

# **SISTEM PERNAPASAN MANUSIA PADA KONDISI LATIHAN DAN PERBEDAAN KETINGGIAN**

Hernawati  
Jurusan Pendidikan Biologi  
FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia  
Jl. Dr. Setiabudi No.229 Bandung 40154  
Telp./Fax. 022-2001937  
Email : [hernawati\\_hidayat@yahoo.com](mailto:hernawati_hidayat@yahoo.com)

## **PENDAHULUAN**

Sel-sel tubuh terus menerus menggunakan oksigen untuk reaksi metabolik yang melepaskan energi dari molekul nutrien dan menghasilkan ATP. Pada waktu yang sama, reaksi tersebut melepaskan karbondioksida. Konsumsi oksigen dan produksi karbondioksida terjadi di dalam mitokondria seiring dengan terjadinya respirasi seluler. Jumlah karbondioksida yang berlimpah menghasilkan keasaman yang bersifat racun bagi sel tubuh, maka karbondioksida yang berlimpah tersebut harus dibuang dengan cepat dan berhasil guna. Dua sistem yang memasok oksigen dan membuang karbondioksida adalah sistem kardiovaskular dan sistem respiratori. Sistem respiratori memberikan pertukaran gas, mengambil oksigen dan membuang karbondioksida, sedangkan sistem kardiovaskuler mengangkut gas dalam darah antara paru dan sel-sel tubuh. Kesalahan kerja salah satu dari kedua sistem tersebut berakibat sama pada tubuh yaitu kekacauan homeostasis dan kematian sel-sel dari kekurangan oksigen, serta terbentuknya hasil limbah (Soewolo, *et al.* 1999).

Sistem respirasi melibatkan sejumlah organ seperti hidung, mulut, faring, trachea, bronchus, dan paru. Fungsi sistem respirasi adalah memfasilitasi pertukaran gas antara atmosfer, paru-paru dan sel-sel jaringan dalam tubuh (Anonim 2008c). Tiga proses dasar terlibat dalam pertukaran gas tersebut. Proses pertama ventilasi paru adalah pengaturan inspirasi dan ekspirasi udara antara atmosfer dan paru. Proses kedua respirasi eksternal (respirasi paru) adalah pertukaran oksigen dan karbondioksida antara paru dan kapiler darah paru. Proses ketiga respirasi internal (respirasi jaringan) adalah pertukaran oksigen dan karbondioksida antara kapiler darah jaringan dan sel-sel jaringan (Ganong, 1995).

Paru-paru berfungsi dalam pertukaran gas antara udara luar dan darah yaitu oksigen dari udara masuk ke darah, dan karbondioksida dari darah ke luar ke udara. Proses pertukaran gas terjadi melalui lapisan yang terdiri dari epitel alveoli, membran basalis, cairan antarsel endotel kapiler, plasma, membran sel darah merah, dan cairan intrasel darah merah. Di samping itu, terdapat selapis cairan tipis surfaktan di permukaan alveoli yang menjaga supaya alveoli tetap menggelembung. Proses pertukaran gas terjadi secara pasif, bergantung kepada selisih bagian gas yang ada di tiap kompartemen. Proses pertukaran gas terjadi dengan cara difusi (Setiadji, *et al.* 2008).

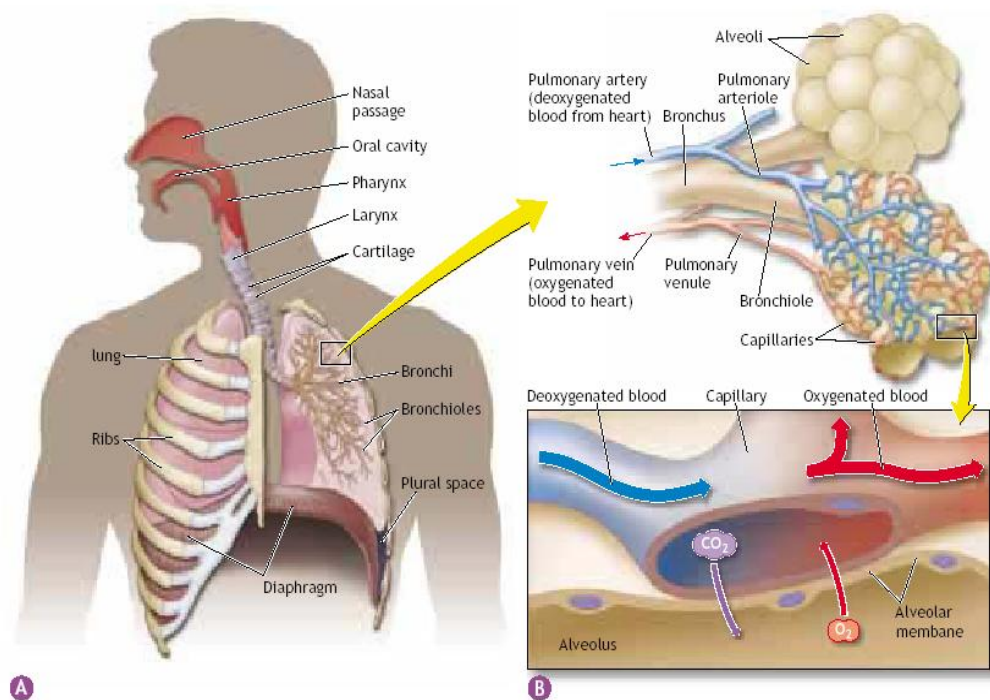
Jenis pekerjaan tertentu dan perbedaan ketinggian tempat, apabila tidak disesuaikan dapat menimbulkan perubahan-perubahan pada sistem pernapasan, sehingga proses ventilasi, proses difusi dan proses perfusi (pemberian darah) dalam sistem pernapasan dapat terganggu. Oleh karena itu, seseorang dalam kondisi pekerjaan tertentu atau berada pada tempat dengan perbedaan ketinggian,

perlu melakukan proses penyesuaian (aklimatisasi) agar tidak terjadi perubahan-perubahan patofisiologi pada sistem pernapasannya.

## **FISIOLOGI PERNAPASAN**

Proses pernapasan sangat penting untuk dapat mensuplai oksigen ke semua jaringan tubuh dan untuk mengeluarkan karbondioksida yang dihasilkan oleh darah melalui paru-paru (Brian, 2008). Udara masuk ke paru-paru melalui sistem berupa pipa yang menyempit (bronchi dan bronkiolus) yang bercabang di kedua belah paru-paru utama (trachea). Pipa tersebut berakhir di gelembung-gelembung paru-paru (alveoli) yang merupakan kantong udara terakhir dimana oksigen dan karbondioksida dipindahkan dari tempat dimana darah mengalir. Ada lebih dari 300 juta alveoli di dalam paru-paru manusia bersifat elastis. Ruang udara tersebut dipelihara dalam keadaan terbuka oleh bahan kimia surfaktan yang dapat menetralkan kecenderungan alveoli untuk mengempis (McArdle, *et al.* 1986).

