

KEPERAWATAN SISTEM RESPIRASI

Penulis : dr. Silphia Novelyn, M.Biomed | Nazaruddin, S.Kep., Ns., M.Kep | Ns. Rahmawati Shoufiah, S.ST., M.Pd | Bernadeta Trihandini, S.ST., M.Tr.Kep | Indra, S.Kep., Ns., M.Kep | dr. Grace Walandouw, SpKFR, AIFO-K | Ns. Santy Ercelina Nainggolan, S.Kep., M.Kep., Sp.Kep.A | Fitriani, S.Kep., Ns., M.Kep | Mohamad Judha, S.Kep., Ns., M.Kep., Ph.DNS | Ns. Bergita Dumar, S.Kep., M.Kep | dr. Chrispian Oktafbipian Mamudi, SpPD-KPMK, FINASIM | Dr. Nani Restati Siregar, S.Psi. M.Si

Editor : dr. Muhammad Rustam HN, M.Kes., Sp.OT
La Rangki, S.Kep., Ns., M.Kep

Desain Sampul : Firman Isma'il

Tata Letak : Nur Aisah

ISBN : 978-634-221-542-5

Diterbitkan oleh : **EUREKA MEDIA AKSARA, MARET 2025**
ANGGOTA IKAPI JAWA TENGAH
NO. 225/JTE/2021

Redaksi:

Jalan Banjaran, Desa Banjaran RT 20 RW 10 Kecamatan Bojongsari
Kabupaten Purbalingga Telp. 0858-5343-1992

Surel : eurekamediaaksara@gmail.com

Cetakan Pertama : 2025

All right reserved

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

BAB

1

ANATOMI DAN FISIOLOGI SISTEM PERNAPASAN

Dr. Silphia Novelyn, M.Biomed

A. Pendahuluan

Sistem pernapasan merupakan sistem organ vital yang bertanggung jawab atas pertukaran gas, terutama oksigen dan karbon dioksida, antara tubuh dan lingkungan. Sistem ini memastikan bahwa oksigen dikirim ke sel-sel tubuh untuk produksi energi sekaligus menghilangkan karbon dioksida, yang merupakan produk sampingan dari metabolisme. Sistem ini berperan penting dalam menjaga homeostatis dan mendukung fungsi seluler.

Sistem pernapasan terdiri dari beberapa struktur utama, dan dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu kelompok saluran pernapasan bagian atas yang terdiri dari rongga hidung, faring dan bagian laring yang terletak di atas plica vocalis; dan saluran pernapasan bagian bawah yang terdiri dari bagian laring di bawah plica vocalis, trachea dan paru-paru (pulmo), termasuk bronchus dan alveolus. Struktur-struktur ini bekerja sama untuk memfasilitasi proses pernapasan, yang melibatkan inhalasi (menghirup udara yang kaya akan oksigen) dan ekshalasi (mengeluarkan udara yang kaya akan karbon dioksida). Secara fungsional, sistem pernapasan dapat dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah zona konduktor, terdiri dari serangkaian rongga atau ruang dan saluran berbentuk tabung yang saling berhubungan, baik di luar maupun di dalam pulmo. Termasuk disini adalah hidung, rongga hidung, faring, laring, trachea,

bronchus, bronchiolus, dan bronchiolus terminalis; berfungsi untuk menyaring, menghangatkan dan melembabkan udara, serta mengantarkannya ke pulmo. Bagian kedua adalah zona pernapasan yang terdiri dari saluran dan jaringan di dalam pulmo tempat pertukaran gas terjadi. Termasuk disini adalah bronchiolus, ductus alveolus, saccus atau kantung alveolus, dan alveolus yang merupakan tempat utama pertukaran gas antara udara dan darah.

Setiap sel dalam tubuh membutuhkan pasokan oksigen secara terus menerus untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan dalam menjalankan fungsinya. Oleh karena sel-sel menggunakan oksigen, mereka menghasilkan karbon dioksida (CO_2), yang merupakan produk limbah yang harus dihilangkan dari tubuh. Pemenuhan kebutuhan untuk memasok tubuh dengan oksigen dan membuang CO_2 merupakan fungsi utama sistem pernapasan, melalui proses yang disebut dengan respirasi, dimana proses-proses berikut ini terjadi:

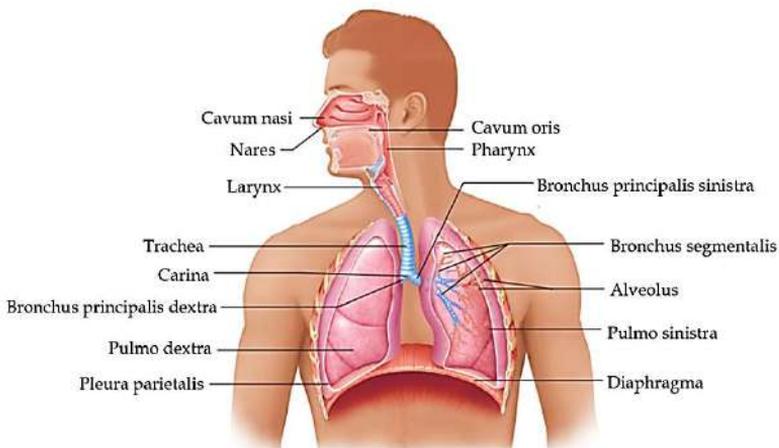
1. Ventilasi paru. Udara harus berpindah masuk dan keluar paru-paru sehingga gas di dalam alveolus pulmo terus berganti. Pergerakan udara ini disebut ventilasi atau pernapasan.
2. Respirasi eksternal. Pertukaran gas harus terjadi antara darah dan udara di alveoli pulmo. Oksigen di alveolus berdifusi ke dalam darah; CO_2 dalam darah berdifusi ke dalam alveolus.
3. Pengangkutan gas pernapasan. Oksigen dan karbon dioksida harus diangkut antara pulmo dan sel-sel tubuh. Proses ini dilakukan melalui sistem kardiovaskular, dengan darah berfungsi sebagai cairan pengangkut.
4. Respirasi internal. Pada pembuluh kapiler sistemik, gas harus dipertukarkan antara darah dan sel jaringan.

