

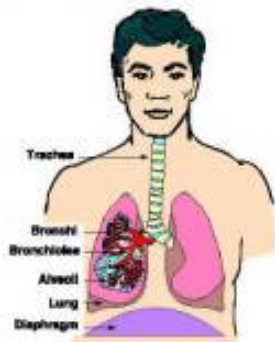
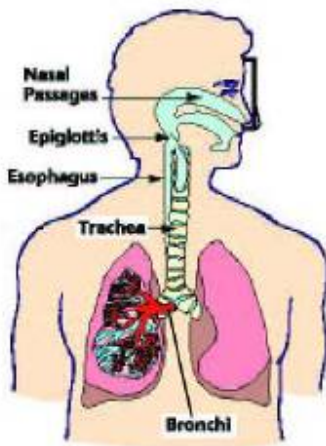
FISIOLOGI PENYELAMAN

Penyesuaian Terhadap Pengaruh Dalam Air

Manusia dan teknologi berkemampuan untuk mengadaptasikan dirinya terhadap lingkungan dalam dunia penyelaman. Cara beradaptasi dalam lingkungan air tersebut, tentunya melalui proses pembelajaran terhadap batasbatas kemampuan fisiologinya. Fisiologi penyelaman dalam bab ini memaparkan fungsi-fungsi tubuh dan reaksi tubuh manusia di dalam air.



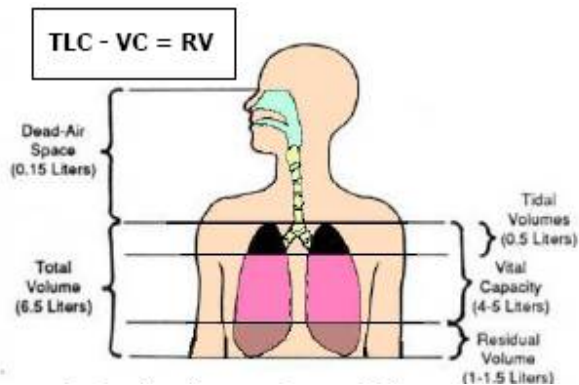
Paru-paru & Fungsi Pernafasan



Proses bernafas membuat O₂ (Oksigen) dari udara yang dihirup dapat disuplai melalui darah ke semua bagian tubuh dan melepaskan CO₂ (Carbon Dioksida). Udara masuk ke paru-paru melalui airway (jalan nafas) seperti pipa yang makin menyempit (bronchi dan bronchioles) dan bercabang di kedua sisi paru-paru dari saluran udara utama (trachea). Aliran udara berakhir di alveoli (gelembung paru-paru) yang merupakan kantong-kantong udara terakhir dimana proses pertukaran O₂ dan CO₂ dari sirkulasi darah tubuh. Terdapat lebih dari 300 juta kantong alveoli di dalam paru-paru seseorang. Kantong udara ini dipelihara dalam keadaan terbuka oleh bahan-bahan kimia semacam deterjen yang dapat menetralkan kecenderungan alveoli untuk mengempis. Permukaan bagian luar paru-paru ditutup oleh Pleuran (selaput paru) yang licin. Selaput tersebut membatasi permukaan dari dinding dada. Kedua selaput ini terletak berdekatan sekali dan dipisahkan oleh suatu lapisan tipis cairan yang dinamakan 'Intra Pleural Space' (ruang antara rongga selaput dada). Saat inspirasi (menarik nafas), dinding dada secara aktif tertarik keluar oleh pengerutan otot dinding sehingga diafragma (sekat rongga dada) tertarik ke bawah. Berkurangnya tekanan di dalam rongga dada menyebabkan udara mengalir ke dalam paru-paru. Terjadi upaya maksimal pengurangan tekanan yang dapat mencapai 60 sampai 100 mmHg dibawah tekanan 1 atmosfer. Saat ekspirasi (membuang nafas), paru-paru dan dinding dada mengerut. Tekanan yang meningkat di dalam dada memaksa gas-gas keluar dari paru-paru. Hal tertentu dapat terjadi tanpa upaya otot, tetapi perlu dibantu melalui tambahan hembusan nafas.