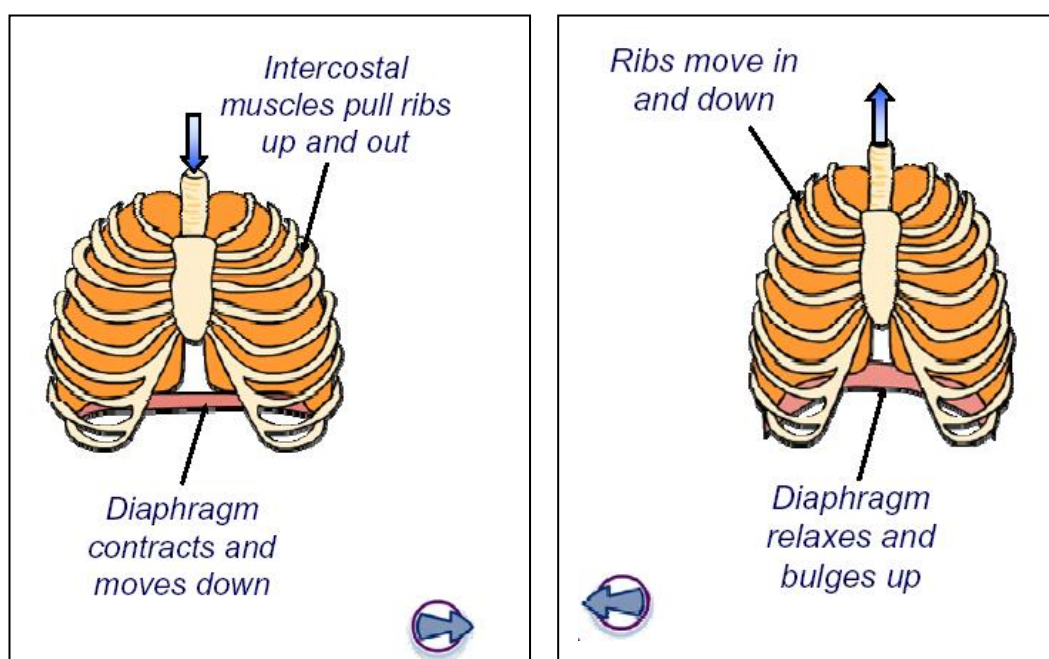
Alveoli paru-paru/ kantong udara merupakan kantong kecil dan tipis yang melekat erat dengan lapisan pembuluh darah halus (kapiler) yang membawa darah yang bebas oksigen (*deoxygenated*) dari jantung. Molekul oksigen dapat disaring melalui dinding pembuluh darah tersebut untuk masuk ke aliran darah. Sama halnya dengan karbondioksida yang dilepaskan dari darah ke dalam kantong udara untuk dikeluarkan melalui pernapasan, menentukan jumlah oksigen yang masuk ke dalam darah dan jumlah karbondioksida yang dikeluarkan dari darah (Anonim, 2008a).



Gambar 1. Struktur paru-paru dan pertukaran gas pada alveoli

Permukaan bagian luar paru-paru ditutup oleh selaput pleura yang licin dan selaput serupa membatasi permukaan bagian dari dinding dada. Kedua selaput tersebut terletak dekat sekali dan hanya dipisahkan oleh lapisan cairan yang tipis, karenanya dapat dipisahkan dan terdapat suatu rongga diantara selaput-selaput tersebut yang disebut ruang antar rongga selaput dada (*intra pleura space*). Sewaktu menarik napas (inspirasi) dinding dada secara aktif tertarik keluar oleh pengerutan dinding dada, dan sekat rongga dada (diafragma) tertarik ke bawah. Berkurangnya tekanan di dalam menyebabkan udara mengalir ke paru-paru. Dengan upaya yang maksimal pengurangan dapat mencapai 60-100 mmHg di bawah tekanan atmosfer. Hembusan napas keluar (ekspirasi) disebabkan mengkerutnya paru-paru dan dinding yang mengikuti pengembangan. Tekanan udara yang meningkat di dalam dada memaksa gas-gas keluar dari paru-paru. Hal tersebut terutama terjadi tanpa upaya otot tetapi dapat dibantu oleh hembusan

napas yang kuat (Anonim, 2008a). Respirasi eksternal artinya udara dari atmosfer masuk ke dalam aliran darah untuk dibawa ke dalam sel jaringan dan karbondioksida yang terkumpul di dalam paru dikeluarkan dari tubuh. Respirasi internal meliputi aktivitas vital kimia yang memerlukan kombinasi oksigen dan glikogen, kemudian dilepaskan menjadi energi, air dan karbondioksida (Anonim, 2008c).



Gambar 2. Mekanisme respirasi inspirasi dan ekspirasi

Volume paru menggambarkan fungsi statik paru. Volume dan kapasitas paru dipengaruhi oleh jenis kelamin, umur, ukuran dan komposisi badan (Anonim 2008d). Hasil pengukuran volume/kapasitas paru antara laki-laki dan perempuan pada kondisi normal dapat dilihat pada Gambar 3.

Pengukuran fungsi pernapasan ada banyak dan bermacam-macam. Namun secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut : Selama bernapas, kira-kira kira-kira 500 ml udara bergerak ke saluran napas dalam setiap inspirasi, dan