Oksigen digunakan oleh sel, dan CO_2 diproduksi sebagai produk limbah selama proses kimia yang mengubah glukosa menjadi energi seluler (ATP). Proses ini disebut respirasi seluler. Selain pertukaran gas, sistem pernapasan juga menjalankan fungsi lain, seperti membaui aroma dan berkontribusi terhadap vokalisasi melalui larynx. Memahami anatomi dan fisiologi

sistem pernapasan sangat penting untuk mengenali perannya dalam kesehatan.

B. Anatomi Sistem Pernapasan

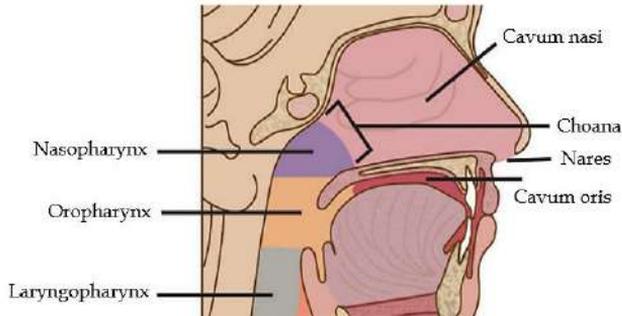
Sistem pernapasan secara anatomi dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu saluran pernapasan bagian atas dan saluran pernapasan bagian bawah. Saluran pernapasan bagian atas dimulai dari rongga hidung, faring (pharynx), laring (larynx); secara spesifik batasan larynx yang termasuk saluran pernapasan bagian atas adalah bagian larynx yang terletak superior terhadap pita suara (plica vocalis). Saluran pernapasan bagian bawah dimulai dari bagian larynx yang terletak inferior dari plica vocalis, trachea, bronchus, bronchiolus sampai dengan pulmo.



Gambar 1.1 Organ-Organ Sistem Pernapasan

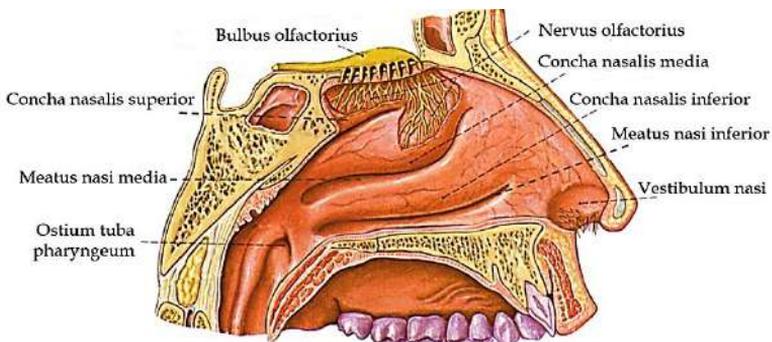
1. Hidung dan Rongga Hidung

Hidung (nasal) bagian luar dibentuk oleh tulang (os) nasal dan tulang rawan (cartilago) alaris yang membentuk cuping hidung (ala nasi). Lubang hidung disebut dengan nares atau apertura nasalis anterior. Nares merupakan pintu masuk ke rongga hidung (cavum nasi), dimana cavum nasi merupakan rongga yang berlanjut ke bagian belakang dan berhubungan dengan pharynx melalui dua buah lubang yang disebut dengan choana atau apertura nasalis posterior.



Gambar 1.2 Anatomi Rongga Hidung dan Pharynx

Pada bagian dalam, cavum nasi terpisah menjadi dua saluran atau rongga oleh septum nasi, yaitu suatu sekat yang dibentuk oleh suatu lempeng tegak lurus bagian dari os ethmoidalis, dan juga os vomer dan dan cartilago septalis. Pada cavum nasi terdapat tonjolan-tonjolan dari dinding lateral cavum nasi, yang disebut dengan concha nasalis. Terdapat tiga pasang concha nasalis, yaitu concha nasalis superior yang terletak paling atas, diikuti oleh concha nasalis media dan concha nasalis inferior. Di bawah setiap concha nasalis terdapat celah yang dinamakan meatus nasi. Sesuai dengan concha nasalis, maka terdapat tiga meatus nasi, yaitu meatus nasi superior yang terletak di bawah concha nasalis superior, meatus nasi media yang terletak di bawah concha nasalis media, dan meatus nasi inferior yang terletak di bawah concha nasalis inferior, dan merupakan tempat bermuaranya ductus lacrimalis.



Gambar 1.3 Bagian dalam Hidung

Bagian dari cavum nasi yang terletak tepat di belakang nares dan ditumbuhi oleh rambut hidung disebut vestibulum nasi. Vestibulum nasi mengandung kelenjar sebacea. Fungsi rambut hidung adalah sebagai proteksi, yaitu menyaring partikel debu ataupun serangga yang terhirup bersama dengan udara pernapasan. Bagian lain dari cavum nasi dilapisi oleh dua jenis membran mukosa, yang pertama adalah mukosa olfaktori, terletak di dekat atap dari cavum nasi yaitu pada zona olfaktorius. Peran mukosa ini adalah sebagai penghidu karena bagian ini mengandung reseptor-reseptor nervus olfaktorius (nervus cranialis pertama) yang berfungsi untuk mendeteksi aroma. Jenis mukosa yang kedua adalah mukosa respiratorius, yang merupakan jenis yang terbanyak. Mukosa ini dilapisi oleh epitel bertingkat silindris bersilia dengan sel goblet yang tersebar. Sel-sel goblet ini mensekresi mukus yang mengandung lisozim, suatu enzim yang dapat menghancurkan bakteri. Mukus ini berperan sebagai protektor, karena melapisi mukosa respiratorius dan memerangkap debu atau partikel-partikel lain yang terhirup bersama dengan udara inspirasi. Selain itu, lapisan mucus ini juga melembabkan udara yang dihirup dalam proses pernapasan.