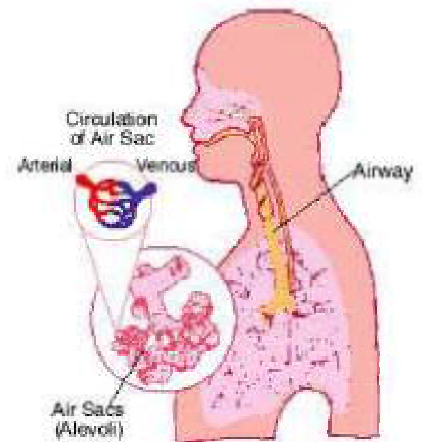
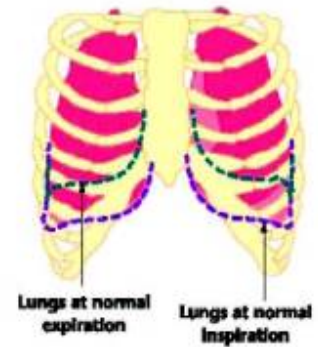
Fungsi Pernafasan: Pengukuran fungsi pernafasan ada bermacam-macam, tetapi berikut adalah beberapa hal penting yang berhubungan dengan penyelaman. Adapun pengukuran fungsi pernafasan yang dimaksud antara lain:

- Total Lung Capacity=TLC (Kapasitas total paru-paru): dimana jumlah volume gas yang dapat ditampung oleh kedua paru-paru bila terisi penuh. Umumnya + 5-6 liter.
- Vital Capacity=VC (Kapasitas vital): adalah volume gas maksimal yang dapat dihembuskan keluar setelah dihirup secara maksimal. Umumnya + 4-5 liter. Kondisi ini juga disebut Forced Vital Capacity=FVC (daya tampung vital yang dipaksakan)
- Residual Volume=RV (Volume tersisa): adalah jumlah gas yang tertinggal di dalam paru-paru setelah dihembuskan secara maksimal. Umumnya + 1,5 liter. Sehingga secara pengukuran sederhana maka dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :



Jika diperhatikan: RV kurang lebih 25% dari TLC.

- Tidal Volume (TV): adalah volume gas yang bergerak masuk dan keluar dari paru-paru selagi suatu putaran pernafasan sedang istirahat secara normal. Ini biasanya kurang lebih 0,5 liter.
- Respiration Minute Volume=RMV (Volume pernafasan semenit): adalah jumlah gas yang bergerak masuk dan keluar dari paru-paru dalam satu menit yaitu TV x frekuensi pernafasan = RMV. Umumnya + 6 liter/menit dalam keadaan istirahat (0,5 liter x 12kali), tetapi dapat melebihi 100 liter saat melakukan latihan yang berat. Kondisi tertentu RMV juga disebut Pulmonary Ventilation (ventilasi paru-paru)
- Timed Vital Capacity (Kapasitas vital sewaktu): adalah bagian dari VC yang dapat dihembuskan dalam waktu tertentu, umumnya dalam 1 detik dan sering disebut Forced



Expiratory Volume=FEV (volume ekspirasi yang dipaksakan). Orang dewasa yang sehat VC harus melebihi 75% dari FEV, tetapi berkurangnya kemampuan karena mengidap penyakit seperti asma, bronchitis, emphysema, dll, membuat gerakan udara yang melalui saluran udara melemah karena menyempitnya saluran atau kekenyalan dari paru yang disebabkan oleh pengerasan, goresan, dan hal lainnya.

Pemeriksaan kondisi dan kemampuan paru-paru secara medis harus dilakukan dengan teliti dan cermat terutama jika akan melakukan aktifitas penyelaman guna menghindari kecenderungan mengidap penyakit Pulmonary Barotrauma/Brust Lung (pengkerutan paru).