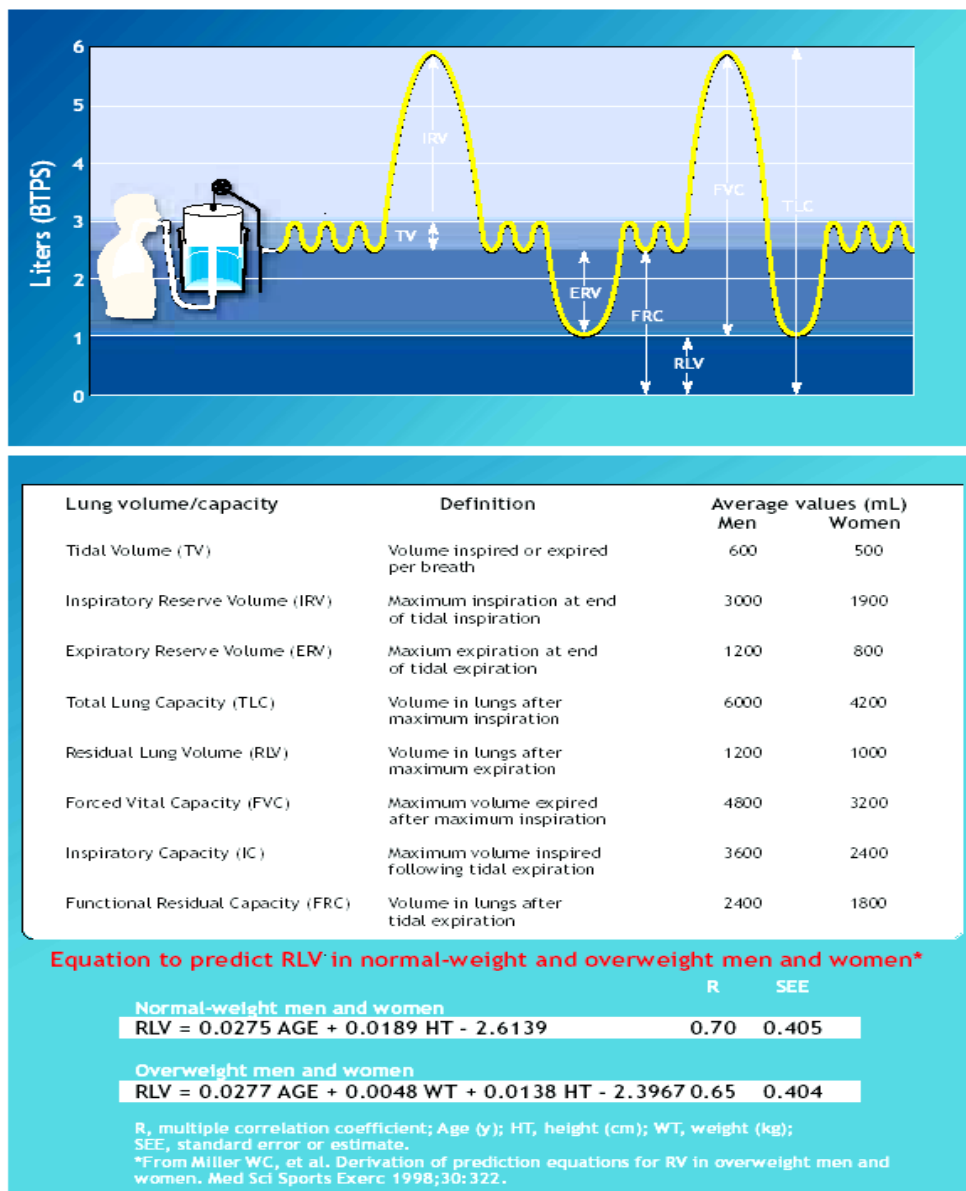
jumlah yang sama bergerak keluar dalam setiap eskpirasi. Hanya kira-kira 350 ml volume tidal/*tidal volume* (TV) benar-benar mencapai alveoli, sedangkan 150 ml tetap berda di hidung, faring, trachea, dan bronki disebut sebagai volume udara mati (*dead space*). Udara total yang diambil selama satu menit disebut volume menit respirasi/*respiratory minute volume* (RMV), yang dihitung dengan perkalian udara tidal dan laju pernapasan normal setiap menit. Volume rata-rata =  $500 \text{ ml} \times 12 \text{ respirasi setiap menit} = 6.000 \text{ ml/menit}$  dalam keadaan istirahat.

Apabila bernapas kuat, maka jumlah udara yang masuk ke dalam saluran napas dapat melebihi 500 ml udara. Kelebihan udara tersebut disebut volume udara cadangan inspiratori, rata-rata 3.100 ml. Dengan demikian sistem pernapasan normal dapat menarik 3.100 ml (volume udara cadangan respiratori) + 500 ml (volume udara tidal) = 3.600 ml. Namun dalam kenyataan, lebih banyak lagi udara yang dapat ditarik bila inspirasi mengikuti eskpirasi kuat.

Selanjutnya apabila seseorang melakukan inspirasi normal dan kemudian melakukan eskpirasi sekuat-kuatnya, maka akan dapat mendorong keluar 1.200 ml udara, volume udara tersebut adalah volume udara cadangan eskpiratori. Setelah volume udara cadangan eskpiratori dihembuskan, sejumlah udara masih tetap berada dalam paru-paru, karena tekanan intrapleural lebih rendah sehingga udara yang tinggal tersebut dipakai untuk mempertahankan agar alveoli tetap sedikit mengembang, dan juga sejumlah udara masih tetap ada pada saluran udara pernapasan. Udara yang masih berada pada saluran pernapasan tersebut adalah udara residu yang jumlahnya kira-kira 1.200 ml.

Kapasitas paru-paru dapat dihitung dengan menjumlahkan semua volume udara paru. Kapasitas inspiratori adalah keseluruhan kemampuan inspirasi paru,

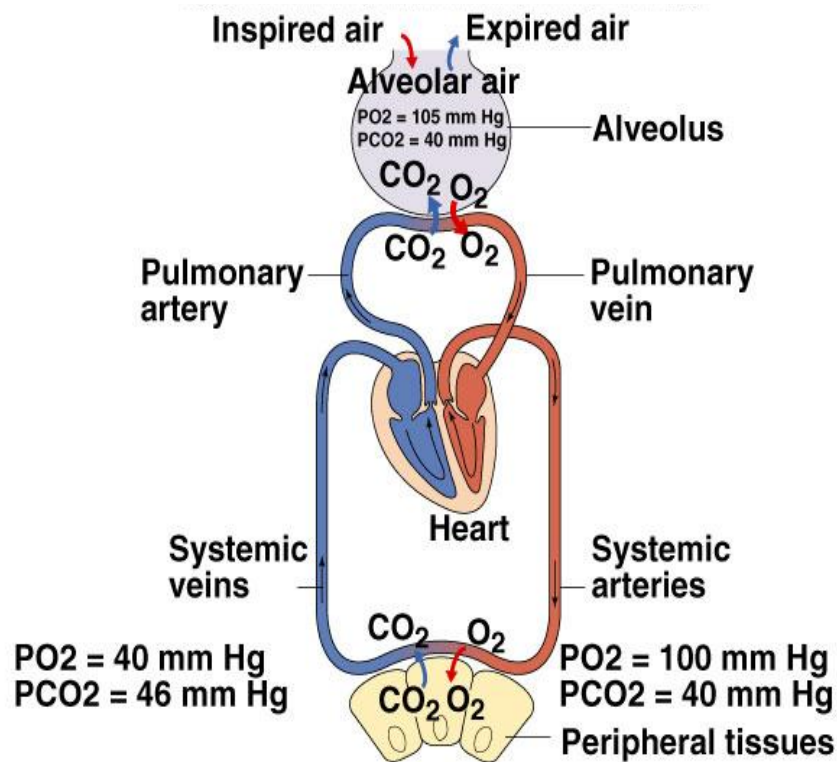
yaitu jumlah volume udara tidal dan volume cadangan inspiratori = 500 ml + 3.100 ml = 3.600 ml. Kapasitas residu fungsional adalah jumlah volume udara residu dan volume udara cadangan ekspiratori = 2.400 ml. Kapasitas vital adalah volume udara cadangan inspiratori = volume udara tidal + volume udara cadangan eskpiratori = 4.800 ml. Akhirnya kapasitas total paru merupakan jumlah semua volume udara yaitu = 6.000 ml



Gambar 3. Hasil pengukuran volume/kapasitas paru antara laki-laki dan perempuan pada kondisi normal.