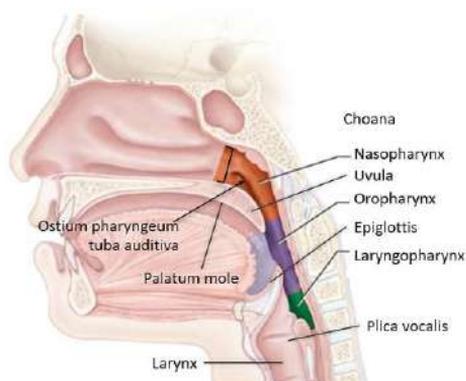
Ujung saraf sensorik banyak terdapat di dalam mukosa hidung. Ketika partikel yang bersifat iritan seperti debu atau serbuk sari terhirup dan bersentuhan dengan bagian yang sensitif ini maka akan tercetuslah refleks bersin, yang akan mengakibatkan partikel iritan tadi terdorong keluar dari hidung akibat dari semburan kuat udara keluar yang dihasilkan.

Pada bagian bawah dari mukosa respiratorius terdapat lamina propria yang mengandung banyak jaringan kapiler dan vena. Jaringan vaskular ini berfungsi menghangatkan udara yang diinspirasi saat udara tersebut mengalir melintasi permukaan mukosa.

2. Pharynx

Pharynx merupakan saluran yang menghubungkan antara cavum nasal dan cavum oris dengan larynx. Pharynx dapat dibedakan menjadi tiga bagian yaitu nasopharynx, oropharynx dan laryngopharynx. Nasopharynx merupakan bagian dari pharynx yang terletak tepat di belakang dari choana, dan berjalan ke bawah sampai batas setinggi langit-langit lunak mulut (palatum mole). Pada nasopharynx terdapat saluran yang menghubungkan antara nasopharynx dengan ruang telinga bagian tengah (auris media), disebut dengan tuba auditiva. Lubang masuk ke tuba auditiva ini disebut ostium pharyngeum tuba auditiva. Nasopharynx hanya dilalui oleh udara pernapasan.

Bagian dari pharynx mulai dari setinggi palatum mole sampai dengan setinggi epiglottis disebut dengan oropharynx. Saluran ini dilalui baik oleh makanan yang ditelan maupun udara pernapasan. Oropharynx berlanjut menjadi laryngopharynx yang terletak tepat di belakang dari larynx. Laryngopharynx merupakan bagian akhir dari pharynx, dan akan berlanjut ke esophagus yang menyalurkan makanan dan cairan ke lambung, dan ke trachea yang mengalirkan udara ke saluran pernapasan yaitu trachea.



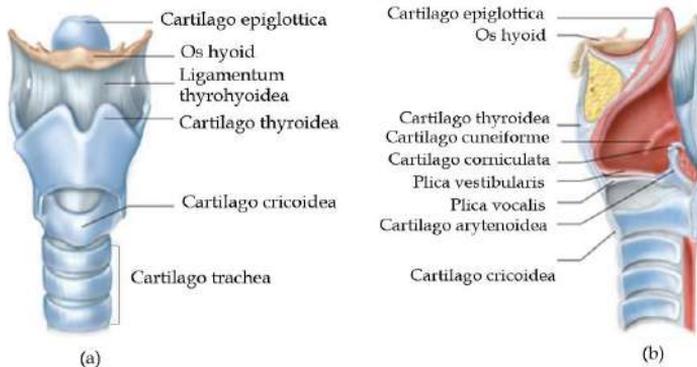
Gambar 1.4 Pharynx

3. Larynx

Letak anatomi larynx (disebut juga *voice box*) memanjang mulai dari setinggi vertebra cervicalis keempat sampai dengan vertebra cervicalis keenam. Bagian superior larynx melekat pada os hyoid dan membuka ke laryngofarynx. Pada bagian inferior, larynx akan berbatasan dengan trachea.

Fungsi dari larynx adalah pembentukan suara dan vokalisasi (fonasi), dan juga untuk melindungi saluran pernapasan bagian bawah dari masuknya benda asing, misalkan makanan atau cairan. Larynx disusun oleh sembilan buah cartilago: di anterior dibentuk oleh cartilago thyroidea dan cricoidea, di bagian posterior oleh cartilago epiglottica, sepasang cartilago arytenoidea, sepasang cartilago corniculata dan sepasang cartilago cuneiforme.

Pada larynx terdapat dua buah plica yaitu plica vestibularis yang disebut juga pita suara palsu (*false vocal cord*) dan plica vocalis yang disebut juga pita suara sejati (*true vocal cord*). Pembentukan suara oleh larynx bergantung pada tegangan dan panjang plica serta tekanan aliran udara yang melewatinya. Udara yang dikeluarkan oleh kedua pulmo akan menggerakkan plica vocalis dalam gerakan bergelombang membuka dan menutup, inilah yang menghasilkan bunyi dasar fonasi. Plica vestibularis tidak memegang peranan dalam menghasilkan suara. Selain untuk pembentukan suara, lebar lubang saluran pernapasan pada larynx disesuaikan mengikuti perubahan posisi plica vocalis.