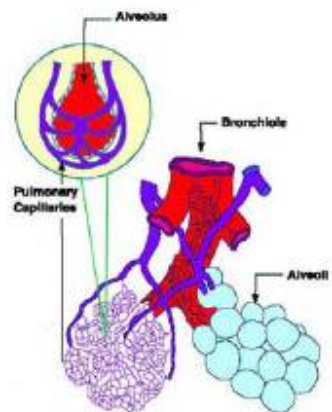
Parameter-parameter diatas menjadi mekanisme yang penting untuk memahami fisiologi pernafasan yang secara relatif memungkinkan prediksi terhadap kondisi:

- Resiko barotrauma paru sewaktu descent (bergerak turun) dan ascent (bergerak naik)
- Durasi, konsumsi dan aktifitas yang berhubungan dengan udara tabung terutama jika terpakai habis.
- Kedalaman maksimum yang aman saat menyelam skin diving.
- Kelelahan bernafas dikarenakan peralatan selam kurang berdaya guna.
- Kekurangan O₂ (Hypoxia) dikarenakan ventilasi paru-paru yang tak cukup dan hal-hal lainnya.

Struktur Alveoli berupa kantong kecil dan tipis, melekat erat dengan lapisan pembuluh-pembuluh darah halus (kapiler) yang membawa darah bebas O₂ dari jantung. Molekul O₂ disaring melalui dinding pembuluh darah tersebut untuk masuk ke aliran darah. Sama halnya dengan CO₂ yang dilepaskan dari aliran darah ke dalam kantong udara untuk dikeluarkan melalui pernafasan. Saat tersebut akan menentukan jumlah oksigen yang masuk ke dalam darah dan jumlah CO₂ yang dikeluarkan dari darah.

Gas cenderung untuk berdifusi dari daerah dengan tekanan partial tinggi ke daerah dengan tekanan partial lebih rendah terjadi karena selisih tekanan (pressure gradient). Selisih tekanan O₂ dari aveoli ke aliran darah atau sebaliknya, selisih tekanan CO₂ dari saluran darah ke aveoli menentukan pertukarangas tersebut di paru-paru. Keseimbangan akan terjadi dengan masuknya O₂ ke aliran darah dari paru-paru dan dengan masuknya CO₂ dari aliran darah ke paru-paru.

Selisih tekanan yang sama juga terjadi pada tingkat jaringan darah, dimana CO₂ lepas oleh jaringan masuk ke aliran darah dan O₂ berdifusi di dalam jaringan tubuh. Proses ini berulang di tiap proses pernafasan dan sirkulasi darah. Pertukaran gas melalui proses difusi yang bergantung pada

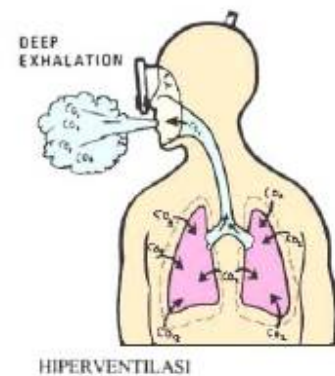


tingkatan yang sesuai dengan BJ (berat jenis) gas bersangkutan. Di alveoli, O₂ berdifusi lebih cepat dari CO₂ karena BJ-nya lebih rendah.

Difusi gas di dalam jaringan tubuh sangat dipengaruhi oleh daya larutnya di dalam cairan jaringan dan darah. Karena CO₂ +24 kali lebih mudah larut di dalam darah dibandingkan O₂, maka keseluruhan kecepatan difusi CO₂ akan meningkat + 20 kali lipat. Difusi gas akan menurun dipengaruhi beberapa faktor seperti kelainan-kelainan dinding alveoli, peredaran pembuluh darah halus yang tidak sempurna mengurangi suplai darah ke alveoli. Salah satu dari hal diatas juga menyebabkan kurangnya O₂ kedalam darah dan berkurangnya CO₂ dari darah. Jadi Hypoxia (kekurangan O₂) / Hypercapnia (kelebihan CO₂) dapat terjadi.

