

Debu dapat menyebabkan penyakit pernafasan fibrous dan non fibrous atau disebut juga pnemoconiosis. Nama-nama jenis penyakit sejenis ini dan jenis debu penyebabnya antara lain sebagai berikut;

- a) Silicosis – akibat silika bebas
- b) Silicotuberculosis – komplikasi tuberkolosis ooleh silika
- c) Asbestosis – akibat asbestos
- d) Silicatosi - akibat silika lain
- e) Siderosis – akibat bijih besi

- f) Pekerja tambang batubara bawah tanah – pneumoconiosis (blacklung) – atau anthracosilosis – akibat batubara baik bituminous maupun anthracite.

Yang paling serius dari kesemua jenis penyakit itu adalah silicosis. Sedangkan debu yang dianggap sangat berbahaya dan dapat menimbulkan penyakit kanker adalah:

- Crocidolite (asbestos).
- Keluarga radon (kanker paru-paru)
- Chrysotile (asbestos)
- Arsenic.

5) **Faktor-Faktor Yang Menentukan Kebahayaan Debu Kepada Manusia**

Tingkat bahaya debu pada kesehatan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain ; komposisi debu, kosentrasi, ukuran partikel, lamanya waktu berhubungan, dan kemampuan individual.

a) **Komposisi Debu**

Ditinjau dari tingkat bahaya yang dapat ditimbulkan komposisi mineralogi debu lebih penting dibandingkan komposisi kimiawi atau sifat fisiknya. Sebagai contoh silika bebas memiliki aktivitas kimia yang lebih besar di dalam paru-paru dibandingkan silika campuran.

Namun pada kasus asbestos, efek mekanik lebih penting, sedangkan untuk debu beracun, kelarutan merupakan faktor penting.

b) **Konsentrasi**

Konsentrasi debu di udara dapat dinyatakan dengan dua cara yaitu:

atas dasar jumlah : satuan = mppcf (million of particles per cubic foot)
 = ppcc (particles per cubic centimeter)

atas dasar berat : satuan = mg/m^3 .

Faktor konsentrasi merupakan faktor terpenting kedua setelah komposisi. Secara umum debu dapat membahayakan paru-paru jika konsentrasinya lebih besar dari $0,5 mg/m^3$.

Untuk debu-debu beracun radioaktif konsentrasi yang lebih kecil pun dapat membahayakan.

Tabel berikut memperlihatkan konsentrasi debu maksimum pada lokasi tambang bawah tanah:

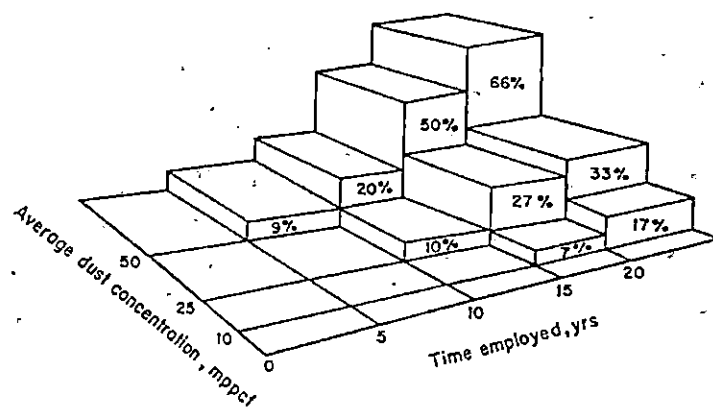
No.	Lokasi	Konsentrasi Debu Maksimum (mg/m^3)
1	Face Longwall	7
2	Persiapan Lubang Bukaan (dengan kandungan kuarsa $> 0.45 mg./m^3$)	3
3	Pada tempat operasi lainnya	5

c) **Ukuran Partikel**

Debu berukuran haslus ($< 5 \mu m$) merupakan debu yang paling berbahaya karena luas permukaannya besar, dengan demikian aktivitas kimianya pun besar. Selain itu debu halus tergolong debu yang dapat dihirup (respirable dust) karena mungkin tersuspensi di udara.

- d) Lamanya Waktu Terdedah (exposed time)
 Penyakit akibat debu umumnya timbul setelah seseorang bekerja di lingkungan yang berdebu untuk suatu jangka waktu yang cukup lama. Waktu rata-rata perkembangan penyakit silicosis berkisar antara 20 sampai 30 tahun.
- e) Kemampuan Individual
 Faktor kemampuan individu terhadap bahaya debu sampai saat ini merupakan faktor yang belum dapat dikuantifikasi.

Dapat disimpulkan bahwa penyakit akibat debu atau 'pneumoconiosis' dipengaruhi oleh kombinasi dari kelima faktor diatas. Hubungan antara kelima faktor di atas dapat dilihat pada gambar 2 berikut;



Gambar 2.
 Hubungan Antara Konsentrasi Rata-Rata Debu Dan Lamanya Waktu Berhubungan Terhadap Gejala 'Pneumoconiosis' (Hartman, 1982)

C. PENGENDALIAN KUANTITAS UDARA

Pengendalian kuantitas berkaitan dengan beberapa masalah seperti, perpindahan udara, arah aliran, dan jumlah aliran udara.

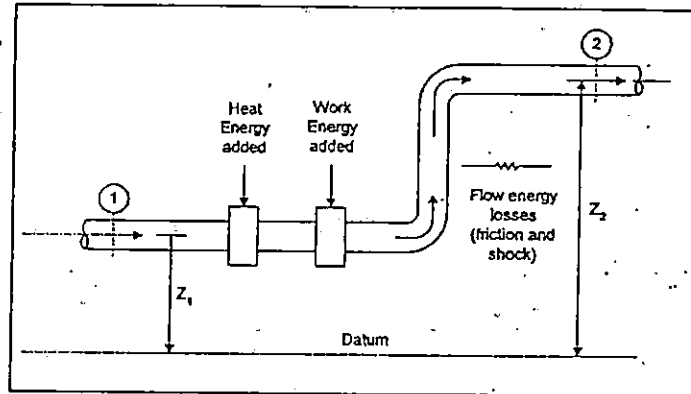
Dalam pengendalian kualitas udara tambang baik secara kimia atau fisik, udara segar perlu dipasok dan pengotor seperti debu, gas, panas, dan udara lembab harus dikeluarkan oleh sistem ventilasi.

Dengan memperhatikan beberapa faktor tersebut diatas, maka kebutuhan udara segar di tambang bawah tanah kadang-kadang lebih besar dari pada 200 cfm/orang atau bahkan hingga 2.000 cfm/orang. Kondisi tambang bawah tanah saat ini sudah banyak yang menyediakan aliran udara untuk sebanyak 10 – 20 ton udara segar per ton mineral tertambang.

1. Perubahan Energi Di Dalam Aliran Fluida

Ventilasi tambang biasanya merupakan suatu contoh aliran tunak (steady), artinya tidak ada satupun variabelnya yang merupakan fungsi waktu. Salah satu tujuan dari perhitungan ventilasi tambang adalah penentuan kuantitas udara dan rugi-rugi, yang keduanya dihitung berdasarkan perbedaan energi.

Hukum konservasi energi menyatakan bahwa energi total di dalam suatu sistem adalah tetap, walaupun energi tersebut dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya.



Gambar 3
Sistem Aliran Fluida

Perhatikan gambar 3, dimana;

$$\text{Energi total 1} = \text{energi total 2} + \text{kehilangan energi} \quad \dots \dots \dots (1)$$

Atau;

$$\text{Energi masuk sistem} = \text{energi keluar sistem}$$

Jadi didapat persamaan yang disebut persamaan Bernoulli :

$$(P_1/w) + (V_1^2/2g) + (Z_1) = (P_2/w) + (V_2^2/2g) + (Z_2) + Hl \quad \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

- (P/w) = energi statik /head statik
- $(V^2/2g)$ = energi kecepatan /head kecepatan
- Z = energi potensial /head potensial
- Hl = energi kehilangan /head kehilangan

Setiap suku dalam persamaan diatas pada dasarnya adalah energi spesifik dalam satuan ft. lb/lb atau ft. Karena ft adalah ukuran head fluida, maka suku-suku tersebut dapat dinyatakan sebagai 'pressure head' atau 'head' saja.