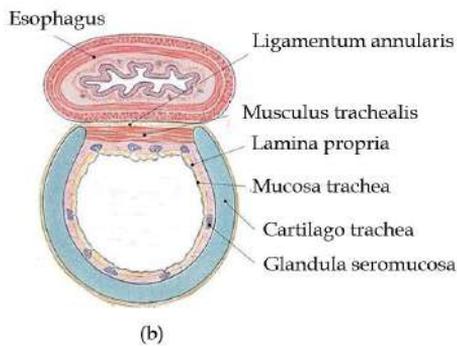
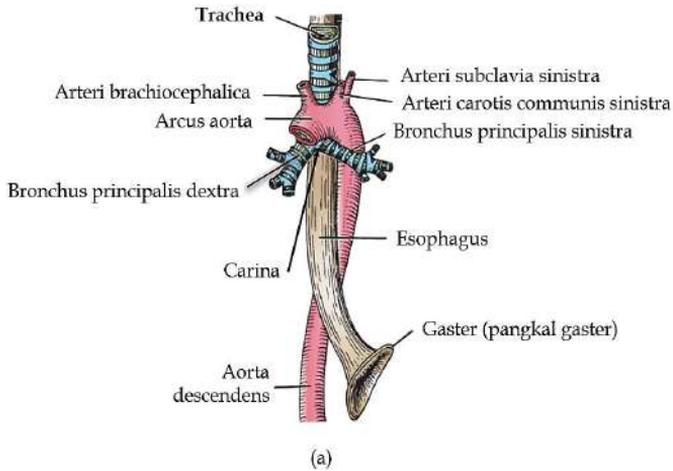


Gambar 1.5 Cartilago Pembentuk Larynx: Dilihat dari Anterior (a); Dilihat dari Medial dalam Potongan Sagittal (b)

4. Trachea

Trachea tersusun oleh cincin-cincin cartilago, hal ini memastikannya menjadi saluran napas yang tetap terbuka. Trachea berjalan turun melintasi leher mulai dari larynx dan akan memasuki ruang mediastinum di rongga thorax, untuk kemudian akan berakhir dengan ujung yang bercabang menjadi kedua bronchus primer (bronchus principalis) kiri (sinistra) dan kanan (dextra).

Cartilago yang menyusun trachea bukan merupakan cincin tertutup, karena di bagian posterior cincin-cincin tersebut terbuka dan ditempati oleh musculus trachealis. Kedua ujung akhir dari tiap cincin cartilago trachea dihubungkan oleh ligamentum annularis. Posterior dari trachea terdapat esophagus, sedangkan di anterior trachea terdapat lengkung (arcus) aorta.



Gambar 1.6 Posisi Trachea Terhadap Organ Sekitar, Dilihat dari Depan (a); Penampang Melintang Trachea (b)

Pada ujung distal trachea akan berakhir sebagai titik awal percabangan bronchus principalis, setinggi arcus aorta. Titik percabangan trachea menjadi bronchus principalis dextra dan sinistra disebut sebagai bifurcatio trachea atau carina.

5. Bronchus dan *bronchial tree*

Bronchus diawali sebagai bronchus principalis sinistra dan dextra. Bronchus principalis merupakan struktur saluran yang paling besar. Bronchus principalis dextra lebih vertikal dan memiliki diameter yang lebih luas dibandingkan dengan bronchus principalis sinistra, hal ini menyebabkan bila suatu

benda asing secara tidak sengaja masuk ke saluran pernapasan maka benda asing tersebut cenderung masuk ke bronchus principalis dextra.

Kedua bronchus principalis akan berjalan secara menyerong di regio thorax yaitu di dalam ruang mediastinum sebelum masuk ke dalam pulmo pada bagian yang disebut dengan hilum pulmonalis. Di dalam pulmo, masing-masing bronchus principalis akan bercabang menjadi bronchus lobaris, atau disebut juga bronchus sekunder. Bronchus dan percabangannya disebut sebagai *bronchial tree*.

Bronchus lobaris akan memasuki masing-masing lobus dari pulmo, sehingga jumlahnya juga akan sesuai dengan jumlah lobus pada masing-masing pulmo. Bronchus lobaris sinistra berjumlah dua buah, dan bronchus lobaris dextra berjumlah tiga buah. Setiap bronchus lobaris akan bercabang menjadi beberapa bronchus segmentalis, atau bronchus tersier, sebagai berikut:

a. Pulmo dextra:

1) Lobus superior:

- a) Bronchus segmentalis apicalis
- b) Bronchus segmentalis anterior
- c) Bronchus segmentalis posterior

2) Lobus media

- a) Bronchus segmentalis lateralis
- b) Bronchus segmentalis medialis

3) Lobus inferior

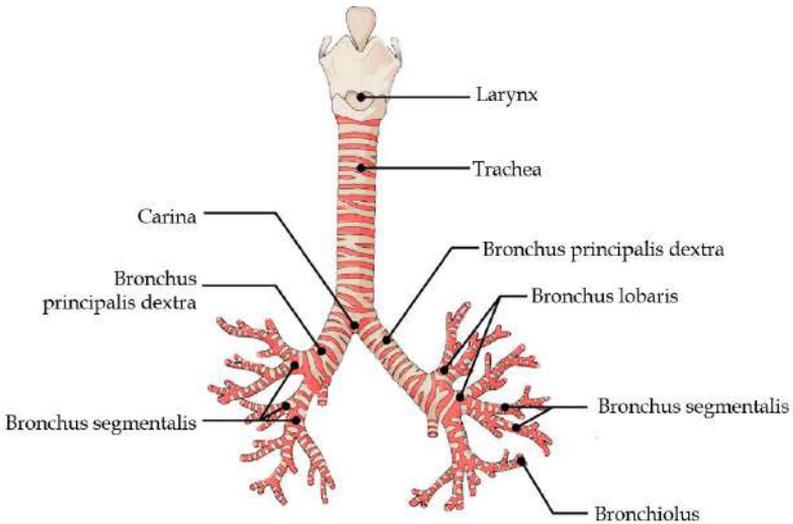
- a) Bronchus segmentalis superior
- b) Bronchus segmentalis basalis anterior
- c) Bronchus segmentalis basalis medialis
- d) Bronchus segmentalis basalis lateralis
- e) Bronchus segmentalis basalis posterior

b. Pulmo sinistra:

1) Lobus superior:

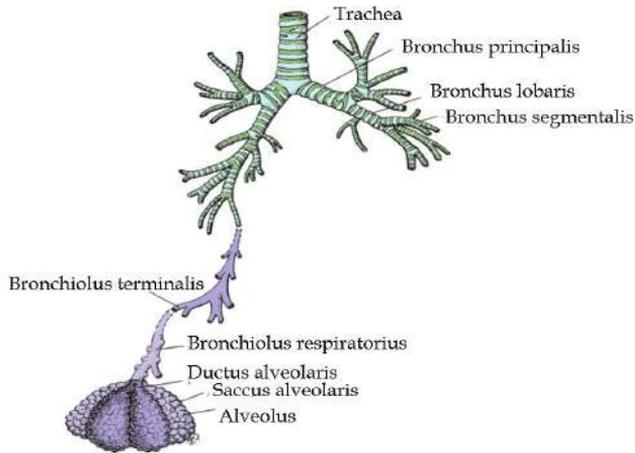
- a) Bronchus segmentalis apicoposterior
- b) Bronchus segmentalis anterior

- c) Bronchus segmentalis lingularis superior
 - d) Bronchus segmentalis lingularis inferior
- 2) Lobus inferior:
- a) Bronchus segmentalis superior
 - b) Bronchus segmentalis basalis anterior
 - c) Bronchus segmentalis basalis lateralis
 - d) Bronchus segmentalis basalis medialis
 - e) Bronchus segmentalis basalis posterior



Gambar 1.7 Gambaran Susunan Saluran Pernapasan (Larynx, Trachea dan *Bronchial Tree*)

Setiap bronchus segmentalis bercabang menjadi saluran yang lebih kecil, cabang yang berdiameter lebih kecil dari satu milimeter disebut bronchiolus. Dinding bronchiolus tidak mengandung cartilago, sebagai gantinya adalah serat elastin yang tersebar dari jaringan penyambung fibroelastik yang mengelilingi selubung otot polos bronchiolus. Serat elastin ini turut berperan dalam memastikan bronchiolus tetap terbuka.

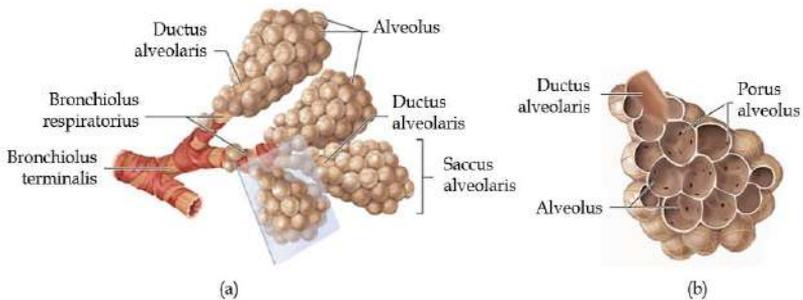


Gambar 1.8 Gambaran Susunan Saluran Pernapasan
(*Bronchial Tree* Sampai Alveolus)

Setiap bronchiolus bercabang membentuk beberapa bronchiolus terminalis. Bronchiolus terminalis memiliki diameter kurang dari setengah milimeter. Bronchiolus terminalis ini merupakan bagian akhir dari zona konduksi pada saluran pernapasan, dan akan berlanjut sebagai zona respirasi. Zona respirasi merupakan struktur yang berisi ruang pertukaran udara, terdiri dari bronchiolus respiratorius, ductus alveolaris, saccus alveolaris dan alveolus. Struktur pertama dari zona respirasi, yang merupakan lanjutan dari bronchus terminalis, adalah bronchiolus respiratorius. Bronchiolus respiratorius akan berlanjut sebagai ductus alveolaris, suatu saluran yang struktur dindingnya terdiri dari alveolus-alveolus. Ujung akhir dari ductus alveolaris berbentuk kluster terminal yang disebut saccus alveolaris, yaitu suatu kantong buntu berbentuk seperti anggur, yang terdiri dari dua atau lebih kelompok kecil alveolus.

Alveolus berbentuk seperti kantong keluar kecil. Alveolus membentuk struktur utama dan unit fungsional dari sistem pernapasan. Pertukaran CO_2 dengan O_2 di antara udara di lumen dan darah dalam kapiler di sekitar alveolus dimungkinkan karena dinding alveolus yang tipis.

Terdapat sekitar 300 juta alveolus di dalam paru-paru, hal ini menyediakan permukaan pertukaran gas (melalui proses difusi) yang sangat luas. Akibat banyaknya jumlah alveolus ini, alveolus ini saling berhimpitan dan saling bergesekan. Di tempat terjadinya kontak, ruang udara antara dua alveolus bisa terhubung satu sama lain melalui lubang yang disebut porus alveolaris, atau dikenal dengan porus Kohn.