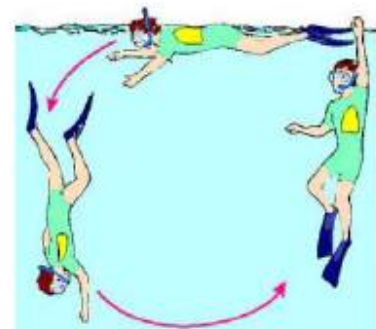
Pengawasan Pernafasan

Untuk mempertahankan kadar O₂ dan CO₂, volume pernafasan semenit harus seimbang dengan pemakaian O₂ dan kecepatannya dalam menghasilkan CO₂. Pernafasan diatur oleh pusat pernafasan utama sesuai kadar CO₂ di dalam darah. Pengaruh sensor di dalam aorta dan arteri karotis akan mengamati perubahan-perubahan kadar O₂ dalam darah. Hal ini menerangkan mengapa ketidak-sadaran dapat terjadi bila melakukan hiperventilasi sebelum penyelaman tahan nafas. Hiperventilasi dapat membuat pusat pernafasan tidak dirangsang oleh pengeurangan kadar CO₂, sehingga berdampak pada kegagalan bereaksi terhadap bahaya kekurangan kadar O₂ juga selama menyelam dan sewaktu ascent.



Bahaya Hiperventilasi

Setelah melakukan hiperventilasi, penyelam saat descent masih tetap merasa nyaman. Namun saat ascent, tekanan partial O₂ menurun dengan cepat, penyelam mulai merasa sesak dan perasaan sukar bernafas. Pada beberapa kasus menyebabkan hilangnya kesadaran yang dikenal dengan istilah 'shallow water black-out' karena telah terjadi anoxia (kehabisan oksigen). Teknik hiperventilasi jangan dilakukan berlebihan, cukup dilakukan 2 atau 3 kali saja, dan jangan memaksakan kondisi diri saat skin diving. Gejala-gejala hiperventilasi yang berlebihan adalah merasa lemah, pusing, sakit kepala dan berkunang-kunang, bahkan mungkin terjadi black-out (pingsan) di kedalaman.



Jantung & Fungsi Peredaran Darah

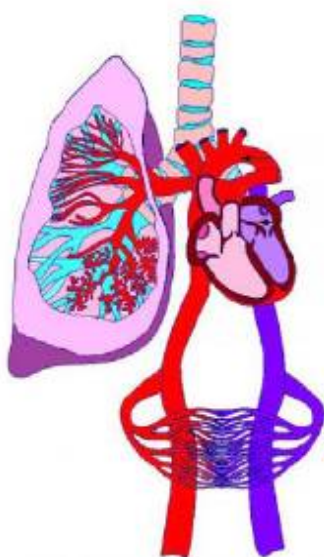
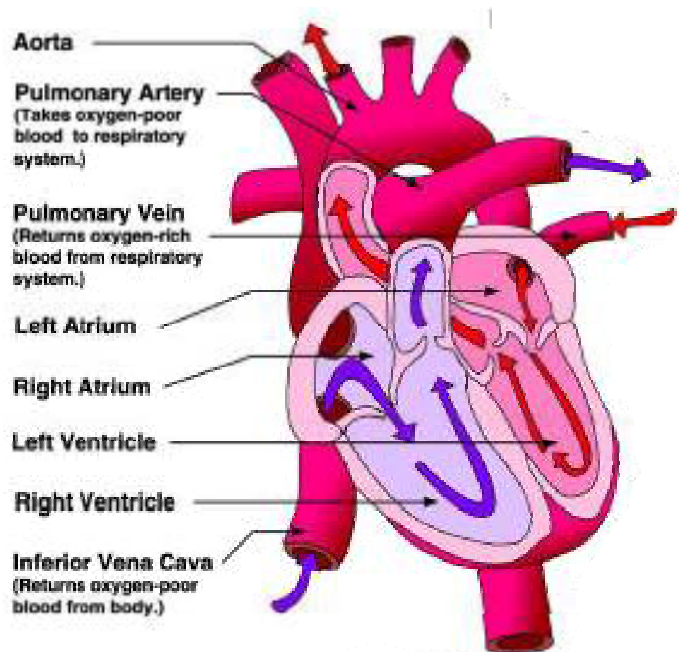
Peredaran darah yang dimaksud secara sederhana adalah proses transportasi O₂ ke dan dari jaringan-jaringan tubuh dengan membawa kembali CO₂ ke paru-paru. Sistem sirkulasi dikendalikan oleh jantung selayaknya pompa sentral. Darah dari jantung ke jaringan melalui pembuluh darah besar yang disebut Arteri. Kemudian bercabang-cabang ke pembuluh kecil (Arterioli) hingga ke jaringan tubuh berupa pembuluh-pembuluh halus (kapiler). Jaringan pembuluh kapiler membawa kembali darah yang tidak mengandung O₂, masuk ke pembuluh-pembuluh darah kecil yang akan bergabung ke sistem