Sehingga persamaan (1) dapat ditulis menjadi :

$$H_{t1} = H_{t2} + Hl \quad \dots \dots \dots (3)$$

Dan Persamaan (2) menjadi :

$$H_{s1} + H_{v1} + H_{z1} = H_{s2} + H_{v2} + H_{z3} + Hl \quad \dots \dots \dots (4)$$

Dimana ;

- H_s = head statik
- H_v = head kecepatan
- H_z = head potensial

Energi potensial dapat dihitung dengan cara memasukkan besaran perbedaan tinggi, yakni;

$$P = w_1 H_1 = w_2 H_2$$

Dimana :

- P = tekanan, dalam Pa atau lbs/sq.ft.
- W_1 = bobot isi udara, dalam kg/m^3 atau lbs/cuft.
- H = head, dalam m atau ft.

Dengan bobot isi air = $62,4 \text{ lb/ft}^3$, pengaruh beda tinggi untuk kolom 1 inci air pada kondisi udara standar adalah :

$$H_1 = (w_2 H_2 / w_1) = ((62,4 \text{ lb/ft}^3)(1 \text{ in}) / (0,0750 \text{ lb/ft}^3))$$

$$= 532 \text{ in} = 69,3 \text{ ft udara}$$

Jadi untuk udara diatas permukaan air laut, suatu kenaikan elevasi sebesar 69,3 ft akan menaikkan head potensial H_z sebesar 1 in dan sebagai kompensasinya head statik akan turun juga sebesar 1 in. Dalam praktek, konversi sebesar 70 ft udara ekuivalen dengan 1 in air.

Jika head potensial (H_z) diperhitungkan dalam persamaan (4) maka head statik dinyatakan dalam tekanan gauge. Oleh karena itu head statik diukur dari datum tertentu.

Gambar 4 menunjukkan perhitungan energi aliran udara untuk susunan saluran udara yang diletakkan secara mendatar dan tegak.

- Untuk posisi mendatar :

$$H_{T1} = H_{s1} + H_{v1} + H_{z1}$$

$$H_{T2} = H_{s2} + H_{v2} + H_{z2}$$

$$H_{T1} = H_{T2} + H_L$$

Dengan menggunakan tekanan absolut :

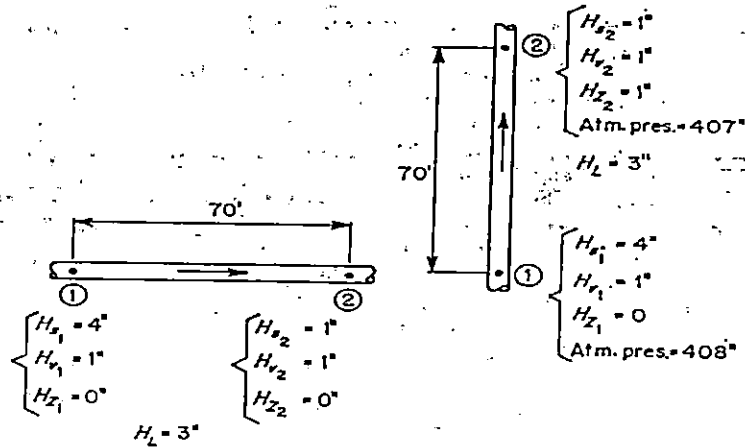
$$(4 + 408) + 1 + 0 = (1 + 408) + 1 + 0 + 3$$

$$413 = 413$$

Dengan tekanan gage :

$$4 + 1 + 0 = 1 + 1 + 0 + 3$$

$$5 = 5$$



Gambar 4
Susunan Saluran Udara Mendatar dan Tegak

- Untuk posisi tegak :

$$H_{T1} = H_{T2} + H_L$$

Dengan tekanan absolut :

$$(4 + 408) + 1 + 0 = (1 + 407) + 1 + 1 + 3$$

$$413 = 413$$

Dengan tekanan gage :

$$4 + 1 + 0 \neq 1 + 1 + 1 + 3$$

$$5 \neq 6$$

Perhitungan dengan tekanan gage salah karena tidak mempertimbangkan perubahan datum yang terjadi karena perubahan elevasi.

Pada prakteknya penggunaan tekanan absolut dalam perhitungan ventilasi membuat rumit. Oleh karena itu diterapkan konvensi penggunaan tekanan gage sebagai basis perhitungan dengan cara menghilangkan H_z dalam semua perhitungan.

Dengan demikian persamaan energi yang disederhanakan menjadi :

$$H_{t1} = H_{t2} + H_L$$

$$H_{s1} + H_{v1} = H_{s2} + H_{v2} + H_L \quad \dots \dots \dots (5)$$

Persamaan ini berlaku selama pengukuran dan perhitungan head statik didasarkan pada tekanan gage. Namun persamaan tersebut tidak berlaku untuk ventilasi alam dimana H_z tidak bisa diabaikan.

2. Prinsip Pengaliran Udara Serta Kebutuhan Udara Tambang

a. Head Los

Aliran udara terjadi karena adanya perbedaan tekanan yang ditimbulkan antar dua titik dalam sistem. Energi yang diberikan untuk mendapatkan aliran yang tunak (steady), digunakan untuk menimbulkan perbedaan tekanan dan mengatasi kehilangan aliran (H_L).

Head los dalam aliran udara fluida dibagi atas dua komponen, yaitu : 'friction loss (H_f)' dan 'shock loss (H_x)'. Dengan demikian head loss adalah:

$$H_L = H_f + H_x \quad \dots \dots \dots (6)$$

Friction loss menggambarkan head loss pada aliran yang linear melalui saluran dengan luas penampang yang tetap. Sedangkan shock loss adalah kehilangan head yang dihasilkan dari perubahan aliran atau luas penampang dari saluran, juga dapat terjadi pada inlet atau titik keluaran dari sistem, belokan atau percabangan, dan halangan-halangan yang terdapat pada saluran.

b. Mine Head

Untuk menentukan jumlah aliran udara yang harus disediakan untuk mengatasi kehilangan head (head losses) dan menghasilkan aliran yang diinginkan, diperlukan penjumlahan dari semua kehilangan energi aliran.

Pada suatu sistem ventilasi tambang dengan satu mesin angin dan satu saluran keluar, komulatif pemakaian energi disebut 'mine head', yaitu perbedaan tekanan yang harus ditimbulkan untuk menyediakan sejumlah tertentu udara ke dalam tambang.

1) Mine statik head (mine H_s)

Merupakan energi yang dipakai dalam sistem ventilasi untuk mengatasi seluruh kehilangan head aliran. Hal ini sudah termasuk semua kehilangan dalam head loss yang terjadi antara titik masuk dan keluaran sistem dan diberikan dalam bentuk persamaan:

$$\text{Mine } H_s = \Sigma H_L = \Sigma (H_f + H_x)$$

2) Mine velocity head (mine H_v)

Dinyatakan sebagai velocity head pada titik keluaran sistem. Velocity head akan berubah dengan adanya luas penampang dan jumlah saluran dan hanya merupakan fungsi dari bobot isi udara dan kecepatan aliran udara. Jadi bukan merupakan suatu head loss komulatif, namun untuk suatu sistem merupakan kehilangan, karena energi kinetik dari udara dilepaskan ke atmosfer.

3) Mine total head (mine H_T)

Merupakan jumlah keseluruhan kehilangan energi dalam sistem ventilasi. Secara matematis, merupakan jumlah dari mine statik (H_s) dan velocity head (H_v), yaitu :

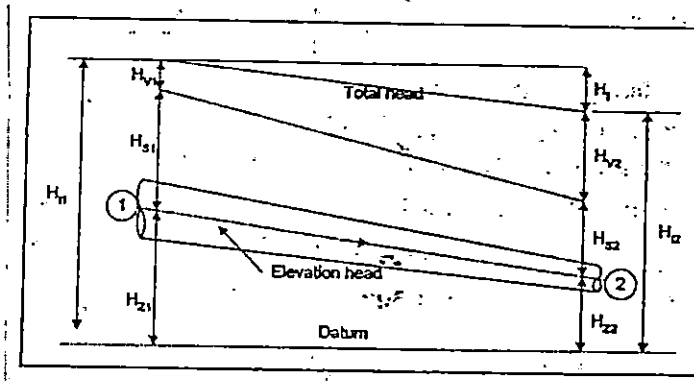
$$\text{Mine } H_T = \text{mine } H_s + \text{mine } H_v$$

HALIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

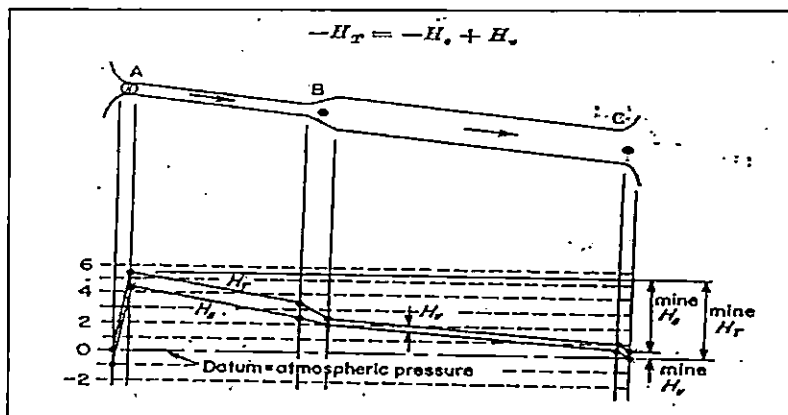
3. Gradien Tekanan (Gradien Hidrolik)

Penampilan berbagai komponen head dari persamaan umum energi secara grafis dapat menjelaskan gradien tekanan. Gambar 5 menunjukkan gradien tekanan untuk suatu sistem aliran udara sederhana. Tampak dari gambar tersebut bahwa ada 3 gradien yang jelas, yaitu :- elevasi, statik + elevasi (termasuk tekanan atmosfer) dan head total. Dalam ventilasi tambang, hanya gradien tekanan statik dan total yang di plot. Efek elevasi dapat diabaikan dan datum yang digunakan paralel dengan garis tekanan barometrik.

Pengaliran udara melalui sistem tekan (boeling) dilakukan dengan meletakkan sumber penekan udara di lubang masuk dan menaikkan tekanan udara tambang hingga diatas tekanan atmosfer (lihat gambar 6). Pada gambar 6 tampak bahwa perubahan tekanan ditunjukkan oleh head kecepatan (H_v), head gesek (H_f), subskrip a, b, c, menggambarkan posisi saluran, sedangkan subskrip d, e, dan f masing-masing mewakili kondisi shock losses akibat pengembangan, penyempitan, dan pengeluaran. Perlu diperhatikan bahwa pada sistem ini semua head positif kecuali pada bagian masuk.



Gambar 5
Gradien Tekanan Untuk Sistem Aliran Udara Sederhana



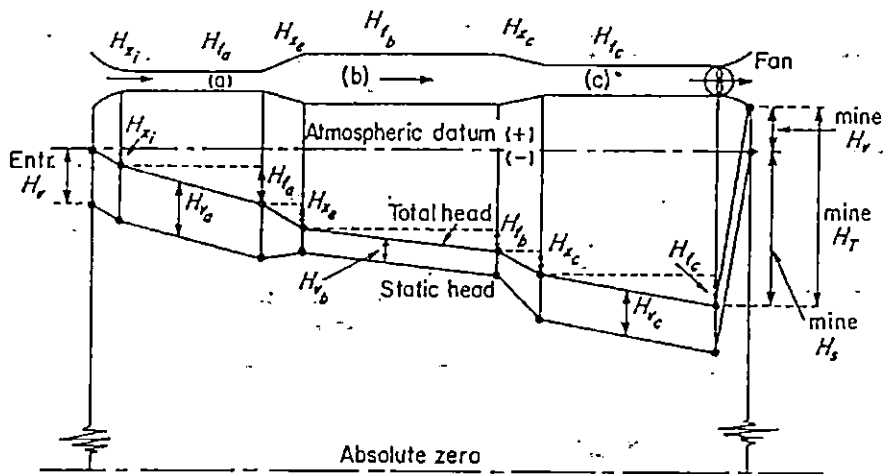
Gambar 6
Gradien Tekanan Pada Sistem Ventilasi Tekan

Untuk menggambarkan sistem gradien tekanan perlu memperhatikan beberapa hal berikut :

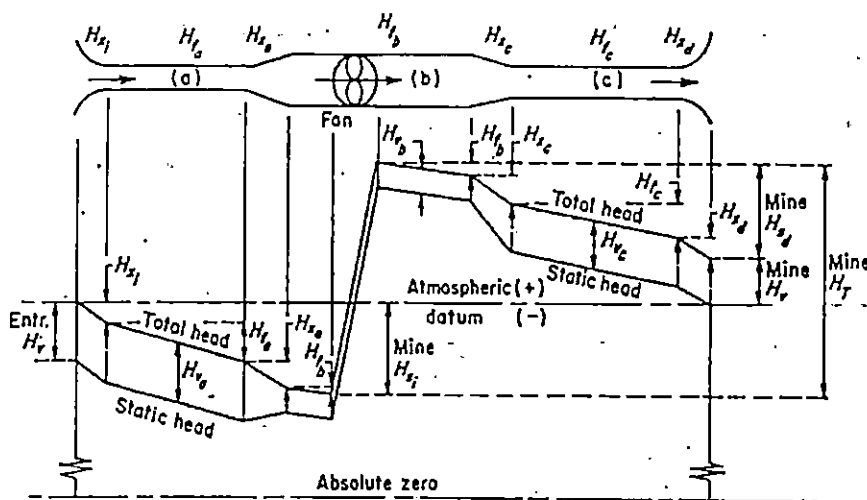
- Head tekanan total selalu nol pada bagian masuk sistem, tetapi positif dan sama dengan head kecepatan di bagian keluar.
- Head keamanan statik selalu negatif dan sama dengan head kecepatan pada bagian masuk tetapi nol pada bagian keluar.
- Head total pada setiap titik digambarkan dahulu, dan head statik berikutnya yang sama dengan pengurangan head total terhadap head kecepatan:

Bila sumber tekanan aliran udara ditempatkan pada bagian keluar disebut sistem ventilasi exhaust. Penggambarannya dilakukan sama dengan sistem tekan, kecuali bahwa bagian masuk dianggap sebagai titik mula (lihat gambar 7).

Pada sistem 'booster', sumber pembuat tekanan (fan) diletakkan antara bagian masuk dan bagian keluar. Umumnya fan akan menerima udara di bawah tekanan atmosfer dan mengeluarkan di atas tekanan atmosfer (lihat gambar 8).



Gambar 7
Gradien Tekanan Sistem Ventilasi Exhaust



Gambar 8
Gradien Tekanan Pada Sistem 'Booster'

4. Keadaan Aliran Udara Di Dalam Lubang Bukaan

Dalam sistem aliran fluida akan selalu ditemui keadaan aliran : laminar, intermediate dan turbulent. Kriteria yang dipakai untuk menentukan keadaan aliran adalah bilangan Reynold (N_{Re}). Bilangan Reynold untuk aliran laminar adalah ≤ 2000 dan untuk turbulent di atas 4000.

$$N_{Re} = (\rho D V) / (\mu) = (D V) / (\nu) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana:

- ρ = rapat massa fluida (lb.det²/ft⁴ atau kg/m³)
- ν = viskositas kinematik (ft²/detik atau m²/detik)
- μ = viskositas absolut (= $\rho\nu$; lb detik/ft² atau pa.detik)
- D = diameter saluran fluida (ft atau m)
- V = kecepatan aliran fluida (ft/detik)

Untuk udara pada temperatur normal $\nu = 1.6 \times 10^{-4}$ ft²/detik atau 14.8×10^{-6} m²/detik.

Maka:

$$N_{Re} = 6.250 DV \quad \text{atau,}$$

$$N_{Re} = 67.280 DV \text{ untuk SI}$$

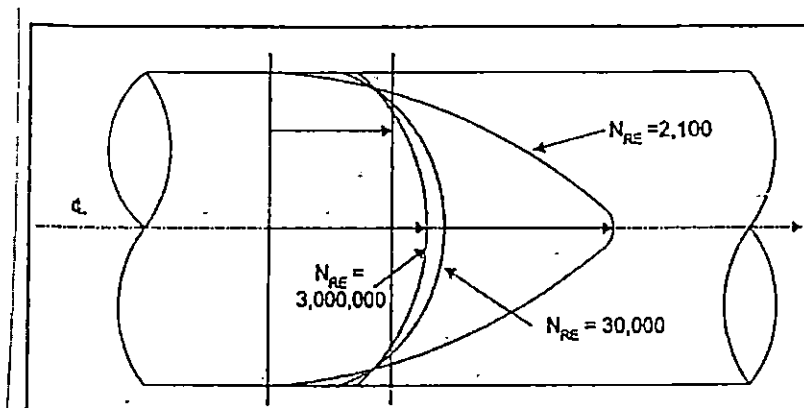
Dengan menganggap bahwa batas bawah aliran turbulent dinyatakan dengan $N_{Re} = 4.000$, maka kecepatan kritis dari suatu dimensi saluran fluida dapat ditentukan dengan :

$$V_c = (60 N_{Re}) / 6.250 D = (60)(4000) / (6.250 D) = 38,4 / D \text{ (fpm)}$$

Atau kira-kira $V_c \cong 40 / D$

Aliran turbulen hampir selalu terjadi pada lubang bukaan tambang bawah tanah. Pipa saluran udara dengan diameter lebih kecil 1 ft jarang dipakai di tambang, oleh karena itu kecepatan di atas 40 fpm selalu menghasilkan aliran turbulent.