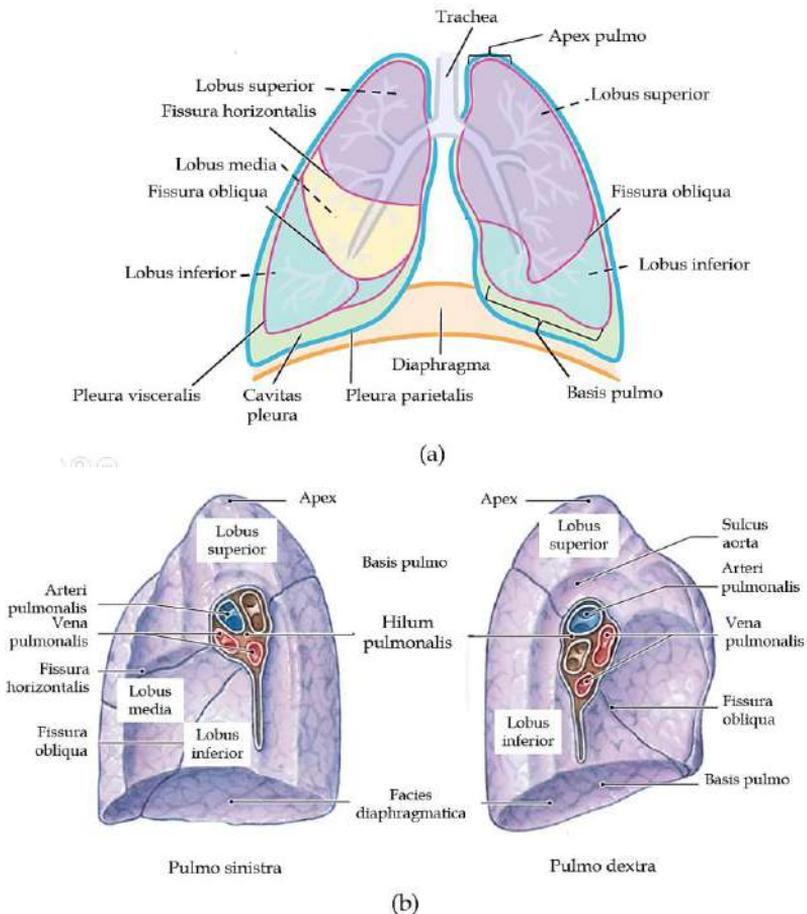


Gambar 1.9 Gambaran Susunan Zona Respirasi (a); Alveoli dan Porus Alveolaris (b)

6. Pulmo

Organ pulmo terletak di dalam rongga (cavum) thorax, dan mengapit mediastinum. Kedua pulmo dilapisi oleh selaput pembungkus pulmo yang disebut pleura. Pleura terdiri dari dua lapis, yaitu pleura visceralis yang melekat langsung ke permukaan pulmo, dan pleura parietalis di bagian luar. Di antara kedua lapis pleura ini terbentuklah ruang yang disebut dengan ruang pleura (cavitas pleura). Bentuk pulmo hampir menyerupai kerucut, bagian atasnya disebut dengan apex pulmo, bagian bawah yang lebih lebar dan terletak di atas kubah diaphragma disebut basis pulmo. Letak pulmo di dalam cavum thorax dilindungi oleh kerangka tulang yang disebut *thoracic cage*, yang dibentuk oleh tulang dada (os sternum) di bagian depan, tulang-tulang rusuk (ossa costae) di bagian samping luar, dan tulang belakang (ossa vertebrae) thoracalis di bagian belakang.

Bagian permukaan pulmo yang berhadapan dengan ossa costae disebut dengan facies costalis, bagian permukaan pulmo yang berhadapan dengan diafragma disebut dengan facies diaphragmatica, dan bagian samping dalam yang berbatasan dengan mediastinum disebut dengan facies mediastinalis. Pada facies mediastinalis terdapat area yang disebut hilum pulmonalis, yang merupakan tempat masuknya bronchus principalis dan arteri pulmonalis ke pulmo, serta tempat keluarnya vena pulmonalis dari pulmo.



Gambar 1.10 Gambaran Pulmo Dilihat dari Depan (a), dan dari Medial (b)

Pulmo dextra terdiri dari tiga buah lobus yaitu lobus superior, lobus media dan lobus inferior; sedangkan pulmo sinistra hanya terdiri dari dua buah lobus yaitu lobus superior dan lobus inferior. Antara setiap lobus dipisahkan oleh suatu celah yang disebut fissura. Pada pulmo dextra terdapat fissura horizontalis yang memisahkan antara lobus superior dan lobus media, serta fissura obliqua yang memisahkan antara lobus media dengan lobus inferior pulmo. Pada pulmo sinistra hanya terdapat fissura obliqua saja yang memisahkan antara lobus superior dan lobus inferior.

Arteri pulmonalis membawa darah yang kaya akan CO₂ yang dialirkan dari ventrikel kanan jantung, sedangkan vena pulmonalis membawa darah yang kaya akan O₂ kembali ke atrium kiri jantung untuk kemudian selanjutnya diedarkan oleh jantung ke seluruh tubuh.

Secara umum, pernapasan dipengaruhi oleh saraf simpatis dan parasimpatis. Serat simpatis berasal dari ganglion simpatis thorax, dan nervus vagus menyediakan saraf parasimpatis ke otot-otot polos di *bronchial tree*. Serat simpatis menyebabkan relaksasi otot polos bronchus sehingga bronchus berdilatasi, serat parasimpatis menghasilkan hal yang berlawanan. Cabang dari nervus vagus dan serat simpatis membentuk pleksus pulmonal, yang juga akan mempersarafi pleura visceral. Pulmo mendapatkan persarafan dari plexus pulmonal dan nervus phrenicus. Nervus phrenicus juga mempersarafi pleura visceral dan diaphragma.