pembuluh darah balik yang lebih besar disebut Vena dan kembali ke jantung. Istilah sirkulasi muatan darah di paru-paru terbalik dengan organ jantung, karena disini arteri paru-paru membawa darah yang bebas O₂, sedangkan vena paru-paru membawa darah yang mengandung O₂ dari paru-paru ke jantung. Pembuluh arteri mensirkulasikan darah pada tekanan tertentu dan memiliki dinding otot yang tebal. Dinding vena cenderung menipis dan tidak elastic karena tekanan darah di dalamnya rendah. Dinding pembuluh kapiler terdiri dari suatu lapisan tunggal dan sel-sel untuk mempermudah difusi gas.

Jantung itu sendiri merupakan satu unit yang terdiri dari dua bilik (ventrikel) dan dua serambi (atrium). Katup-katup (valves) menjaga agar darah tidak mengalir balik ke dalam atrium bila ventrikel

mengerut. Setiap sisi jantung bebas dari pada yang lainnya, tetapi masing-masing mengkerut secara bersamaan pada setiap putaran. Kecepatan mengkerut jantung berbeda pada tiap-tiap orang, rata-rata kecepatan normal pada saat istirahat adalah 60-80 per menit dan pada saat bekerja antara 80-150 per menit.

Pada umumnya di dalam tubuh terdapat + 6 liter darah yang terdiri dari cairan serum, zat pembeku darah (plasma), sel-sel darah merah yang mengandung O₂ dan CO₂, serta sel-sel darah putih yang berguna untuk melawan infeksi. Volume darah biasanya konstan, tetapi kecepatan peredaran darah sangat berbeda dan tergantung pada kebutuhan O₂ oleh jaringan. Oleh karena itu, pada waktu kerja, denyut nadi atau jantung akan meningkat agar dapat mensuplai lebih



banyak darah dengan O₂ ke dalam jaringan. Saat yang bersamaan, lebih banyak CO₂ yang dilepaskan jaringan. Pengisian jantung juga akan meningkat pada setiap siklusnya yang meningkatkan kompresi suplai darah.

Jantung mampu memompa kurang lebih 4 s/d 5 liter darah per menit pada waktu istirahat, dan bisa mencapai 25 liter pada saat latihan atau bekerja. Tekanan darah dan volume darah harus tetap berada dalam batas tertentu agar jaringan tubuh tidak kekurangan O₂ dan mencegah pecahnya arteri. Tekanan darah tergantung pada kecepatan dan kekuatan pengerutan jantung dan daya tahan arteri terhadap aliran darah. Faktor-faktor ini masuk dalam pengawasan susunan saraf yang pada gilirannya dipengaruhi oleh organ-organ tubuh yang peka terhadap perubahan tekanan.