Distribusi kecepatan dan bilangan Reynold didalam suatu saluran bulat ditunjukkan pada gambar 9 berikut.



Gambar 9
Distribusi Kecepatan Aliran Di Dalam Lubang Bulat

Kecepatan maksimum terjadi pada pusat lubang, tetapi bilangan Reynoldnya berbeda-beda. Yang paling penting untuk ventilasi adalah kecepatan rata-rata, karena itu pengukuran kecepatan pada garis sumbu saja tidak cukup. Karena bilangan Reynold di dalam suatu sistem ventilasi tambang biasanya lebih besar dari pada 10.000, kecepatan rata-rata seringnya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$V = 0.8 V_{max}$$

5. Perhitungan Head Loss

Head loss terjadi karena adanya aliran udara akibat kecepatan (H_v), gesekan (H_f) dan tikungan saluran atau perubahan ukuran saluran (H_x).

Jadi dalam suatu sistem ventilasi distribusi head loss dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$H_s = \sum H_L$$

$$= \sum (H_f + H_x)$$

$$H_v = H_v \text{ pada keluaran}$$

Dan

$$H_t = H_s + H_v$$

a. Velocity head

Walaupun bukan merupakan suatu head loss, secara teknis dapat dianggap suatu kehilangan. Velocity head merupakan fungsi dari kecepatan aliran udara, yakni:

$$H_v = (V^2)/(2g) \dots \dots \dots (8)$$

Dimana:

- H_v = velocity head
- V = kecepatan aliran (fps)
- G = percepatan gravitasi (ft/dt²)

Dari persamaan diatas, diperoleh turunan berikut :

$$H_v = ((w V^2)/(5,2)(64,4)(60)^2) = w ((V)/(1.098))^2$$

Atau :

$$H_v = ((V)/(4.000))^2$$

Persamaan terakhir menyatakan bahwa kecepatan aliran sebesar 400 fpm ekuivalen dengan head kecepatan sebesar 1 inchi. Untuk mempermudah perhitungan konversi dari kecepatan dan head kecepatan dapat menggunakan nomogram yang ditunjukkan pada gambar 10

b. Friction Loss

Besarnya head loss akibat gesekan dalam aliran udara melalui lubang bukaan di tambang bawah tanah sekitar 70 % hingga 90 % dari total kehilangan (head loss). Friction loss merupakan fungsi dari kecepatan aliran udara, kekasaran muka lubang bukaan, konfigurasi yang ada di dalam lubang bukaan, karakteristik lubang bukaan dan dimensi lubang bukaan.

Persamaan mekanika fluida untuk friction loss pada saluran berbentuk lingkaran adalah:

$$H_L = f (L/D)(V^2/2g) \dots \dots \dots (9)$$

Dimana:

- L = panjang saluran
- D = diameter saluran (ft)
- V = kecepatan (fpm)
- F = koefisien gesekan

Untuk memudahkan perhitungan pada bermacam-macam bentuk saluran, diperoleh dengan menyatakan head loss dalam bentuk radius hidrolik (hydraulic radius) R_H , yaitu perbandingan antara luas penampang A terhadap perimeter atau keliling P dari saluran. Untuk saluran berbentuk lingkaran, R_H adalah:

$$R_H = A/P = (1/4 \cdot \pi D^2) / \pi \cdot D = D/4$$

Dengan demikian maka diperoleh persamaan :

$$H_L = f (L/4 R_H)(V^2/2g)$$

Untuk friction loss pada ventilasi tambang (dikenal sebagai rumus Atkinson) didapat sebagai berikut :

$$H_f = (f/5,2)(L/4R_H)(0,075V^2/2g(60)^2) = (K/5,2)(L/R_H)(V^2)$$

$$= (KPLV^2) / (5,2 A) = (KSV^2) / (5,2 A)$$

karena debit , Q = V x A, maka persamaan diatas menjadi;

$$H_f = (KPLQ^2) / (5,2 A^3)$$

Dimana :

- H_f = friction loss (inch water)
- V = kecepatan aliran
- K = faktor gesekan untuk densitas udara standar (lb.men²/ft⁴)
- A = luas penampang saluran (ft²)
- S = rubbing surface (ft²) = PL
- P = keliling saluran (ft)
- L = panjang saluran (ft)
- Q = debit udara (cfm)

Faktor gesek K didalam sistem ventilasi tambang berhubungan dengan koefisien gesek dalam aliran umum fluida. Untuk bobot isi udara standard:

$$K \approx (800)(10)^{-10} f$$

Sebenarnya di dalam aliran turbulen nilai f berubah sesuai dengan NRe. Tetapi pada ventilasi tambang K dianggap konstan dan besarnya untuk berbagai kondisi lubang bukaan tambang bawah tanah bukan batubara dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5
 Faktor Gesek K untuk Lubang Bukaan Tambang Bawah Tanah Bukan Batubara

Type of Airway	Irregularities of Surfaces, Areas, and Alignment	Values of K x 10 ¹⁰ ^a											
		Straight			Sinuous or Curved								
		Clean (basic value)	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed	Slightly			Moderately			High Degree		
					Clean	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed	Clean	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed	Clean	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed
Smooth lined	Minimum	10	15	25	20	25	35	25	30	40	35	40	50
	Average	15	20	30	25	30	40	30	35	45	40	45	55
	Maximum	20	25	35	30	35	45	35	40	50	45	50	60
Sedimentary rock	Minimum	30	35	45	40	45	55	45	50	60	55	60	70
	Average	55	60	70	65	70	80	70	75	85	80	85	95
	Maximum	70	75	85	80	85	95	85	95	100	95	100	110
Timbered (5 ft centers)	Minimum	80	85	95	90	95	105	95	100	110	105	110	120
	Average	95	100	110	105	110	120	110	115	125	120	125	135
	Maximum	105	110	120	115	120	130	120	125	135	130	135	145
Igneous rock	Minimum	90	95	105	100	105	115	105	110	120	115	120	130
	Average	145	150	160	155	160	165	160	165	175	170	175	195
	Maximum	195	200	210	205	210	220	210	215	225	220	225	235

Source : McElroy (1935).

^aTo provide correct values of K, the numerical values obtained from the table are multiplied by 10⁻¹⁰ units of lb min²/ft⁴ attached. K is based on standard air density (w = 0.075 lb/ft³. Recommended values are in italics. To convert K to SI units (kg/m³, multiply table values by 1.855 x 10⁶).

c. Shock Loss

Shock loss terjadi sebagai akibat dari adanya perubahan arah aliran dalam saluran atau luas penampang saluran udara dan merupakan tambahan terhadap friction losses. Walaupun besarnya hanya sekitar 10 % - 30 % dari head loss total di dalam ventilasi tambang, tetapi tetap harus diperhatikan.

Berdasarkan sumber yang menimbulkan shock loss, pada dasarnya berkurangnya tekanan sebanding dengan kuadrat kecepatan atau berbanding lurus dengan velocity head.

Perhitungan shock loss dapat dilakukan secara langsung sebagai berikut :
 Perhitungan shock loss, H_x dalam inci air dapat dihitung dari velocity head, yakni

$$H_x = X H_v$$

Dimana;

H_x = shock loss

X = faktor shock loss

Formula untuk menentukan faktor shock loss ter lihat pada tabel 6.