Respirasi eksternal adalah pertukaran oksigen dan karbondioksida antara paru dan kapiler darah paru. Selama inspirasi, udara atmosfer mengandung oksigen memasuki alveoli. Darah terdeoksigenasi dipompa dari ventrikel kanan melalui arteri pulmonalis menuju kapiler pulmonalis yang menyelubungi alveoli. PO<sub>2</sub> alveolar 105 mmHg, pO<sub>2</sub> darah teroksigenasi yang memasuki kapiler pulmonalis hanya 40 mmHg. Sebagai akibat perbedaan tekanan tersebut, oksigen berdifusi dari alveoli ke dalam darah terdeoksigenasi sampai keseimbangan tercapai, dan pO<sub>2</sub> darah terdeoksigenasi sekarang 105 mmHg. Ketika oksigen difusi dari alveoli ke dalam darah terdeoksigenasi, karbondioksida berdifusi dengan arah berlawanan. Sampai di paru, pCO<sub>2</sub> darah terdeoksigenasi 46 mmHg, sedang di alveoli 40 mmHg. Oleh karena perbedaan pCO<sub>2</sub> tersebut karbondioksida berdifusi dari darah terdeoksigenasi ke dalam alveoli sampai pCO<sub>2</sub> turun menjadi 40 mmHg. Dengan demikian pO<sub>2</sub> dan pCO<sub>2</sub> darah terdeoksigenasi yang meninggalkan paru sama dengan udara dalam alveolar. Karbondioksida yang berdifusi ke alveoli dihembuskan keluar dari paru selama ekspirasi (Soewolo, *et al.* 1999). Pertukaran gas antara karbondioksida dan oksigen dalam paru dan darah pada sistem sistemik dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



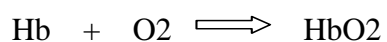


Gambar 4. Pertukaran gas antara karbondioksida dan oksigen dalam paru dan darah pada sistem sistemik

Gas buang cenderung untuk berdifusi dari daerah dengan tekanan partial tinggi ke daerah lain dimana tekanan partialnya lebih rendah yaitu dikarenakan selisih tekanan (*Pressure Gradient*). Selisih tekanan oksigen dari alveoli ke aliran darah dan sebaliknya selisih tekanan karbondioksida dari saluran darah ke alveoli menentukan pertukaran gas-gas tersebut di dalam paru-paru. Keseimbangan terjadi dengan masuknya oksigen ke aliran darah dari paru-paru. Selisih tekanan yang sama terdapat pada tingkatan jaringan darah, dimana karbondioksida dilepaskan oleh jaringan masuk ke aliran darah dan oksigen berdifusi ke dalam jaringan-jaringan. Hal tersebut terjadi pada setiap pernapasan dan pertukaran peredaran darah. Pertukaran gas terjadi karena difusi, dan ini ditentukan sampai tingkat tertentu di udara oleh berat jenis gas yang bersangkutan (Anonim 2008a).

Di alveoli paru-paru, oksigen berdifusi lebih cepat daripada karbondioksida karena berat jenisnya lebih rendah. Difusi gas dalam jaringan tubuh sangat dipengaruhi oleh daya larutnya di dalam cairan-cairan jaringan dan darah, dan oleh karena karbondioksida berkurang lebih 24 kali lebih mudah larut dalam darah dibanding oksigen, maka keseluruhan kecepatan difusi karbondioksida melebihi kecepatan oksigen sekitar 20 kali lipat. Difusi gas dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain : kelainan pada dinding alveoli, peredaran pembuluh darah halus yang tidak sempurna dapat mengurangi suplai darah ke alveoli, mengecilnya alveoli yang dapat mengurangi daerah pemindahan gas. Salah satu dari semua itu dapat menyebabkan kurang oksigen dalam darah atau berkurangnya pengeluaran karbondioksida dari darah (Anonim, 2008a).

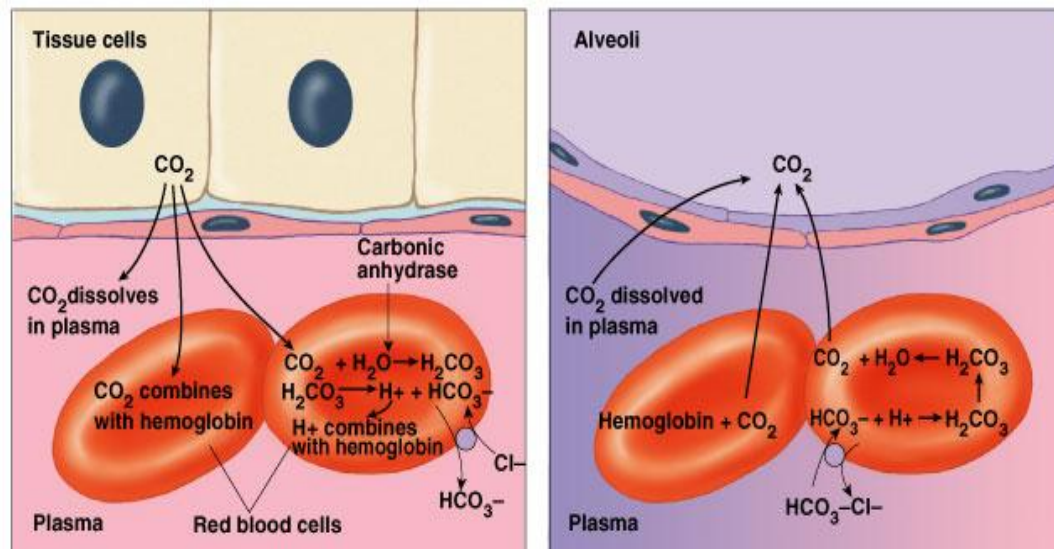
Pengangkutan gas-gas pernapasan antara paru dan jaringan tubuh adalah tugas darah. Bila oksigen dan karbondioksida masuk darah, terjadi perubahan kimiadan fisika tertentu yang membantu pengangkutan dan pertukaran gas. Dalam setiap 100 ml darah teroksigenasi mengandung 20 ml oksigen. Oksigen tidak mudah larut dalamair, karenanya sangat sedikit oksigen yang diangkut dalam keadaan larut dalam plasma darah. Kenyataannya, 100 ml darah teroksigenasi hanya kira-kira 3% terlarut dalam plasma, 97 % sisanya diangkut dalam gabungan kimia dengan hemoglobin dalam eritrosit. Hemoglobin terdiri dari protein yang disebut globin dan pigmen yang disebut heme. Oksigen dan hemoglobin bergabung dalam suatu reaksi bolak-balik yang dengan mudah membentuk oksihemoglobin (Soewolo, *et al.* 1999).