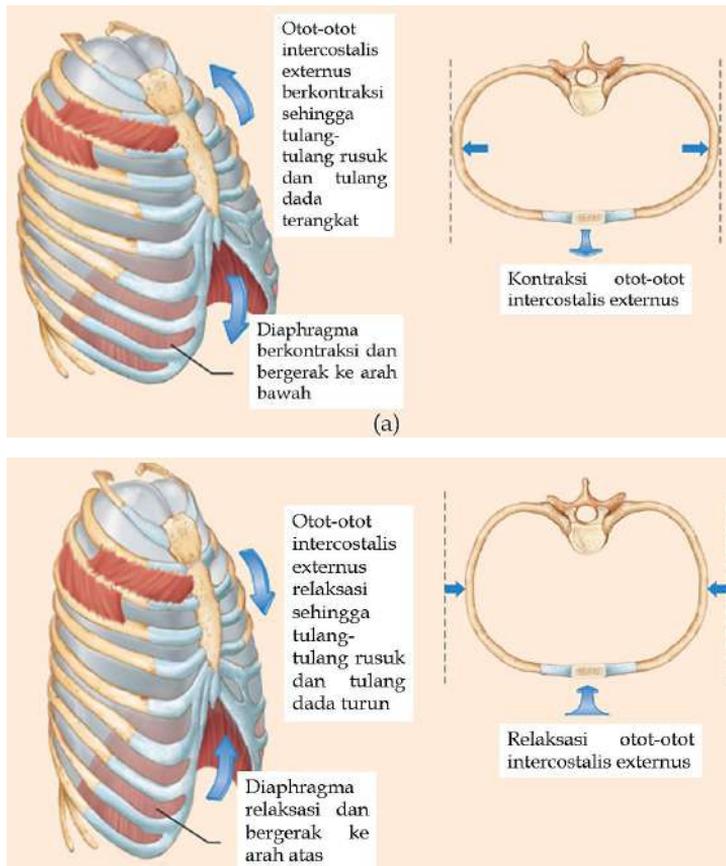
C. Fisiologi Sistem Pernapasan

Dalam fisiologi sistem pernapasan ini akan membahas mengenai mekanisme ventilasi, pertukaran gas dan regulasi pernapasan.

1. Mekanisme ventilasi

Bernapas, atau ventilasi pulmonal, terdiri dari dua fase yaitu inspirasi atau inhalasi, dan ekspirasi atau ekshalasi.

Pada inspirasi terjadi gerakan udara ke dalam pulmo, dan pada ekspirasi terjadi gerakan udara ke luar pulmo. Struktur yang terlibat dalam proses ventilasi adalah otot-otot intercostalis dan diafragma. Pada keadaan tertentu, beberapa otot tambahan juga terlibat dalam proses ventilasi, misalnya pada keadaan sesak napas, dalam hal ini otot-otot scalenus dan otot-otot abdomen ikut bekerja.



Gambar 1.11 Kerja Otot-otot Pernapasan pada Ventilasi Normal dan Perubahan Volume Thorax

Inspirasi merupakan proses yang membutuhkan tenaga karena terlibatnya kontraksi otot-otot pernapasan. Pada saat inspirasi, otot-otot intercostalis externus dan diafragma berfungsi untuk meningkatkan volume rongga

thorax. Otot intercostalis internus turut berkontraksi, kontraksi bersama ini menghasilkan kekakuan dari dinding thorax, apabila tidak ada kekakuan dinding thorax maka kontraksi diaphragma hanya menyebabkan perubahan bentuk thorax tetapi volumenya tidak bertambah.

Telah disebutkan sebelumnya bahwa pulmo dilindungi oleh cavitas pleura. Cavitas pleura terisi oleh sedikit cairan serosa yang dihasilkan oleh membran serosa pembentuk pleura, yang berfungsi untuk mengurangi gesekan yang terjadi antara kedua lapis pleura pada saat terjadi pergerakan pulmo dalam ventilasi. Udara di dalam pulmo berada dalam tekanan atmosfer, dan tekanan di dalam cavitas pleura kurang dari tekanan atmosfer, hal ini menyebabkan pulmo berekspansi dan menekan cavitas pleura ke dinding thorax. Pleura parietalis terikat secara halus ke permukaan dalam dinding dada. Pada saat cavum thorax membesar akibat kontraksi otot-otot pernapasan, cavitas pleura ikut membesar sesuai volume pulmo. Peningkatan volume ini mengakibatkan tekanan di dalam pulmo dan cavitas pleura menurun. Ingat bahwa pulmo terhubung dengan udara (atmosfer) di luar lewat saluran napas (trachea dan bronchus), sebagai akibatnya pada saat terjadi perbedaan tekanan antara tekanan atmosfer luar tubuh dan tekanan dalam rongga pleura maka udara dari luar akan mengalir masuk ke dalam pulmo. Dengan masuknya udara ini, maka pulmo akan mengembang, volume cavitas pleura akan berkurang dan tekanan dalam cavitas pleura akan kembali meningkat.

Pada ekspirasi terjadi relaksasi dari otot-otot pernapasan (baik otot utama maupun otot bantu pernapasan). Hal ini akan menurunkan volume cavitas pleura sehingga tekanan di dalamnya meningkat. Akibat adanya gaya recoil dari pulmo, maka udara akan terdorong keluar pulmo. Karena itu proses ekspirasi tidak membutuhkan tenaga. Dalam ekspirasi yang dipaksakan, misalnya menghembuskan napas dengan kuat, otot-otot

intercostalis internus dan otot-otot perut berkontraksi, hal ini mengakibatkan turunnya volume cavitas pleura dan menambah dorongan udara keluar dari pulmo.

2. Pertukaran gas

Pada inspirasi, udara yang mengandung O_2 akan memasuki alveolus. Seperti disebutkan sebelumnya, luas permukaan difusi sangat besar sehubungan dengan jumlah alveoli yang sangat banyak di dalam pulmo. O_2 berdifusi dan memasuki lumen kapiler darah, kemudian berikatan dengan hemoglobin di dalam eritrosit (bagian heme dari hemoglobin) dan membentuk oksihemoglobin. CO_2 meninggalkan darah, berdifusi ke dalam lumen alveolus dan akan keluar dari ruang alveolus sebagai udara yang kaya akan CO_2 untuk dikeluarkan melalui proses ekspirasi.