Tekanan darah saat istirahat, normalnya 120 s/d 140 mmHg selagi jantung mengkerut (sistolik) dan 70-80 mmHg sewaktu jantung mengembang (diastolik). Tekanan darah ini diukur pada saat yang sama dan tertulis sistolik / diastolik, contohnya 120/70. Apabila tekanan darah turun, peredaran darah berkurang dan terjadi penyusutan kadar O₂ ke jaringan tubuh yang membutuhkan. Peredaran darah yang terlalu cepat dapat mengurangi volume darah yang berdampak pada penurunan tekanan darah. 'Shock' akan dialami jika terjadi penurunan tekanan darah yang hebat. Bila shock tidak dapat diatasi, akan mengakibatkan kematian karena suplai darah yang membawa O₂ ke jaringan berkurang, terutama ke jaringan otak. Mengatasi shock antara lain dengan memberikan cairan (infus) melalui pembuluh darah (intra vena) agar meningkatkan volume darah dan tekanan darah.

Transportasi Gas ke Jaringan Tubuh & Paru-paru: karena tekanan partial dari oksigen relatif rendah pada tekanan atmosfer (1 ATA) maka hanya sedikit O₂ yang terbawa di dalam darah dan terlarut secara fisik). Sebagian besar O₂ yang disuplai ke jaringan tubuh akan dibawa dalam kombinasi dengan protein yang berada dalam sel darah merah yaitu haemoglobin (Hb).

Haemoglobin (Hb) memiliki daya ikat yang besar terhadap O₂ dan menjadi 98% jenuh dengan O₂ pada tekanan 1 ATA di dalam alveoli. Peningkatan hingga 100% terjadi bila menghirup atmosfer yang O₂-nya sudah diperkaya (30% atau lebih). Penyelam yang menggunakan udara pernafasan dengan meningkatkan kadar O₂-nya (Enriched Air) sering dilakukan pada penyelaman yang disebut "NITROX".

Selama tekanan partial dari O₂ ke dalam jaringan pada kisaran 40 mmHg, O₂ akan dilepaskan dari sel-sel darah merah ke jaringan tubuh. Tetapi tidak semua Hb melepaskan O₂, karena + 75% Hb tetap jenuh dan larut dalam vena untuk kembali ke jantung. Hb akan mengeluarkan lebih banyak O₂ pada tekanan oksigen yang rendah, dengan demikian dapat membantu jaringan tubuh yang kekurangan O₂.

Darah arteri membawa sejumlah + 20 ml O₂ per 100ml darah. Darah di vena dalam keadaan istirahat, kejenuhan Haemoglobinnya(Hb) +75% dan karena jumlah O₂ yang terkandung adalah +15ml per 100ml darah jaringan-jaringan tubuh akan memindahkan +5ml O₂ per 100ml darah. Jumlah ini akan meningkat saat bekerja. Transportasi CO₂ merupakan akibat langsung dari daya larut O₂ di dalam darah dan sel-sel darah merah, dan kemampuan larutnya akan tergantung pada tekanan partial CO₂ di jaringan

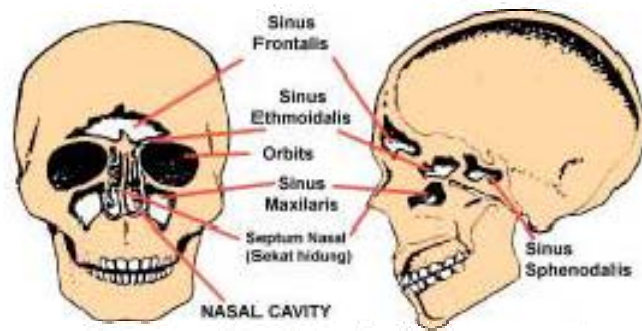
dan darah. Sejumlah CO₂ larut di dalam darah secara fisik, tetapi sebagian besar terlarut dalam cairan di sel-sel darah merah yang memudahkan CO₂ untuk bergabung dengan berbagai macam zat-zat kimia dan air yang membentuk asam karbonat.