Karbondioksida yang dihasilkan oleh jaringan tubuh berdifusi ke dalam cairan interstitial dan ke dalam plasma. Kurang 10% karbondioksida tersebut tetap tertinggal dalam plasma sebagai CO<sub>2</sub> yang terlarut. Lebih 90% karbondioksida tersebut berdifusi ke dalam sel darah merah. Beberapa diantaranya diambil dan diangkut oleh hemoglobin. Sebagian besar karbondioksida bereaksi dengan ion hidrogen dalam eritrosit untuk membentuk asam karbonat. Sel darah merah mengandung enzim karbonat anhidrase, yang mengkatalisis reaksi. Asam karbonat berdisosiasi menjadi ion bikarbonat dan ion hidrogen. Hemoglobin berikatan dengan sebagian besar ion hidrogen dari asam karbonat, agar tidak bertambah asam. Pengikatan ion hidrogen tersebut menyebabkan ***Bohr Shift***.

Proses perubahan asam karbonat-bikarbonat yang dapat berbalik arah juga membantu menyangga darah, dengan membebaskan atau mengeluarkan ion hidrogen, tergantung pada pH. Sebagian besar ion bikarbonat berdifusi ke dalam plasma, ion-ion diangkut dalam aliran darah ke paru-paru. Kebalikan dari proses yang terjadi dalam kapiler jaringan terjadi di paru-paru. Ion bikarbonat berdifusi dari plasma ke dalam sel darah merah. Ion hidrogen yang dibebaskan dari hemoglobin, bergabung dengan ion bikarbonat untuk membentuk asam karbonat. Karbondioksida dibentuk dari asam karbonat dan dilepaskan dari hemoglobin. Karbondioksida berdifusi keluar dari darah, ke dalam cairan interstitial dan ke dalam ruangan alveoli, sebelum dikeluarkan selama ekshalasi (Campbell, *et al.* 2004). Proses reaksi karbondioksida dalam plasma dan sel jaringan dapat dilihat pada Gambar 5.





Gambar 5. Proses pertukaran karbondioksida dalam plasma dan sel jaringan

Dalam pertukaran ion klor berdifusi ke dalam sel darah merah yang dikenal sebagai *chloride shift*. Ion klor yang masuk plasma dari sel darah merah bergabung dengan ion K untuk membentuk KCl. Ion bikarbonat yang masuk plasma dari sel darah merah bergabung dengan ion Na, membentuk sodium bikarbonat. Rangkaian reaksi tersebut bahwa karbondioksida dibawa dari sel jaringan sebagai ion bikarbonat dalam plasma (Soewolo, *et al.* 1999).

### **PADA KONDISI OLAHRAGA/LATIHAN (*EXERCISE*)**

Latihan/olahraga yang dilakukan dengan level yang tinggi dapat mengakibatkan stress yang ekstrim pada tubuh. Perbandingannya sebagai berikut seorang yang sakit demam akan mengalami peningkatan metabolisme 100% di atas normal, tetapi seorang atlete maraton metabolisme di dalam tubuhnya akan meningkat 2000% di atas normal (Suleman, 2006). Ventilasi paru-paru umumnya diketahui mempunyai hubungan linear dengan konsumsi oksigen pada tingkat

latihan yang berbeda. Pada saat latihan yang intensif konsumsi oksigen akan meningkat. Seorang atlet yang latihan teratur mempunyai kapasitas paru yang lebih besar dibandingkan dengan individu yang tidak pernah berlatih (Adegoke and Arogundade, 2002). Nilai ventilasi paru pada saat istirahat, latihan sedang dan berat dapat dilihat pada tabel berikut :

| <b>TYPICAL VALUES FOR PULMONARY VENTILATION DURING REST AND MODERATE AND VIGOROUS EXERCISE</b> |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <b>Condition</b>   | <b>Breathing Rate<br/>(breaths · min<sup>-1</sup>)</b> | <b>Tidal Volume<br/>(L · breath<sup>-1</sup>)</b> | <b>Pulmonary Ventilation<br/>(L · min<sup>-1</sup>)</b> |
| Rest   | 12   | 0.5   | 6   |
| Moderate exercise  | 30   | 2.5   | 75  |
| Vigorous exercise  | 50   | 3.0   | 150   |

Gambar 6. Nilai ventilasi paru pada saat istirahat, latihan sedang dan berat (Sumber : Anonim, 2008d)

Pada kondisi normal laju respirasi selama istirahat dalam lingkungan termonetral yaitu 12 kali/menit, dan tidal volume 500 ml. Dengan demikian volume udara pernapasan dalam satu menit (*minute ventilation*) sama dengan 6 liter. Namun pada saat latihan yang intensif laju respirasi meningkat 35-45 kali/menit. Pada seorang atlet yang terlatih laju respirasi dapat mencapai 60-70 kali/menit selama latihan maksimal. Tidal volume juga meningkat 2 liter atau lebih selama latihan. Pada atlet pria, ventilasi paru dapat meningkat 160 liter/menit selama latihan maksimal (Anonim, 2008d). Beberapa penelitian melaporkan bahwa volume ventilasi paru dalam satu menit dapat mencapai 200

liter, bahkan pada atlet football profesional dapat mencapai 208 liter (Wilmore dan Haskell, 1972).

Terdapat hubungan yang kecil antara volume dan kapasitas paru dengan bermacam-macam jenis olah raga. Seperti pada pelari maraton dibandingkan dengan yang bukan pelari dengan ukuran tubuh yang sama, tidak ada perbedaan yang nyata untuk nilai fungsi paru (seperti dilihat pada tabel di bawah). Lebih besarnya volume paru dan kemampuan respirasi pada seorang atlet dimungkinkan karena faktor genetik. Beberapa peningkatan fungsi paru merupakan refleksi kekuatan otot paru-paru terhadap latihan yang spesifik (Anonim, 2008d)

**TABLE 12.1 ► ANTHROPOMETRIC DATA, PULMONARY FUNCTION, AND RESTING MINUTE VENTILATION IN 20 MARATHON RUNNERS AND HEALTHY CONTROLS**

| MEASURE                                     | RUNNERS | CONTROLS | DIFFERENCE <sup>a</sup> |
|---|---------|----------|-------------------------|
| <b>ANTHROPOMETRIC</b>                       |         |          |                         |
| Age, y                                      | 27.8    | 27.4     | 0.4                     |
| Stature, cm                                 | 175.8   | 176.7    | 0.9                     |
| Surface area, m <sup>2</sup>                | 1.82    | 1.89     | 0.07                    |
| <b>PULMONARY FUNCTION</b>                   |         |          |                         |
| FVC, L                                      | 5.13    | 5.34     | 0.21                    |
| TLC, L                                      | 6.91    | 7.13     | 0.22                    |
| FEV <sub>1.0</sub> , L                      | 4.32    | 4.47     | 0.15                    |
| FEV <sub>1.0</sub> / FVC, %                 | 84.3    | 83.8     | 0.5                     |
| MVV, L · min <sup>-1</sup>                  | 179.8   | 176.0    | 3.8                     |
| <b>RESTING VENTILATION</b>                  |         |          |                         |
| $\dot{V}_E$ , L · min <sup>-1</sup>         | 11.9    | 11.9     | 0.9                     |
| Breathing rate, breaths · min <sup>-1</sup> | 10.9    | 11.1     | 0.2                     |
| Tidal volume, L                             | 1.16    | 1.06     | 0.10                    |

From Mahler DA, et al. Ventilatory responses at rest and during exercise in marathon runners. *J Appl Physiol* 1982;52:388.  
<sup>a</sup>All differences not statistically significant.