Tabel 6
Panjang Ekuivalen Untuk Berbagai Sumber Shock Loss (ft)

Sumber	Le	
	Feet	Meter
Bend, acute, round	3	1
Bend, acute, sharp	150	45
Bend, right, round	1	1
Bend, right, sharp	70	20
Bend, obtuse, round	1	1
Bend, obtuse, sharp	15	5
Doorway	70	20
Overcast	65	20
Inlet	20	6
Discharge	65	20
Contraction, gradual	1	1
Contraction, abrupt	10	3
Expansion, gradual	1	1
Expansion, abrupt	20	6
Splitting, straight branch	30	10
Splitting, straight branch (90°)	200	60
Junction, straight branch	60	20
Junction, deflected branch (90°)	30	10
Mine car or skip (20 % of airway area)	100	30
Mine car or skip (40 % of airway area)	500	150

d. Kombinasi Friction dan Shock Loss

Head loss merupakan jumlah dari friction loss dan shock loss, maka ;

$$H_L = H_f + H_x$$

$$= (KP (L + L_e)Q^2) / 5,2 A^3$$

dimana ;

- HL = head loss (inci air)
- Le = panjang ekuivalen (ft)
- K = faktor gesekan untuk density udara standar
- Q = debit udara (cfm)
- A = luas penampang saluran (ft²)
- L = panjang saluran (ft)

6. Air Horsepower

Daya yang diperlukan untuk mengatasi kehilangan energi dalam aliran udara disebut Air Horsepower (Pa):

$$Pa = pQ = 5,2 HQ \text{ lb ft/menit}$$

$$Pa = 5,2 HQ / 33.000 = (HQ / 6.346) \text{ HP}$$

7. Teori Perhitungan Jaringan Ventilasi

a. Hubungan Antara Head dan Kuantitas

Seperti sudah diketahui dari persamaan Atkinson bahwa head merupakan fungsi kuantitas aliran udara

$$H_L \sim Q^2$$

$$H_S \sim Q^2$$

$$H_V \sim Q^2$$

$$H_T \sim Q^2$$

Oleh karenanya persamaan head loss untuk ventilasi tambang ditulis sebagai berikut :

$$H \sim Q^2$$

Dalam upaya menanggulangi masalah ventilasi perlu diketahui karakteristik ventilasi tambang dengan cara membuat grafik antara head dan kuantitas aliran udara dari suatu sistem. Yang dimaksud dengan sistem disini adalah sebagian dari tambang atau keseluruhan tambang jika digunakan hanya 1 fan. Grafik ini disebut kurva karakteristik tambang.

Dalam pembuatan kurva, kuantitas diasumsikan dahulu, kemudian head ditentukan dengan persamaan :

$$H_1/H_2 = (Q_1/Q_2)^2, \text{ atau}$$

$$H_2 = H_1 (Q_2/Q_1)^2$$

b. Tahanan Saluran Udara Tambang (Airway Resistance)

Hubungan dasar antara head dengan kuantitas aliran udara dinyatakan pada persamaan Atkinson yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$H_L = R Q^2$$

Dimana, R = konstanta proporsionalitas.

$$R = KP (L + Le) / 5,2 A^3$$

Untuk sistem ventilasi tambang, R kemudian disebut tahanan ekuivalen. Tahanan ekuivalen serupa dengan sistem aliran listrik yang mengikuti hukum Ohm.

- Hukum Kirchoff

Ada dua dasar aturan dalam mempelajari sistem aliran listrik, yang dapat digunakan pada sistem jaringan ventilasi.

- Hukum Kirchoff 1

Bila ada aliran-aliran udara yang masuk melalui suatu titik atau disebut juga Junction dan keluar lagi ke percabangan, maka udara keluar harus sama dengan udara masuk (lihat gambar 10)

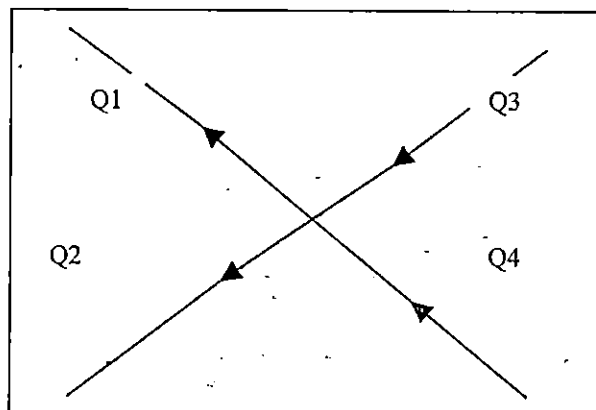
$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 = 0$$

Bila aliran udara keluar persimpangan dinyatakan positif dan yang masuk dinyatakan negatif, maka;

$$Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4 = 0$$

Atau ;

$$\sum Q = 0$$



Gambar 10
Aplikasi Hukum Kirchoff 1

- Hukum Kirchoff 2

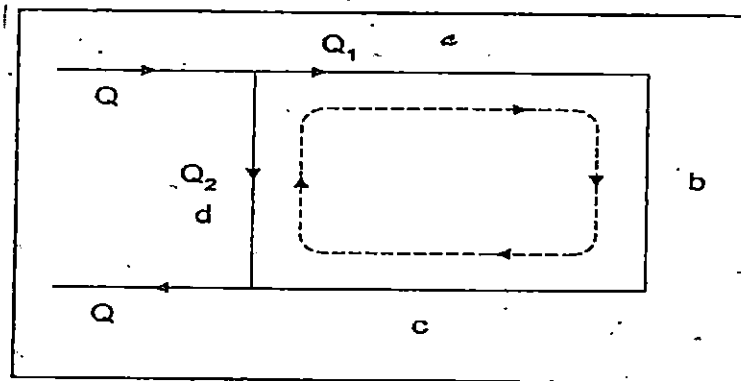
Penjumlahan kehilangan tekanan pada jalur tertutup sama dengan nol;

$$\sum H_L = 0$$

Menurut gambar 4-12 jelas bahwa head loss jaringannya menjadi;

$$H_L = H_{La} + H_{Lb} + H_{Lc} - H_{Ld} = 0$$

H_{La} , H_{Lb} dan H_{Lc} adalah positif karena aliran udara Q_1 bergerak melalui a, b, dan c dengan arah yang sama, sedangkan H_{Ld} adalah negatif karena udara Q_2 mengalir dengan arah berlawanan terhadap aliran lainnya.



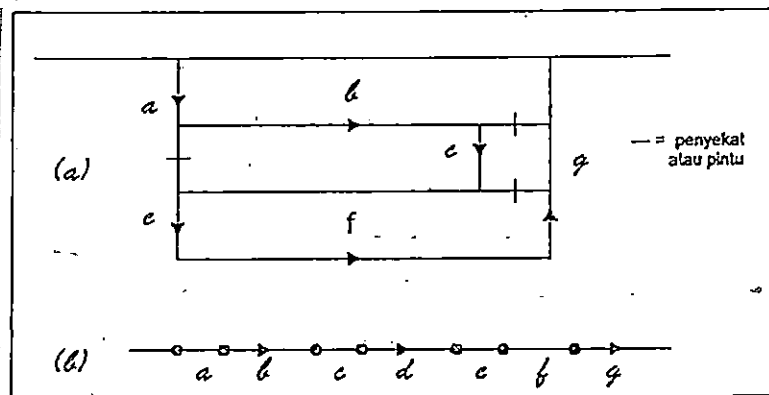
Gambar 11
Aplikasi Hukum Kirchoff 2

Menurut Atkinson, persamaan tersebut di atas dapat dibentuk menjadi ;

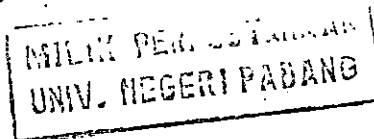
$$\sum H_L = Ra|Q_1|Q_1 + Rb|Q_1|Q_1 + Rc|Q_1|Q_1 - Rd|Q_2|Q_2 = 0$$

c. Jaringan Seri

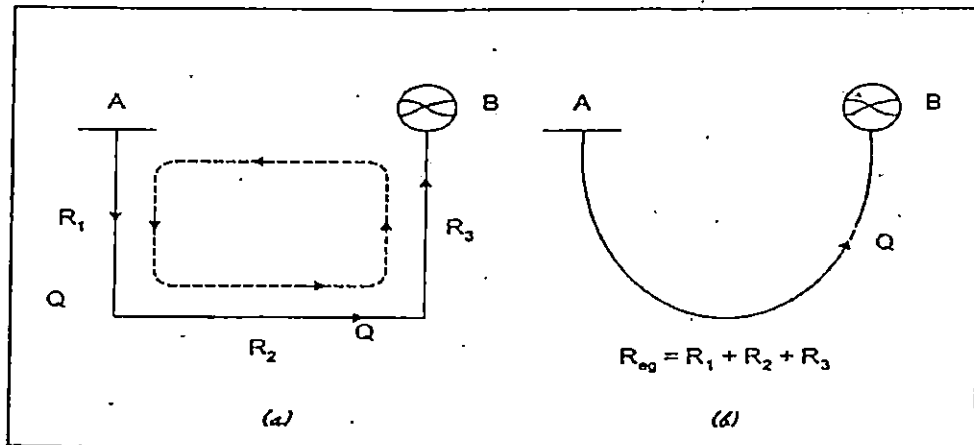
Dalam sistem ventilasi ada dua kemungkinan jaringan Seri dan Paralel (lihat gambar 12)



Gambar 12
Rangkaian Jaringan Ventilasi Seri



Rangkaian jaringan ventilasi seri seperti tampak pada gambar 13.a dapat disederhanakan dalam bentuk jaringan ventilasi seri seperti ditunjukkan pada gambar 13.b.



Gambar 13
Saluran Aliran Udara : a) Hubungan Seri; b) Saluran Ekuivalen

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

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Dan; $H_{L1} + H_{L2} + H_{L3} - H_m = 0$

H_m = head loss (head statik)

Atau ; $H_L = H_{L1} + H_{L2} + H_{L3} \dots$

Maka persamaan head loss dapat ditulis sebagai berikut :

$$H_L = R_1 Q^2 + R_2 Q^2 + R_3 Q^2$$

Atau; $H_L = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots) Q^2 = R_{eq} Q^2$.

Tahan ekuivalen hubungan seri saluran adalah :

$$R_{eq} = H_L / Q^2$$

d. 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;

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

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 ;

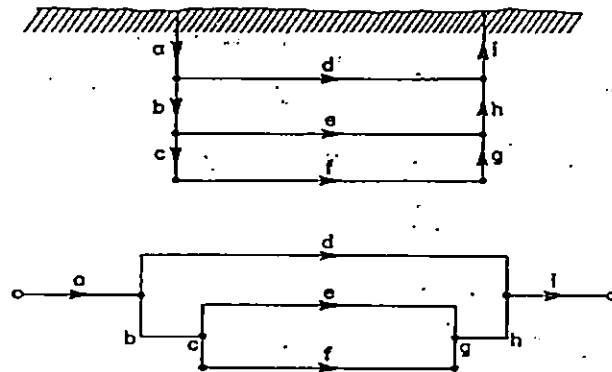
$$HL = HL_1 = HL_2 = HL_3 = \dots$$

Tahanan ekuivalen saluran hubungan paralel ditunjukkan pada gambar 16. Pada gambar ini tampak bahwa aliran udara Q dibagi menjadi Q1, Q2, dan Q3 yang masing-masing melalui tahanan saluran R1, R2, dan R3. 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;

$$Q = \sqrt{HL/R_1} + \sqrt{HL/R_2} + \sqrt{HL/R_3}$$

Atau; $Q = \sqrt{HL} (1/\sqrt{R_1} + 1/\sqrt{R_2} + 1/\sqrt{R_3}) = \sqrt{HL} (\sqrt{1/Req.})$

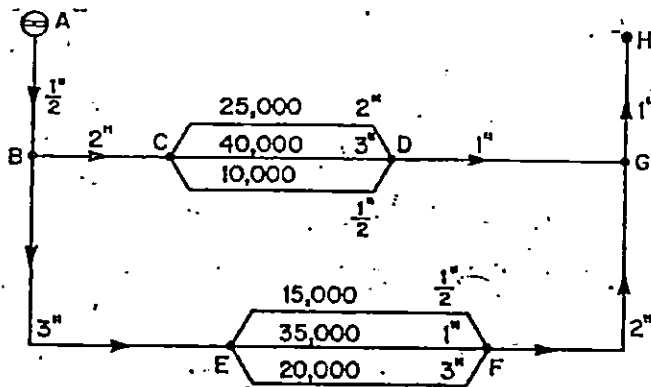
Sedangkan : $\sqrt{1/Req.} = 1/\sqrt{R_1} + 1/\sqrt{R_2} + 1/\sqrt{R_3} + \dots$



Gambar 14
Saluran Aliran Udara Paralel dan Saluran Ekuivalen

e. Analisis Jaringan Kompleks

Suatu jaringan disebut kompleks jika sirkuit-sirkuit paralel saling tumpang tindih dan terkait. Pemisahan sirkuit-sirkuit tersebut tidak dapat dilakukan atau dengan kata lain jaringan tersebut tidak dapat disederhanakan menjadi saluran ekuivalen.



Gambar 15
Penyelesaian Grafis Jaringan Ventilasi Sederhana

f. Pencabangan Terkendali

Jika saluran udara diatur secara paralel dan jumlah udara yang mengalir ke setiap cabangnya ditentukan, maka diterapkan percabangan terkendali (controlled splitting). Pengendalian tersebut umumnya dilakukan dengan cara membuat tahanan buatan pada salah satu cabang. Cabang yang tidak diberi tahanan buatan disebut 'free split'. Tahanan buatan merupakan shock loss yang timbul oleh alat yang disebut 'regulator'.

Dengan cara ini jumlah aliran udara ke permukaan kerja atau tempat-tempat lainnya dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Namun dengan cara ini head total serta kebutuhan daya secara keseluruhan akan meningkat dan selanjutnya akan meningkatkan biaya.

1) Penentuan Ukuran Regulator

Untuk menentukan ukuran regulator pertama-tama harus ditentukan besarnya shock loss yang harus ditimbulkan, hal ini ditentukan dengan menghitung head loss untuk setiap cabang. Cabang dengan head loss tertinggi adalah 'free split'. Menurut hukum Kirchoff 2, pada saluran udara paralel head loss sama. Dengan demikian besarnya shock loss pada setiap cabang sama dengan selisih antara head loss pada free split dengan head loss cabang yang bersangkutan.

Saluran Udara	Q (cfm)	R x 10 ¹⁰	HL (in)	Mx (in)
1	20.000	23,50	0,940	Free split
2	15.000	1,35	0,030	0,940-0,030 = 0,910
3	35.000	3,12	0,382	0,940-0,382 = 0,559
4	30.000	3,55	0,320	0,940-0,320 = 0,620

Penentuan ukuran regulator diturunkan dari rumus shock loss teoritis untuk suatu saluran bulat dan simetris.

$$X = (((1/Cc) - N)/N)^2$$

Dimana X = faktor shock loss, N = nisbah luas regulator/ luas lubang bukaan dan Cc = koefisien kontraksi.

$$Cc = 1 / (\sqrt{X} + (2\sqrt{x+Z}))$$

Dimana Z = faktor kontraksi

$$X = Hx / Hv$$

Dimana Hx = shock loss yang harus ditimbulkan oleh regulator dan Hv = head kecepatan.

Nilai Z dapat dilihat pada tabel. Dan untuk regulator, nilai Z = 2,5 adalah nilai yang umum di tambang bawah tanah.

Tabel 6
Koefisien Kontraksi (berdasarkan saluran pojok siku, t = 2,50)

N	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Cc	0.63	0.64	0.65	0.67	0.69	0.71	0.75	0.81	0.88	1.0
X	217.97	46.38	17.03	7.61	3.67	1.78	0.81	0.30	0.07	0

Tabel 7
Faktor Konstraksi

Edge	Z
Formed	1.05
Rounded	1.50
Smooth	2.00
Square	2.50
Sharp	3.80

Tabel 8
Koefisien Saluran Masuk

Edge	Z	Cc	X
Formed	1.05	0.975	0.0006
Round	1.50	0.785	0.05
Square	2.50	0.630	0.34

Source : McElroy, 1935.

D. PSIKOMETRI UDARA TAMBANG

Udara segar yang dialirkan kedalam tambang bawah tanah akan mengalami beberapa proses seperti penekanan atau pengembangan, pemanasan atau pendinginan, pelembaban atau pengawalembaban. Oleh karena itu maka volume, tekanan, kandungan energi panas dan kandungan airnya juga akan mengalami perubahan. Ilmu yang mempelajari proses perubahan sifat-sifat udara seperti temperatur dan kelembaban disebut psikrometri.

Sumber-Sumber Panas

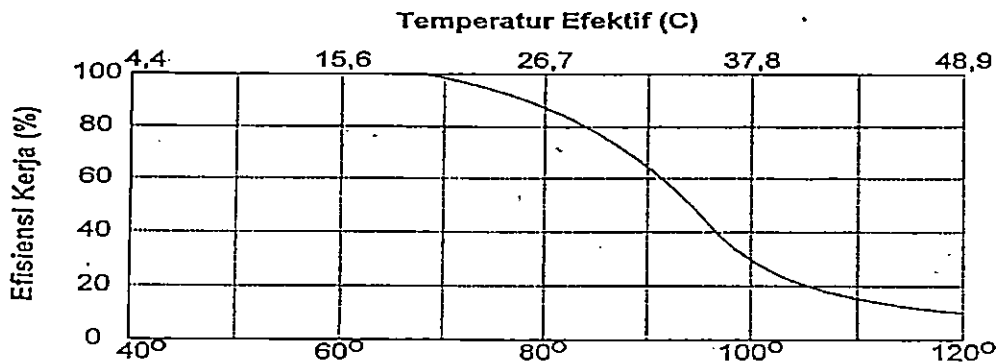
Ventilasi digunakan untuk memenuhi persyaratan kenyamanan kerja di tambang bawah tanah yang kelanjutannya dapat meningkatkan efisiensi dan produksi. Panas dan kelembaban mempengaruhi manusia dalam beberapa hal antara lain :

- Menurunkan efisiensi
- Mampu menimbulkan kecerobohan dan kecelakaan
- Menyebabkan sakit dan kematian.-

Setelah temperatur mencapai tingkat tertentu, seseorang akan kehilangan efisiensinya, dan bila temperaturnya naik lagi maka dia akan mengalami gangguan fisiologi. Tubuh manusia memiliki keterbatasan dalam menerima panas sebelum sistem metabolismenya berhenti.

Efisiensi kerja seseorang bergantung langsung kepada temperatur ambient dan akan berkurang/menurun bila temperaturnya berada diluar rentang 68 – 72 °F. hubungan antara efisiensi kerja dengan temperatur efektif dapat dilihat pada gambar 16 berikut.

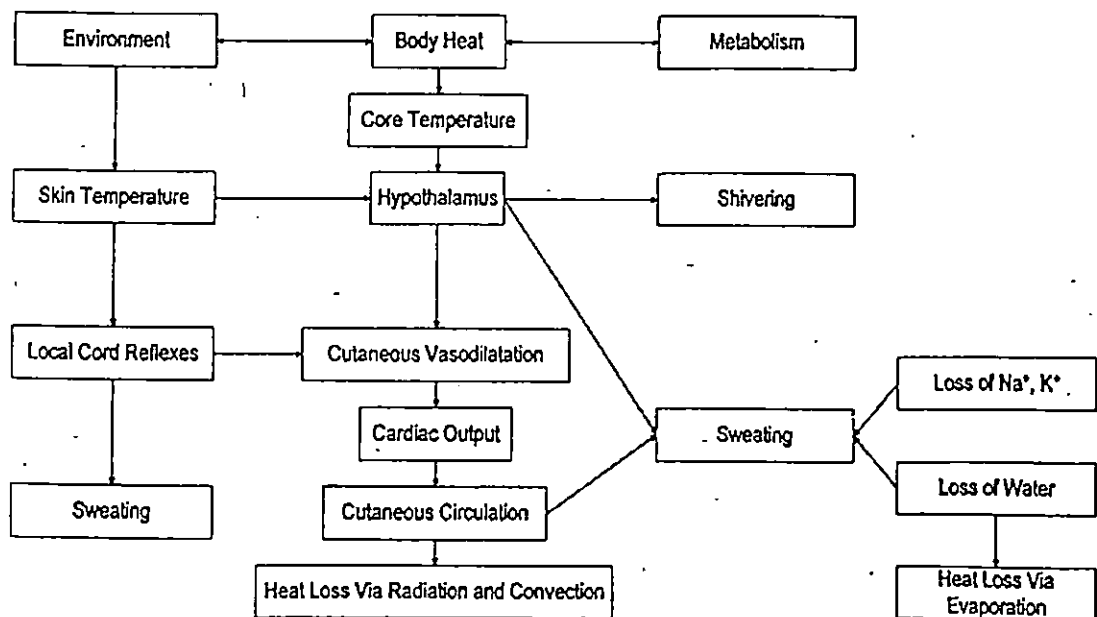
Dalam kondisi panas, tujuan ventilasi adalah mengeluarkan hawa panas dan uap air dengan laju yang sesuai, sehingga temperatur dan kelembaban udara yang dikondisikan memungkinkan pekerja juga melepaskan panas tubuhnya saat bekerja. Kedua faktor tersebut (panas dan kelembaban) harus dikondisikan secara bersamaan.



Gambar 16
Hubungan antara Efisiensi Kerja dan Temperatur Efektif

Tubuh manusia bereaksi terhadap panas dan selalau mencoba untuk mempertahankan suhunya sekitar 37 °C dengan cara mengeluarkan panas melalui cara konveksi, radiasi dan evaporasi. Namun demikian tubuh manusia akan menerima panas kembali begitu produksi metabolismenya naik, atau menyerap panas dari lingkungannya, dan bisa juga kombinasi kedua faktor tersebut. Sistem syaraf sentral akan selalu bereaksi untuk menjalankan mekanisme pendinginan secara alamiah.

Akan tetapi, bila syaraf sentral tidak dapat bekerja karena satu sebab dan lainnya, maka hal ini akan dapat menyebabkan sakit dan kematian (lihat gambar 17 berikut);

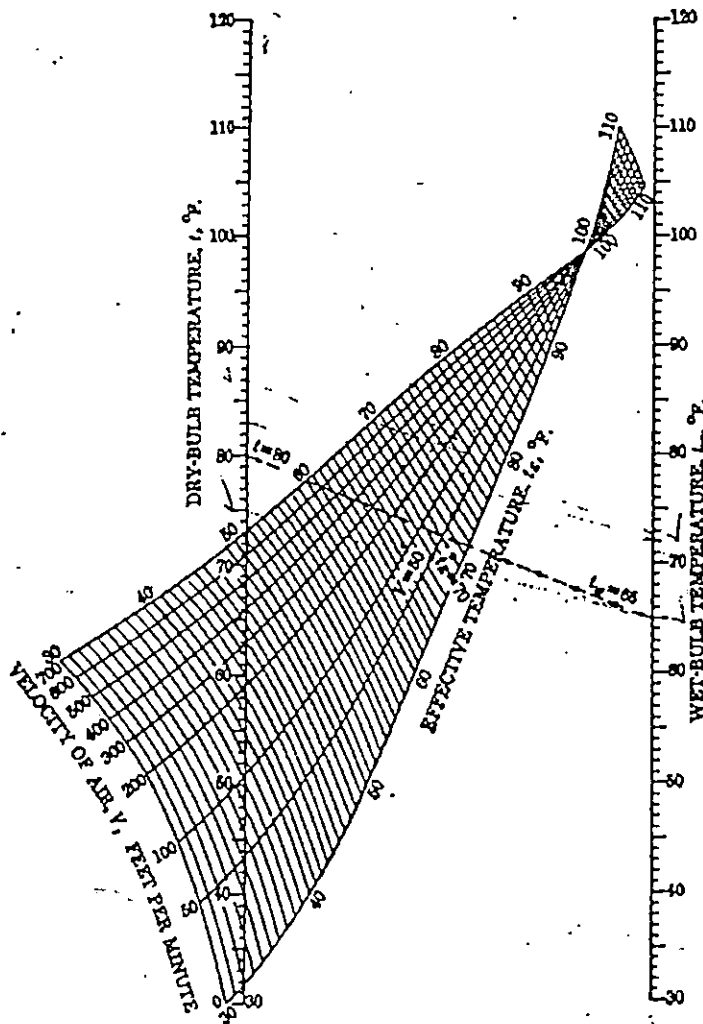


Gambar 17
Reaksi Fisiologis Terhadap Panas

Bila seseorang istirahat di dalam ruangan dengan kondisi udara jenuh, maka batas kemampuannya untuk beradaptasi hanya akan mencapai temperatur 90 °F (32 °C). namun bila ruangan tersebut dialiri udara dengan kecepatan 200 fpm maka batas temperaturnya dapat naik hingga 95 °F (35 °C). Sedangkan temperatur normal untuk seseorang dapat bekerja dengan nyaman adalah 26 – 27 °C.

Perbedaan antara temperatur cembung kering dan cembung basah menyatakan faktor kenyamanan di dalam udara lembab. Agar seseorang dapat bekerja dengan nyaman di lingkungan udara dengan kelembaban relatif 80 % diperlukan perbedaan $t_d - t_w$ sebesar 5 °F (2,8 °C).

Kecepatan aliran udara merupakan faktor utama dalam mengatur kenyamanan lingkungan kerja. Kecepatan aliran udara sebesar 150 – 500 fpm (0,8 – 2,5 m/detik) dapat memperbaiki tingkat kenyamanan ruang kerja yang panas dan lembab. Dalam menduga temperatur efektif dari suatu kondisi $t_d - t_w$ serta kecepatan aliran udara tertentu dapat menggunakan grafik yang ditunjukkan pada gambar 18 berikut:



Gambar 18
Grafik Temperatur Efektif

1. Kompresi Adiabatik

Bila kolom udara menurun di dalam suatu vertikal shaft, tekanannya akan menaik sesuai dengan beratnya. Hal ini akan menyebabkan temperatur udara menaik dan prosesnya dianggap adiabatik bila kandungan uap air tetap, aliran udara tidak akan mengalami gesekan, dan tidak ada perpindahan panas antara udara dengan lingkungannya (batuan). Sudah barang tentu hal ini tidak pernah terjadi di alam. Kenaikan panas akibat 'autocompression' sangat besar, sebagai contoh suatu tambang emas di Afrika Selatan yang bekerja pada kedalaman 8.000 ft (2438,8 m) menimbulkan autokompresi sebesar 1 juta Btu/menit (17.550 kw) atau memerlukan refrigerasi sebanyak 5.000 ton/hari. Secara teoritik, bila udara standard sebanyak 100.000 cfm (47,19 m³/det) dimasukkan kedalam tambang bawah tanah sedalam 1.000 feet (304,8 m), maka banyaknya refrigerasi yang dibutuhkan adalah:

$$100.000 \frac{\text{ft}^3}{\text{menit}} \times 0,075 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 1.285 \frac{\text{Btu}}{\text{lb/1.000 ft}} \times 1.000 \text{ ft}$$

$$9.637 \text{ Btu/menit} = 48,2 \text{ ton refrigerasi/hari (169,5 kw)}$$

Begitu udara mengalir ke bawah vertikal shaft, tanpa ada perpindahan panas antara vertikalshaft dengan udara luar dan tidak ada penguapan, udara sebetulnya ditekan seperti bila kompresor menekan udara. Temperatur udara kering naik 5,4 °F (3,02 °C) setiap perubahan kolom udara 1.000 feet.

Setiap penurunan elevasi sebesar 778 feet, ekuivalen dengan penambahan panas sebesar 1 Btu (0,252 kcal). Dan untuk udara kering, perubahan temperatur cembung kering adalah : $1/(0,24 \times 778) = 0,00535^\circ\text{F/ft}$ (0,00983 °C/m) atau sama dengan 1 °F/187 ft (1 °C/102 m).

Aliran udara kebawah shaft akan menaikkan temperatur dan bobot isinya sesuai dengan kedalaman. Maka kebutuhan ventilasi akan meningkat dengan semakin dalamnya aktivitas penambangan. Faktor lainnya dari kompresi adiabatik adalah kenaikan temperatur cembung kering udara begitu mengalir melalui fan. Besarnya kurang lebih 0,45 °F (0,25 °C) per 1 inchi air head statik. Fan yang biasa dipakai di tambang bawah tanah mampu menekan hingga 10 inchi air head statik.

2. Peralatan Listrik Mekanik

Jumlah panas total yang dikeluarkan oleh peralatan listrik mekanik ke udara tambang bawah tanah tergantung dari besarnya daya yang dipakai dan bentuk kerja yang dilakukan. Peralatan yang banyak dipakai di tambang bawah tanah adalah listrik, diesel, dan tekanan udara. Kesemua jenis peralatan tersebut banyak menggunakan dayanya untuk mengatasi masalah beban gesek dan rugi-rugi listrik yang akhirnya dikonversikan menjadi bentuk panas.

Panas yang dihasilkan oleh peralatan diesel tambang bawah tanah ekuivalen dengan sekitar 90 % dari nilai kalor bahan bakar yang dikonsumsi. Angka ini relatif sama untuk berbagai kondisi kerja mesin, baik dalam keadaan tidak berbeban maupun berbeban. Nilai kalor bahan bakar solar adalah 140.200

Btu/gallon (9.334 kcal/liter). Untuk kepentingan praktis nilai kalor solar sebesar 125.000 Btu/gallon (8.322 kcal/liter) sering dipakai.

Peralatan listrik, seperti substation atau trafo merupakan sumber panas yang cukup berarti. Sekitar 4 % energinya keluar sebagai panas. Pompa non-submersibel bisa mengeluarkan panas sebanyak 15 % dari energi inputnya.

3. Aliran Panas Dinding Batu

Persamaan umum aliran panas melalui dinding dapat ditulis sebagai berikut:

$$Q = kA \cdot dt/dL$$

Dimana :

- Q = panas yang dialirkan, Btu/jam
- A = luas daerah dinding yang mengeluarkan panas ft²
- K = konduktivitas panas, biasanya relatif tetap untuk satu jenis batuan. Angkanya berbeda menurut kandungan air dan susunan perlapisan, Btu-in/ft²jam°F
- dt = perbedaan temperatur, °F
- dL = ketebalan batuan yang mengeluarkan panas, inchi

Karena aliran panas dari dinding merupakan satu-satunya sumber panas yang masuk ke tambang, maka penentuan laju pengeluaran panasnya secara vertikal & horizontal tidak dapat ditentukan secara teliti. Dalam penentuan temperatur batuan biasanya batas kedalaman minimum 50 feet dianggap sebagai awal perhitungannya. Tabel 9 berikut memberikan gambaran temperatur maksimum batuan induk pada berbagai tambang dalam.

Tabel 9
Temperatur Maksimum Batuan Induk

Tambang	Kedalaman		Temperatur	
	(ft)	(m)	(°F)	(°C)
Kolar Gold Field India	11000	3353	152	66.7
South Africa	10000	3048	125-130	51.7-54.4
Morro velho, Brazil	8000	2438	130	54.4
Nort Broken Hill, Australia	3530	1076	112	44.4
Great Britain	4000	1219	114	45.6
Bralorne. B.C. Canada	4100	1250	112.5	50.3
Kirkland Lake, Ont.	4000-6000	1219-1829	66-81	18.9-27.2
Falconbridge Mine, Ont	4000-6000	1219-1829	70-84	21.1-28.9
Lockerby Mine, Ont.	3000-4000	914-1219	67-96	19.4-35.6
Levark Borehild (Inco), Ont	7000-10000	2134-3048	99-128	37.2-53.3
Garson Mine, Ont.	2000-5000	610-1524	54-78	12.1-25.6
Lake Shore Mine, Ont.	6000	1829	73	22.8
Holinger Mine, Ont.	4000	1219	58	14.4
Creighton Mine, Ont.	2000-10000	610-3048	60-138	15.6-58.9
Superior, Arizona	4000	1219	140	60.0
San Manuel, Arizona	4500	1372	118	47.8
Butte, Montana	5200	1585	145-150	60.8-65.6
Ambrosia Lake, NM	4000	1219	140	60.0
Brunswick Ni. 12 New.	3700	1128	73	22.8
Brunswick, CA				
Belle Isle Salt Mine, LA	1400	427	88	31.1

4. Panas Dari Peledakan

Panas peledakan merupakan panas singkat yang akibatnya bisa membuat lingkungan udara di front kerja menjadi relatif lebih panas dari pada tempat sekitarnya. Oleh karena itu aliran udara dapat berbalik kembali ke front kerja, tempat dimana peledakan baru saja terjadi. Konsekuensinya debu akibat bongkaran batuan tidak terbawa keluar.

Hal lain yang mungkin juga terjadi dari aktivitas peledakan adalah meningkatnya uap air di sekitar front kerja tersebut. Pada tabel 10 berikut ditunjukkan nilai-nilai kalor dari berbagai macam bahan peledak:

Tabel 10.
Potensi Panas Dari Berbagai Jenis Bahan Peladak

Bahan Peledak	Btu/lb	Q (kJ/kg)	Q (kal/gram)
Nitroglycerin	2555	5943	1420
60 % Straight Dynamite	1781	4143	990
40 % Straight Dynamite	1673	3891	930
100 % Straight Gelatin	5219	5859	1400
75 % Straight Gelatin	2069	4812	1150
40 % Straight Gelatin	1475	3431	820
75 % Amonia Gelatin	1781	4142	990
40 % Amonia Gelatin	1439	3347	800
Semi Gelatin	1691	3933	940
AN-I-o 94.5/5.5	1601	3724	890
AN-FO 94.3/5.7	1668	3880	927
AN-AL-Water	1979-2159	4603-5022	1100-1200