Sinus

Sinus adalah rongga udara yang terdapat di kepala. Terdapat 4 macam sinus di kepala yaitu :

- a. Sinus Frontalis
- b. Sinus Ethmoidalis
- c. Sinus Maxilaris
- d. Sinus Splenodalis

Semua sinus tersebut berhubungan dengan nasopharing melalui saluran udara berongga agar udara dapat masuk dan keluar serta untuk mengeluarkan genangan cairan yang mungkin terjadi. Apabila saluran



ke dalam rongga sinus tersumbat, maka udara pernafasan dari hidung dan tenggorokan tidak akan dapat masuk ke dalam rongga sinus untuk mengimbangi tekanan pada jaringan. Terjadilah pembengkakan dan mungkin disusul dengan pendarahan jaringan yang menempati sebagian dari rongga sinus.

Sumbatan pada saluran udara dapat disebabkan oleh keadaan-keadaan berikut :

- a. Sinusitis (infeksi atau alergi) dimana pembengkakan dan kongesti (radang) jaringan menyebabkan hambatan mekanis.
- b. Rhinitis (high-fever), prosesnya sama dengan sinusitis.
- c. Polip (pertumbuhan jaringan kecil/tulang muda yang dapat menyumbat saluran sinus).
- d. Lipatan jaringan yang berlebihan.
- e. Sumbatan oleh lendir yang mengering

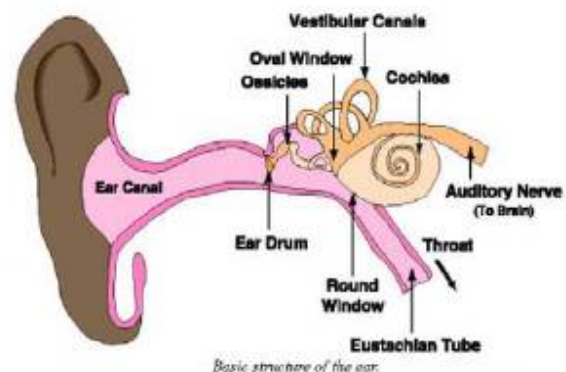


Telinga

Telinga terdiri dari 3 bagian utama yaitu

- a. Telinga bagian luar.
- b. Telinga bagian tengah.
- c. Telinga bagian dalam.

Masing-masing bagian telinga tersebut mempunyai fungsi yang berbeda-beda. Telinga bagian luar adalah daun telinga yang berperan dalam melindungi saluran auditor. Saluran ini



dilindungi rambut dan kelenjar keringat yang mengeluarkan lilin untuk menangkap partikel asing. Telinga bagian tengah merupakan rongga udara yang dikelilingi oleh jaringan dan tulang-tulang yang dapat menahan tekanan udara, di dalamnya terdapat tulang-tulang penghantar yang menghubungkan gendang telinga dengan telinga bagian dalam. Gendang telinga adalah selaput yang lentur dan peka yang memisahkan kedua bagian telinga ini.

Sedangkan telinga bagian dalam tidak mempunyai rongga udara, terletak diantara tulang dan terdiri dari organ pendengaran dan keseimbangan yang berisi cairan. Telinga bagian tengah dan dalam dipisahkan oleh dua selaput tipis yaitu tingkap lonjong (oval window) dan tingkap bundar (round window).

Pada saat penyelam turun ke kedalaman, tekanan di kedalaman akan berpengaruh ke telinga bagian tengah dan secara tidak langsung ke telinga dalam. Ekualisasi tekanan terhadap rongga telinga tengah perlu dilakukan pada setiap perubahan tekanan sekeliling dimana penyelam berada. Ekualisasi tekanan dilakukan dengan mengalirkan udara yang bertekanan sama dengan tekanan sekelilingnya melalui saluran Eustachian (penghubung telinga tengah dengan tenggorokan)