Gambar 7. Hasil pengukuran antropometrik tubuh, fungsi paru, dan ventilasi paru dalam satu menit

Volume paru berhubungan dengan ukuran badan, dimana seorang yang tubuhnya besar mempunyai paru yang besar (Brian, 2004). Volume paru ditentukan juga oleh luas permukaan tubuh untuk pertukaran gas. Salah satu kemungkinannya adalah volume paru dan luas permukaan yang besar dapat memberikan keuntungan untuk pertukaran gas pada saat latihan aerobik. Namun hal tersebut tidak terlihat pada kasus tertentu, seperti pelari marathon mempunyai volume paru yang tidak berbeda dengan seorang yang bukan pelari dengan ukuran tubuh yang sama (Brian, 2004). Luas permukaan paru yang besar ditemukan pada seorang yang memerlukan pertukaran gas lebih banyak, seperti pada atlet perenang mempunyai volume paru yang besar dibandingkan dengan bukan perenang. Volume paru yang besar pada seorang perenang mungkin karena perubahan adaptif pada saat respirasi (Brian, 2004).

### **RESPIRASI PADA KONDISI KETINGGIAN YANG BERBEDA**

Pengetahuan terapan hukum-hukum fisika yang berhubungan sistem pernapasan pada kondisi ketinggian tertentu (penyelaman, penerbangan dan puncak gunung) adalah sangat penting. Hal tersebut disebabkan perubahan sifat atmosfer pada ketinggian tertentu dapat merugikan faal tubuh khususnya dan kesehatan pada umumnya (Danasastro, 2008). Hukum gas berguna untuk menjelaskan gangguan fisiologi pada penerbangan atau penyelaman (Anonim 2008a; Danasastro, 2008).

#### **1). Hukum Difusi Gas**

Hukum difusi gas ini penting untuk menjelaskan pernapasan, baik pernapasan luar maupun dalam. Hukum ini mengatakan bahwa gas akan berdifusi

dari tempat yang bertekanan parsialnya tinggi ke tempat yang tekanan parsialnya rendah. Selanjutnya kecepatan berdifusi ditentukan oleh besarnya selisih tekanan parsial tersebut dan tebalnya dinding pemisah.

## 2) Hukum Boyle

Hukum ini penting untuk menjelaskan masalah penyakit dekompresi. Hukum Boyle ini mengatakan bahwa apabila volume suatu gas tersebut berbanding terbalik dengan tekanannya.

$$P \cdot V = C$$

P = pressure atau tekanan; C = constant atau tetap;  
V = volume atau isi

## 3) Hukum Dalton

Hukum ini penting untuk menghitung tekanan parsial gas dalam suatu campuran gas, misalnya menghitung tekanan parsial oksigen dalam udara pernapasan pada beberapa ketinggian guna menjelaskan hipoksia. Hukum ini mengatakan bahwa tekanan total suatu campuran gas sama dengan jumlah tekanan parsial gas-gas penyusun campuran tersebut.

$$P_t = P_1 + p_2 + \dots + P_n$$

P<sub>t</sub> = tekanan total campuran gas  
P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> dan seterusnya adalah tekanan parsial masing-masing gas

## 4. Hukum Henry

Hukum ini penting untuk menjelaskan penyakit dekompresi, seperti bends, chokes, dan sebagainya yang dasarnya adalah penguapan gas yang larut. Hukum ini mengatakan bahwa jumlah gas yang larut dalam suatu cairan tertentu berbanding lurus dengan tekanan parsial gas tersebut pada permukaan cair tersebut.

$$A_1 \times P_1 = A_2 \times P_2$$

A = jumlah gas yang larut  
P = tekanan parsial gas pada permukaan cairan



## 5. Hukum Charles

Hukum ini penting untuk menjelaskan tentang turunnya tekanan oksigen atau berkurangnya persediaan oksigen bila isi tetap, maka tekanan gas tersebut berbanding lurus dengan suhu absolutnya. Jadi apabila seseorang membawa oksigen dalam botol pada penerbangan tinggi, suhunya akan lebih rendah, maka tekanan gas tersebut akan menurun pula atau dengan kata lain persediaan oksigen akan berkurang. Bila isi tetap :

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

$P_1$  = Tekanan semula  
 $P_2$  = tekanan yang baru  
 $T_1$  = tekanan absolut mula-mula  
 $T_2$  = Suhu absolut kemudian

## KONDISI PENYELAMAN

Bernapas merupakan sesuatu hal yang sangat penting pada kehidupan, terutama bagi seorang penyelam. Pada saat penyelaman tekanan atmosfer di permukaan laut dengan di dalam laut berbeda. Tekanan atmosfer akan menurun pada ketinggian karena atmosfer di atasnya berkurang, sehingga udara pun berkurang. Demikian sebaliknya tekanan akan meningkat bila seorang menyelam di bawah permukaan air. Hal tersebut disebabkan perbedaan berat dari atmosfer dan berat dari air di atas penyelam. Berdasarkan hukum pascal yang menyatakan bahwa tekanan terdapat di permukaan cairan akan menyebar ke seluruh arah secara merata dan tidak berkurang pada setiap tempat di bawah permukaan laut. Tekanan akan meningkat sebesar 760 mmHg (1 atmosfer) untuk setiap kedalaman 10 m (33 kaki). Satuan-satuan dari jumlah tekanan adalah atmosfer absolut (ATA), sedangkan ukuran tekanan (*Gauge Pressure*) menunjukkan tekanan yang terlihat

pada alat pengukur dimana terbaca 0 pada tingkat permukaan, karena tekanan tersebut selalu 1 atmosfer lebih rendah daripada tekanan absolut (Anonim, 2008a).

Tabel 1. Ukuran tekanan pada berbagai kedalaman

| Kedalaman (depth) | Tekanan Absolut | (Gauge Pressure) |
|-------------------|-----------------|------------------|
| Dipermukaan       | 1 ATA           | 0 ATG            |
| 10 meter          | 2 ATA           | 1 ATG            |
| 20 meter          | 3 ATA           | 2 ATG            |
| 30 meter          | 4 ATA           | 3 ATG            |

Seorang penyelam yang menghirup napas penuh di permukaan akan merasakan paru-parunya semakin lama semakin tertekan oleh air di sekelilingnya sewaktu penyelam tersebut turun. Sebelum penyelaman, tekanan udara di dalam paru-paru seimbang dengan tekanan udara atmosfer, yang rata-rata 760 mmHg atau 1 atmosfer pada permukaan laut. Namun pada saat menyelam, udara mengalir ke dalam paru, tekanan udara di dalam paru harus lebih rendah daripada tekanan udara atmosfer. Kondisi tersebut diperoleh dengan membesarnya volume paru. Menurut hukum Boyle tekanan gas di dalam tempat tertutup berbanding terbalik dengan besarnya volume. Bila ukuran tempat diperbesar, tekanan udara di dalamnya turun. Bila ukuran diperkecil, tekanan udara di dalamnya naik. Hukum Boyle berlaku terhadap semua gas-gas di dalam ruangan-ruangan tubuh sewaktu penyelam masuk ke dalam air maupun sewaktu naik ke permukaan (Anonim, 2008a).

Sebagai contoh, apabila seorang penyelam Scuba menghirup napas penuh (6 liter) pada kedalaman 10 meter (2 ATA), menahan napasnya dan naik ke permukaan (1 ATA), udara di dalam dadanya akan berlipat ganda volumenya menjadi 12 liter, maka penyelam tersebut harus menghembuskan 6 liter udara

selagi naik untuk menghindari agar paru-parunya tidak meledak. Sesuai hukum Boyle maka perhitungannya sebagai berikut :

$$\begin{array}{ll}
 P_1V_1 = P_2V_2 & P_1V_1 = 2 \times 6 \\
 P_1 = 2 \text{ ATA} & V_2 = \frac{12}{2} \\
 V_1 = 6 \text{ liter} & \quad \quad \quad 1 \\
 P_2 = 1 \text{ ATA} & V_2 = 12 \text{ liter} \\
 V_2 = ? &
 \end{array}$$

Di permukaan laut (1 ATA) dalam tubuh manusia terdapat kira-kira 1 liter larutan nitrogen. Apabila seorang penyelam turun sampai kedalaman 10 meter (2 ATA) tekanan parsial dari nitrogen yang dihirupnya menjadi 2 kali lipat dan akhirnya yang terlarut dalam jaringan juga menjadi 2 kali lipat (2 liter). Waktu sampai terjadinya keseimbangan tergantung pada daya larut gas di dalam jaringan dan pada kecepatan suplai gas ke dalam jaringan oleh darah. Hal tersebut sesuai dengan hukum Henry yang menyatakan bahwa pada suhu tertentu jumlah gas yang terlarut di dalam suatu cairan berbanding lurus dengan tekanan partial dari gas tersebut di atas cairan (Anonim, 2008a).

Pada kondisi di atas permukaan laut gas nitrogen terdapat dalam udara pernapasan sebesar 79%. Nitrogen tidak mempengaruhi fungsi tubuh karena sangat kecil yang larut dalam plasma darah, sebab rendahnya koefisien kelarutan pada tekanan di atas permukaan laut. Tetapi bagi seorang penyelam Scuba atau pekerja Caisson (pekerja pembangun saluran di bawah air) yang berada pada kondisi udara pernapasan di bawah tekanan tinggi, jumlah nitrogen yang terlarut dalam plasma darah dan cairan interstitial sangat besar. Hal tersebut mengakibatkan pusing atau mabuk, yang disebut dengan gejala *nitrogen narcosis* (Soewolo, *et al.* 1999).

Bila seorang penyelam di bawa ke permukaan perlahan-lahan, nitrogen terlarut dapat dihilangkan melalui paru. Namun demikian bila seorang penyelam naik ke permukaan dengan cepat, nitrogen keluar larutan dilepas melalui respirasi dengan cepat sekali, malahan akan membentuk gelembung gas dalam jaringan, yang mengakibatkan *decompression sickness* atau *cassion* atau *cassion bends*. Penyakit ini khusus akibat dari adanya gelembung gas dalam jaringan saraf, bisa pada tingkat sedang atau hebat bergantung pada jumlah gelembung gas yang terbentuk. Gejalanya meliputi rasa sakit di persendian, terutama lengan dan kaki, pening, napas pendek, sangat lelah, paralisis dan rasa tidak enak badan. Hal tersebut dapat dicegah dengan cara menaikkan secara perlahan ke atas permukaan laut (Soewolo, *et al.* 1999).

## **RESPIRASI PADA TEMPAT TINGGI**

Tekanan barometer di berbagai ketinggian tempat berbeda. Pada ketinggian permukaan laut tekanan barometer 760 mmHg, sedangkan pada ketinggian 10.000 kaki di atas permukaan laut hanya 523 mmHg, dan pada 50.000 kaki adalah 87 mmHg. Penurunan tekanan barometer merupakan dasar penyebab semua persoalan hipoksia pada fisiologi manusia di tempat tinggi. Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa seiring dengan penurunan tekanan barometer akan terjadi juga penurunan tekanan oksigen parsial yang sebanding, sehingga tekanan oksigen selalu tetap sedikit lebih rendah 20%-21% dibanding tekanan barometer total. Jadi pada ketinggian permukaan laut total tekanan atmosfer 760 mmHg, ketika di atas 12.000 kaki tekanan barometernya hanya 483mmHg Dalam hal ini terjadi penurunan total tekanan atmosfer, yang berarti lebih sedikit 40% molekul

per pernapasan pada saat berada di tempat tinggi dibandingkan dengan permukaan laut (Anonim, 2008c).

Apabila seseorang berada di tempat yang tinggi selama beberapa hari, minggu, atau tahun, menjadi semakin teraklimatisasi terhadap tekanan parsial oksigen yang rendah, sehingga efek buruknya terhadap tubuh makin lama semakin berkurang. Proses aklimatisasi umumnya antara satu sampai tiga hari (Anonim, 2008c). Prinsip-prinsip utama yang terjadi pada aklimatisasi ialah peningkatan ventilasi paru yang cukup besar, sel darah merah bertambah banyak, kapasitas difusi paru meningkat, vaskularisasi jaringan meningkat, dan kemampuan sel dalam menggunakan oksigen meningkat, sekalipun tekanan parsial oksigennya rendah (Guyton, 1994).

Aklimatisasi meliputi beberapa perubahan struktur dan fungsi tubuh, seperti mekanisme kemoreseptor meningkat, tekanan arteri pulmonalis meningkat. Selanjutnya tubuh memproduksi sel darah merah lebih banyak di dalam sumsum tulang untuk membawa oksigen, tubuh memproduksi lebih banyak enzim 2,3-biphosphoglyserate yang memfasilitasi pelepasan oksigen dari hemoglobin ke jaringan tubuh. Proses aklimatisasi secara perlahan menyebabkan dehidrasi, urinasi, meningkatkan konsumsi alkohol dan obat-obatan. Dalam waktu yang lama dapat meingkatkan ukuran alveoli, menurunkan ketebalan membran alveoli, yang diikuti dengan perubahan pertukaran gas (Anonim, 2008b).

Setelah mengalami aklimatisasi seseorang di tempat yang tinggi akan mengalami peningkatan kapasitas difusi oksigen. Kapasitas difusi normal oksigen ketika melalui membran paru kira-kira 21 ml/mmHg/menit. Kapasitas difusi tersebut dapat meningkat sebanyak tiga kali lipat selama olahraga. Sebagian dari

peningkatan tersebut disebabkan oleh volume darah kapiler paru yang sangat meningkat. Sebagian lagi disebabkan oleh peningkatan volume paru yang mengakibatkan meluasnya permukaan membran alveolus. Terakhir disebabkan peningkatan tekanan arteri paru. Tekanan tersebut akan mendorong darah masuk lebih banyak ke kapiler alveolus (Guyton, 1994).

Seorang atlete untuk kompetisi pada tempat dengan lokasi ketinggian yang bervariasi perlu melakukan proses aklimatisasi sebelum perlombaan. Seorang pemanjat gunung pada ketinggian sedang akan mengalami penurunan tekanan atmosfer 7-8%. Orang tersebut akan mengalami penurunan pemasukan oksigen sehingga diduga dapat menurunkan kekuatan otot 4-8% tergantung durasi kompetisi. Hal tersebut tidak menguntungkan untuk mencapai finis, apabila hal tersebut terjadi tanpa melakukan aklimatisasi terlebih dahulu (Anonim, 2008c). Meskipun seorang atlete yang melakukan persiapan (*exercise*) dan aklimatisasi dengan baik, tidak akan sama dengan penduduk asli di pegunungan Andes, yang memiliki kapasitas dada yang besar, alveoli dan pembuluh kapiler besar dan jumlah sel darah merah lebih banyak (Anonim, 2008c).

Aklimatisasi alami pada orang yang tinggal di tempat tinggi, seperti penduduk yang tinggal di pegunungan Andes dan Himalaya (ketinggian 13.000-19.000 kaki) mempunyai kemampuan yang sangat superior dalam hubungannya dengan sistem respirasi, dibandingkan dengan penduduk dari tempat rendah dengan kemampuan aklimatisasi yang terbaik tinggal di tempat tinggi. Proses aklimatisasi tersebut telah dimulai semenjak bayi. Terutama ukuran dadanya sangat besar, sedangkan ukuran tubuhnya sedikit lebih kecil, sehingga rasio kapasitas ventilasi terhadap massa tubuh menjadi besar. Selain itu, jantungnya

terutama jantung kanan jauh lebih besar daripada jantung orang yang tinggal di tempat rendah. Jantung kanan yang besar tersebut menghasilkan tekanan yang tinggi dalam arteri pulmonalis sehingga dapat mendorong darah melalui kapiler paru yang telah sangat melebar (Guyton, 1994).

Pengangkutan oksigen oleh darah ke jaringan lebih mudah pada orang yang telah teraklimatisasi di tempat tinggi. Tekanan parsial O<sub>2</sub> pada orang-orang yang tinggal di tempat tinggi hanya 40 mmHg, tetapi karena jumlah haemoglobinnya lebih banyak, maka jumlah oksigen dalam darah arteri menjadi lebih banyak dibanding oksigen dalam darah pada penduduk yang tinggal di tempat yang rendah. Selanjutnya tekanan parsial O<sub>2</sub> vena pada penduduk di tempat tinggi 15 mmHg lebih rendah daripada tekanan parsial O<sub>2</sub> vena pada penduduk di tempat rendah, sekalipun tekanan parsial O<sub>2</sub> nya rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengangkutan oksigen ke jaringan adalah lebih baik pada penduduk yang secara alami telah mengalami aklimatisasi (Guyton, 1994).

## **PENUTUP**

Sistem pernapasan merupakan proses pertukaran gas yang terjadi di dalam tubuh, sangat penting untuk kelangsungan hidup. Ventilasi paru mempertahankan konsentrasi oksigen maksimum dan konsentrasi karbondioksida minimum di dalam alveoli. Gas-gas berdifusi menuruni gradien tekan dalam paru-paru dan organ-organ lain. Oksigen dan karbondioksida berdifusi dari tempat di mana tekanan parsialnya lebih tinggi ke tempat di mana tekanan parsialnya lebih rendah. Seorang atlete harus melakukan aklimatisasi sebelum latihan untuk

penyesuaian sistem pernapasannya, agar tidak terjadi gangguan pada struktur atau fungsi fisiologis tubuh.

### DAFTAR PUSTAKA

- Adegoke OA, Arogundade O. 2002. The effect of chronic exercise on lung function and basal metabolic rate some Nigerian athlete. *African Journal of Biomedical Research*. 5: 9-11.
- Amonette WE, Dupler TL. 2002. The effect of respiratory muscle training on VO<sub>2</sub> max, the ventilatory threshold and pulmonary function. *J. of Exercise Physiology online*. 5(2):29-35.
- Anonim. 2008a. Menyelam. [www.coremap.or.id/downloads/menyelam\\_1158562081.pdf](http://www.coremap.or.id/downloads/menyelam_1158562081.pdf)
- Anonim. 2008b. The effect of altitude on human physiology. <http://www.planetpapers.com/Assets/444.php>
- Anonim. 2008c. Respiratory system. <http://www.brianmac.co.uk/physiollr.html>
- Anonim. 2008d. Pulmonary structure and function. [http://www.cristina.prof.ufsc.br/respiratorio/mcardle\\_pulmonary-struct-function-ch12-connection.pdf](http://www.cristina.prof.ufsc.br/respiratorio/mcardle_pulmonary-struct-function-ch12-connection.pdf)
- Brian JE, 2007. Breathing, Aerobic Conditioning and Gas Consumption. [http://www.gue.com/Research/Exercise/q2\\_3g.html](http://www.gue.com/Research/Exercise/q2_3g.html)
- Campbell NA, Reece JB, and Mitchell LG. 2004. *Biologi*. Alih Bahasa : Wasmen Manalu. Jakarta : Erlangga.
- Danusastro S. 1995. Aspek Aerofisiologi dalam penerbangan. *Cermin Dunia Kedokteran International Standar Serial Number 0125-913x* :5-17
- Ganong WF. 1995. *Fisiologi Kedokteran*. Edisi ke-14. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran, EGC.
- Guyton AC. 1994. *Fisiologi Tubuh Manusia*. Jakarta: Binarupa Aksara.
- Setiadji S, Nur BM, Gunawan B. 2008. Uji Faal Paru. *Cermin Dunia Kedokteran* 24: 7-11
- Soewolo, Basoeki S, Yudani T. 1999. *Fisiologi Manusia*. IMSTEP JICA-Universitas Negeri Malang.



Suleman A. 2006. Exercise Physiology. <http://www.emedicine.com/sport/topic145.html>

Wilmore and Haskell, 1972. Body composition and endurance capacity of professional football player. *J. Appl Physiol*, 33:564