Respirasi eksternal atau pertukaran gas pulmonal di dalam pulmo mengubah darah yang kurang O_2 (*deoxygenated blood*) yang diterima dari ventrikel kanan jantung melalui arteri pulmonalis menjadi darah yang kaya O_2 (*oxygenated blood*) yang akan dialirkan ke atrium kiri jantung oleh vena pulmonalis. Saat darah mengalir melalui jaringan kapiler pulmo, darah akan mengangkut O_2 dari alveoli dan melepaskan CO_2 ke alveoli. Proses inilah yang disebut dengan pertukaran gas. Setiap gas ini berdifusi masing-masing, sesuai dengan tempat dimana tekanan parsialnya tinggi ke tempat dimana tekanan parsialnya rendah. O_2 berdifusi dari alveoli dimana tekanan parsialnya (P_{O_2}) 105 mmHg, ke dalam kapiler pulmo dimana P_{O_2} 40 mmHg (dalam keadaan istirahat; dalam kondisi berolahraga, misalnya, P_{O_2} akan lebih rendah lagi karena kontraksi otot memakai lebih banyak O_2). Proses difusi akan terus berlangsung hingga P_{O_2} darah kapiler meningkat dan sama dengan P_{O_2} udara alveoli.

Sementara O_2 berdifusi dari udara alveoli ke dalam *deoxygenated blood*, CO_2 berdifusi dalam arah berlawanan. P_{CO_2} dalam *deoxygenated blood* sebesar 45 mmHg dalam keadaan istirahat, dan P_{CO_2} udara alveoli sebesar 40 mmHg.

Akibat adanya perbedaan ini, CO_2 berdifusi dari *deoxygenated blood* ke dalam alveoli sampai P_{CO_2} darah turun hingga 40 mmHg. Ekspirasi mempertahankan P_{CO_2} alveoli sebesar 40 mmHg. *Oxygenated blood* mengalir kembali ke jantung melalui vena pulmonalis hingga P_{CO_2} 40 mmHg.

Ventrikel kiri jantung memompakan *oxygenated blood* ke aorta dan melalui arteri sistemik dialirkan ke kapiler seluruh tubuh. Pertukaran gas antara kapiler sistemik dengan sel-sel di jaringan disebut dengan respirasi internal atau pertukaran gas sistemik. Saat O_2 meninggalkan aliran darah, *oxygenated blood* berubah menjadi *deoxygenated blood*. Respirasi internal terjadi di seluruh jaringan tubuh. P_{O_2} di dalam darah yang dialirkan ke kapiler sistemik sebesar 100 mmHg, lebih besar dari P_{O_2} di dalam sel-sel tubuh yang hanya sebesar 40 mmHg (hal ini karena sel secara konstan menggunakan O_2 untuk menghasilkan ATP. Karena perbedaan tekanan ini, O_2 berdifusi keluar dari kapiler ke dalam sel, dan P_{O_2} turun menjadi 40 mmHg saat darah keluar dari kapiler sistemik.

Sementara O_2 berdifusi ke dalam sel-sel jaringan, CO_2 berdifusi dalam arah berlawanan: karena sel-sel jaringan secara konstan menghasilkan CO_2 , P_{CO_2} sel sebesar 45 mmHg (dalam keadaan istirahat), lebih tinggi dari P_{CO_2} darah kapiler sistemik (40 mmHg). Akibatnya, CO_2 akan berdifusi dari sel-sel jaringan melalui cairan interstisial ke dalam kapiler sistemik hingga P_{CO_2} darah meningkat menjadi 45 mmHg. *Deoxygenated blood* akan mengalir kembali ke dalam jantung untuk kemudian dipompakan ke dalam pulmo untuk proses respirasi eksternal selanjutnya.

3. Regulasi pernapasan

Pusat pengaturan terpenting bagi pernapasan adalah formation reticularis di medulla oblongata. Pusat pengontrol ini, disebut sebagai *ventral respiratory group* (VRG) merupakan *pacemaker* yang neuron-neuronnya menghasilkan ritme dasar dan kecepatan ventilasi dengan input dari pusat-pusat kontrol yang berada di pons dan medulla oblongata.

Neuron dari pusat pernapasan menstimulasi saraf somatik motorik otot-otot respirasi. Pola dasar pernapasan ini dapat berubah oleh pengaturan pusat kontrol yang lebih tinggi di otak, misalnya sistem limbik dan hipotalamus.

DAFTAR PUSTAKA

- Adegbenro O Fakoya, Marc H Hohman, Bianca Georgakopoulos, Patrick H Le (2024) *Anatomy, Head and Neck, Nasal Concha*. StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- Elaine M Marieb, Patricia Brady Wilhelm, Jon Mallat (2012) *The respiratory system*. In: *Human anatomy*. 6th ed media update. Pearson Education Inc.
- Frederic H Martini, Judi L Nath, Edwin F Bartholomew (2012) *Fundamentals of anatomy & physiology*. 9th ed. CA: Pearson Education Inc.
- Gerard J Tortora, Bryan Derrickson (2016) *Principles of anatomy & physiology*. 15th ed. John Wiley & Sons Inc.
- Leslie P Gartner, James L Hiatt (2014) *Buku Ajar Berwarna Histologi*. Editor Bahasa Indonesia: Isnaini AS Suryono, Lia Damayanti, Sugito Wonodirekso. Ed 3. Jakarta: Saunders Elsevier.
- Richard S. Snell (2019) *Clinical anatomy by regions*. Edited by Lawrence E Wineski. Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkin.