

BAB 1

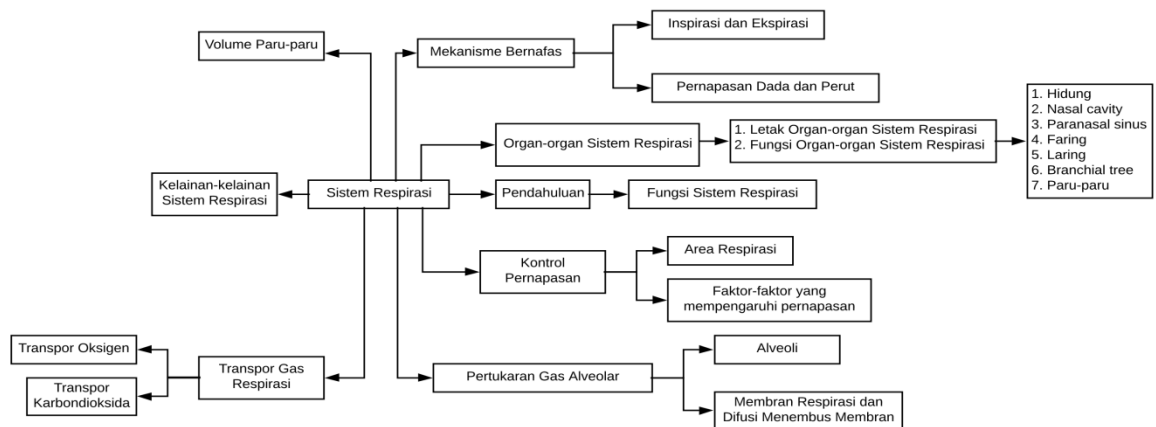
SISTEM PERNAPASAN

CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari materi sistem pernapasan, diharapkan mahasiswa dapat :

1. Memahami fungsi sistem respirasi dan perbedaan respirasi internal dan eksternal
2. Mengidentifikasi struktur anatomi sistem respirasi
3. Menganalisis mekanisme faal pada sistem respirasi
4. Menganalisis kelainan-kelainan pada system pernapasan

PETA PIKIRAN



PENDAHULUAN

- Fungsi sistem respirasi
- Respirasi internal dan eksternal

STRUKTUR ANATOMI

- Organ-organ sistem respirasi

MEKANISME FAAL

- Mekanisme bernapas
- Pertukaran gas alveolar
- Transport gas respirasi
- Volume paru-paru
- Kontrol pernapasan

KELAINAN

- Emfisema
- Bronkitis Kronis
- Asma
- Kanker Paru-paru

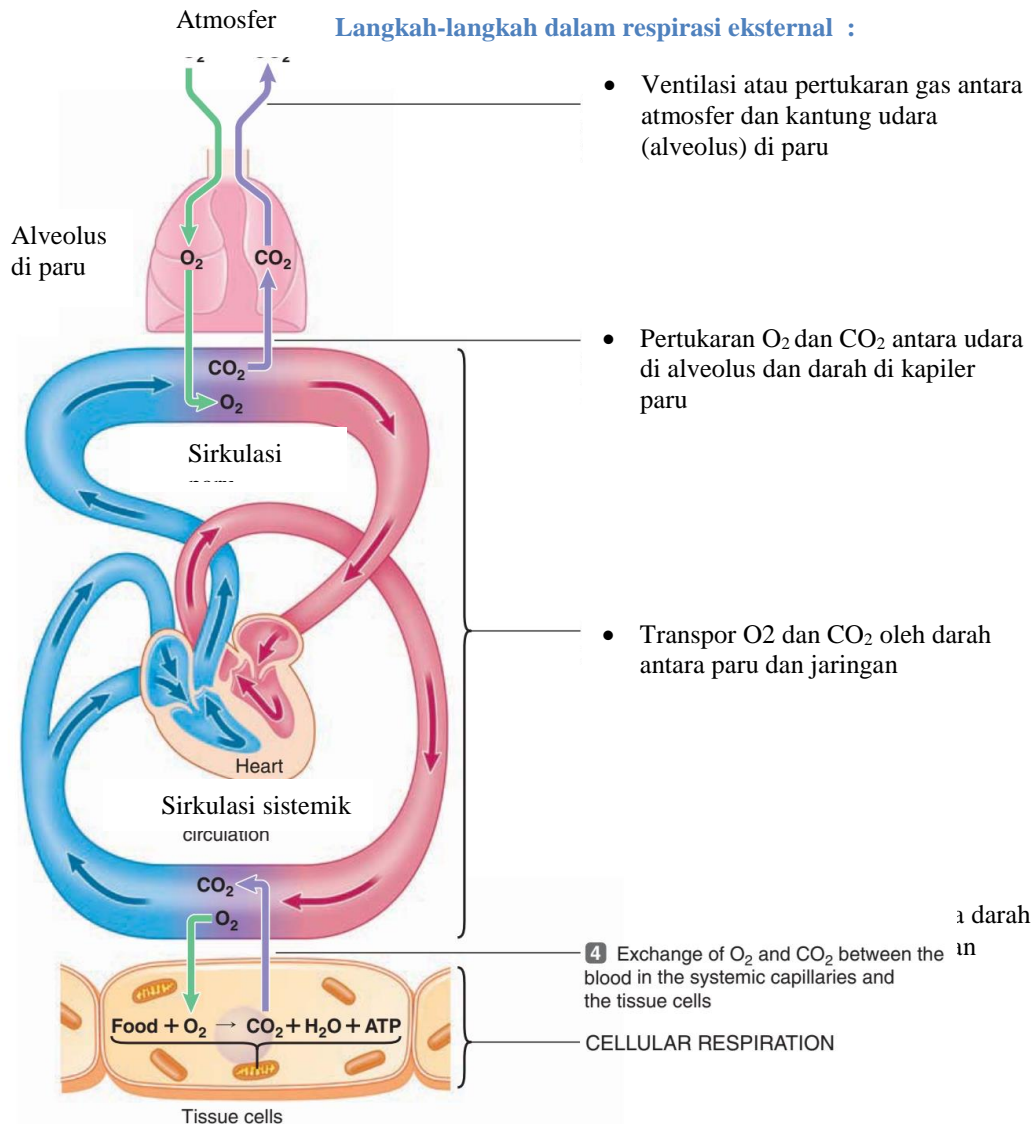
1.1 PENDAHULUAN

Fungsi utama respirasi (pernapasan) adalah memperoleh O_2 untuk digunakan oleh sel tubuh dan untuk mengeluarkan CO_2 yang diproduksi oleh sel. Respirasi mencakup dua proses yang terpisah tetapi berkaitan yaitu respirasi internal dan respirasi eksternal. Istilah **respirasi internal** atau **respirasi sel** merujuk kepada proses-proses metabolik intrasel yang dilakukan di dalam mitokondria, yang menggunakan O_2 dan menghasilkan CO_2 . Sedangkan istilah **respirasi eksternal** merujuk kepada seluruh rangkaian kejadian dalam pertukaran O_2 dan CO_2 antar lingkungan eksternal dan sel tubuh. Respirasi eksternal mencakup empat langkah (gambar 1-1), yaitu :

1. Udara secara bergantian dimasukkan ke dan dikeluarkan dari paru sehingga udara dapat dipertukarkan antara atmosfer (lingkungan eksternal) dan kantung udara (*alveolus*) paru. Pertukaran ini dilaksanakan oleh tindakan mekanis **bernapas** atau **ventilasi**. Kecepatan ventilasi diatur untuk menyesuaikan aliran udara antara atmosfer dan alveolus sesuai kebutuhan metabolik tubuh akan penyerapan O_2 dan pengeluaran CO_2 .
2. Oksigen dan CO_2 dipertukarkan antara udara di alveolus dan darah di dalam kapiler paru melalui proses difusi.
3. Darah mengangkut O_2 dan CO_2 , antara paru dan jaringan.

4. Oksigen dan CO₂ dipertukarkan antara jaringan dan darah melalui proses difusi menembus kapiler sistemik (jaringan).

Sistem respirasi tidak melaksanakan semua tahap atau langkah respirasi, system ini hanya berperan dalam ventilasi dan pertukaran O₂ dan CO₂ antara paru dan darah (langkah 1 dan 2). Sistem sirkulasi melaksanakan tahap-tahap selanjutnya.



Gambar 1-1 Respirasi eksternal dan internal. Respirasi eksternal mencakup langkah-langkah yang terlibat dalam pertukaran O₂ dan CO₂ antara lingkungan eksternal dan sel jaringan (tahap 1 sampai 4). Respirasi internal mencakup reaksi metabolik intrasel yang melibatkan pemakaian O₂ untuk menghasilkan energi (ATP) dari makanan, menghasilkan CO₂ sebagai produk sampingan. (Sumber : Sherwood, 2011)

1.2 STRUKTUR ANATOMI

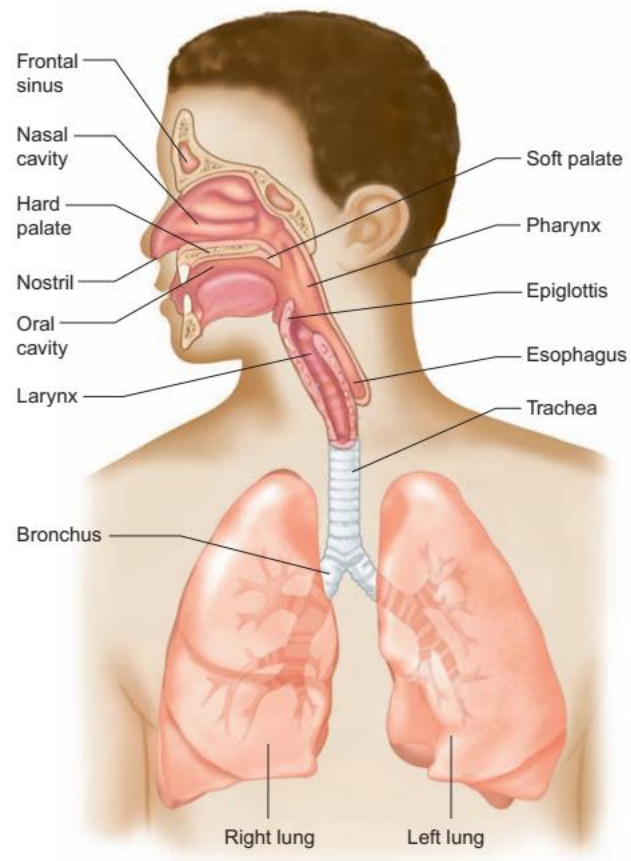
Organ-organ pada sistem respirasi dapat dibagi menjadi dua saluran, yaitu *saluran pernapasan atas* dan *saluran pernapasan bawah*. *Saluran pernapasan atas* bagian-bagiannya terdiri dari hidung, kavitas nasalis, paranasal sinuse, dan faring. *Saluran pernapasan bawah* bagian-bagiannya terdiri dari laring, trakhea, pohon bronkhus dan paru.

- **Hidung**

Udara memasuki dan meninggalkan sistem respirasi melalui **hidung**, yang tersusun atas tulang dan kartilago yang ditutupi oleh kulit. Di dalam lubang hidung terdapat rambut-rambut yang membantu mencegah debu masuk.

- **Kavitas Nasalis**

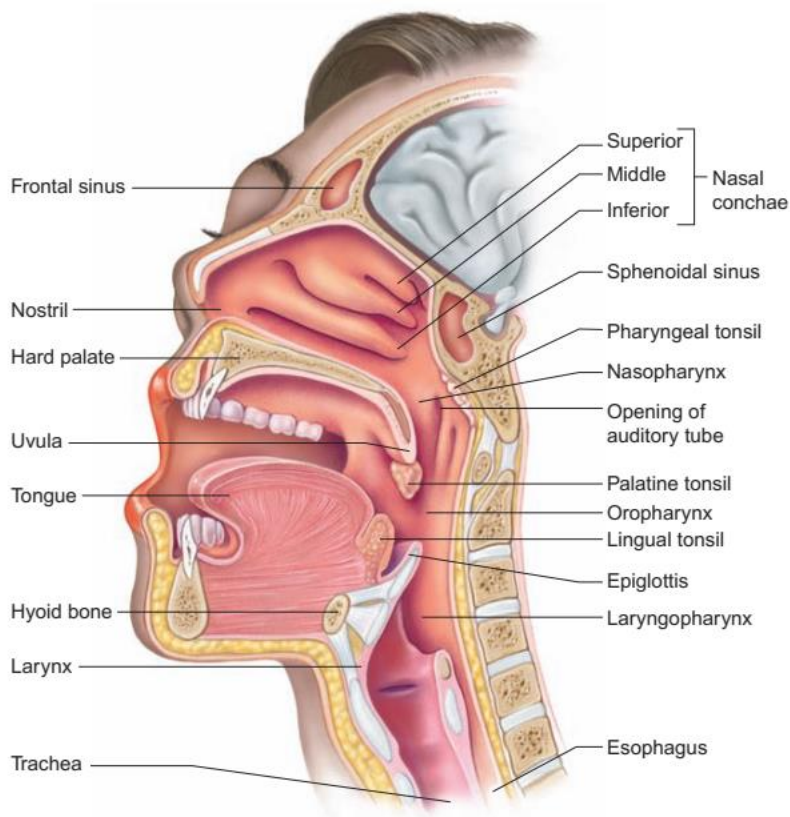
Kavitas nasalis adalah ruang berongga yang terletak dibelakang hidung. Kedua kavitas nasalis dipisahkan oleh **septum nasal** yang terdiri dari tulang dan tulang rawan, membagi kavitas nasalis menjadi dua bagian yaitu bagian kanan dan kiri rongga nasal. **Konka nasalis** terbagi menjadi tiga yaitu superior, tengah dan inferior menonjol pada sisi medial dinding lateral rongga nasal. Setiap konka dilapisi oleh membran mukosa (epitel kolumnar bertingkat dan bersilia) yang terdapat sel-sel goblet yang berfungsi untuk menyekresi mukus dan banyak mengandung pembuluh darah. Udara yang melewati kavitas nasalis akan dihangatkan dan dilembabkan, sehingga udara yang mencapai paru akan hangat dan lembab. Bakteri dan partikel dari udara akan terperangkap oleh mukus, kemudian silia berkesinambungan akan mendorong mukus menuju faring. Kebanyakan mukus ini akan ditelan, dan bakteri yang ada akan dihancurkan oleh asam HCl dalam getah lambung.



Gambar 1-2 Organ-organ dan struktur terkait dengan sistem respirasi.
(Sumber : Shier et all, 2012)

- **Sinus Paranasal**

Paranasal sinus adalah kantung tertutup pada bagian frontal, etmoid, maksilar dan sfenoid. Sinus ini dilapisi oleh epitel bersilia, dan mucus yang diproduksi akan dialirkan menuju kavitas nasalis. Sinus berfungsi untuk meringankan tulang tengkorak, memberi area permukaan tambahan pada saluran nasal untuk menghangatkan dan melembabkan udara yang masuk, memproduksi mukus, dan memberi efek resonansi dalam produksi wicara.



Gambar 1-3 Struktur yang terkait dengan saluran pernapasan pada bagian kepala dan leher. (Sumber : Shier et al, 2012)

▪ **Faring**

Faring atau tenggorokan, yang berada di belakang mulut dan hidung dan di depan vertebra servikalis. Faring merupakan jalur untuk makanan berpindah dari mulut menuju ke esophagus dan untuk lewatnya udara antara kavitas nasalis dan laring. Faring terbagi menjadi tiga bagian :

1. **Nasofaring**, merupakan bagian yang paling tinggi dan berada di belakang kavitas nasalis dan sebagai jalur bagi udara selama bernapas. Terdapat dua tuba Eustachius (auditorik) yang menghubungkan nasofaring dengan telinga tengah. Tuba ini berfungsi untuk menyetarakan tekanan udara pada kedua sisi gendang telinga. Pada dinding posterior nasofaring, terdapat amandel (adenoid) faring yang merupakan penumpukan jaringan limfatik yang mengandung makrofag. Pembesaran adenoid dapat menghambat aliran udara.

2. **Orofaring**, dipisahkan dari nasofaring oleh palatum lunak muskular, terletak dibelakang mulut dan merupakan kelanjutan dari rongga mulut. Orofaring berfungsi sebagai jalur untuk makanan dari mulut bergerak ke bawah dan untuk udara ke dan dari rongga hidung.
3. **Orofaring**, merupakan bagian paling bawah dari faring. Bagian anteriornya membuka menuju laring dan bagian posteriornya menuju esophagus. Kontraksi dinding muscular orofaring dan laringofaring adalah bagian dalam refleks menelan.

Faring berfungsi sebagai saluran bersama untuk sistem pernapasan dan pencernaan. Terdapat dua saluran yang berasal dari faring yaitu **trakhea** yang dilalui oleh udara untuk menuju paru, dan **esofagus** yang dilalui oleh makanan untuk menuju lambung. Udara dalam keadaan normal masuk ke faring melalui hidung, tetapi udara dapat juga masuk melalui mulut ketika saluran hidung tersumbat, yaitu anda dapat bernapas pada saat anda pilek. Karena faring berfungsi sebagai saluran bersama untuk udara dan makanan maka sewaktu menelan terjadi mekanisme refleks yang menutup trakhea agar makanan masuk ke esofagus dan bukan saluran napas. Esofagus selalu tertutup kecuali ketika menelan untuk mencegah udara masuk ke lambung sewaktu bernapas.

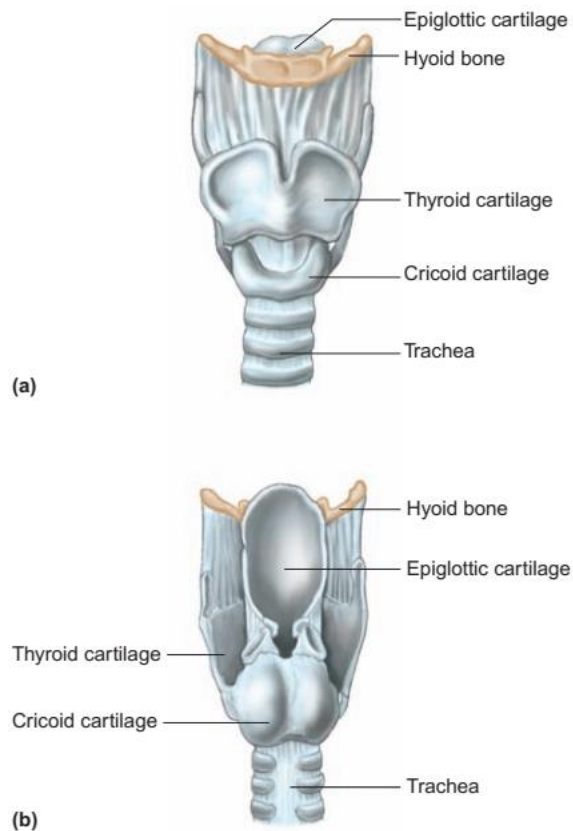
▪ **Laring**

Laring adalah perluasan di jalan napas diatas trakhea dan di bawah faring. Laring mengalirkan udara masuk dan keluar dari trakhea dan mencegah benda-benda asing memasuki trakhea. Laring juga sebagai tempat pita suara dan tersusun dari otot-otot dan kartilago yang dihubungkan atau diikat oleh jaringan elastis. Kartilago terbesar adalah **kartilago tiroid** (“Adam’s apple”), selain itu ada kartilago **krikoid**, dan **epiglotis**. Epiglotis adalah kartilago yang paling atas, pada saat menelan laring akan terangkat dan epiglotis menutup di bagian puncak untuk mencegah makanan masuk ke dalam laring.

Mukosa pada laring adalah epitel bersilia, kecuali untuk pita suara adalah epitel gepeng bertingkat. Silia mukosa akan mendorong ke atas untuk membuang mucus dan menangkap debu dan mikroorganisme.

Pita suara merupakan dua pita jaringan elastik yang melintang di pintu masuk laring, dapat diregangkan dan diposisikan dalam berbagai bentuk oleh otot laring. Sewaktu udara dilewatkan melalui pita suara yang kencang, lipatan tersebut bergetar untuk menghasilkan

berbagai suara bicara. Sewaktu menelan, pita suara melaksanakan fungsi yang tidak berkaitan dengan bicara, keduanya saling mendekat untuk menutup pintu masuk ke trakhea.



Gambar 1-4 Laring. (a) Anterior dan (b) Posterior.
(Sumber : Shier et all, 2012)

▪ **Trakhea**

Trakhea atau batang tenggorokan memiliki panjang kurang lebih 10-13 cm, diameter 12,5 cm dan menghubungkan laring sampai bronkhus. Trakhea bercabang menjadi dua, yaitu bronkhus kiri dan kanan. Mukosa dari trakhea adalah epitel bersilia dengan sel goblet. Sebagaimana di laring, silia menyapu ke atas menuju faring. Dinding trachea terdiri dari 16 sampai 20 lempeng kartilago dengan bentuk menyerupai huruf C, yang menjadi trakhea terbuka. Celah pada cincin kartilago yang tidak bisa menutup secara penuh ini berada di sisi posterior, sehingga memungkinkan ekspansi esofagus ketika makanan ditelan.

Kotak 1-1	EMFISEMA
	<p>Pada emfisema, gelembung udara (alveolus) menjadi teregang berlebihan. Mereka juga meluruh dan menyatu sehingga luas permukaan penyerap oksigen jadi berkurang. Alveolus tidak hanya kehilangan daerah pertukaran udaranya, tapi udara juga terjebak di dalam akibat penurunan elastisitas dinding alveolus. Akibatnya paru-paru mengembang berlebihan, volume udara yang masuk dan keluar paru berkurang, dan lebih sedikit oksigen yang diserap ke dalam aliran darah. Sebagian besar penderita emfisema adalah para perokok berat dalam waktu lama. Meskipun kerusakan akibat emfisema biasanya ireversibel (tak bisa kembali), berhenti merokok kadang-kadang dapat memperlambat perkembangan penyakit.</p>

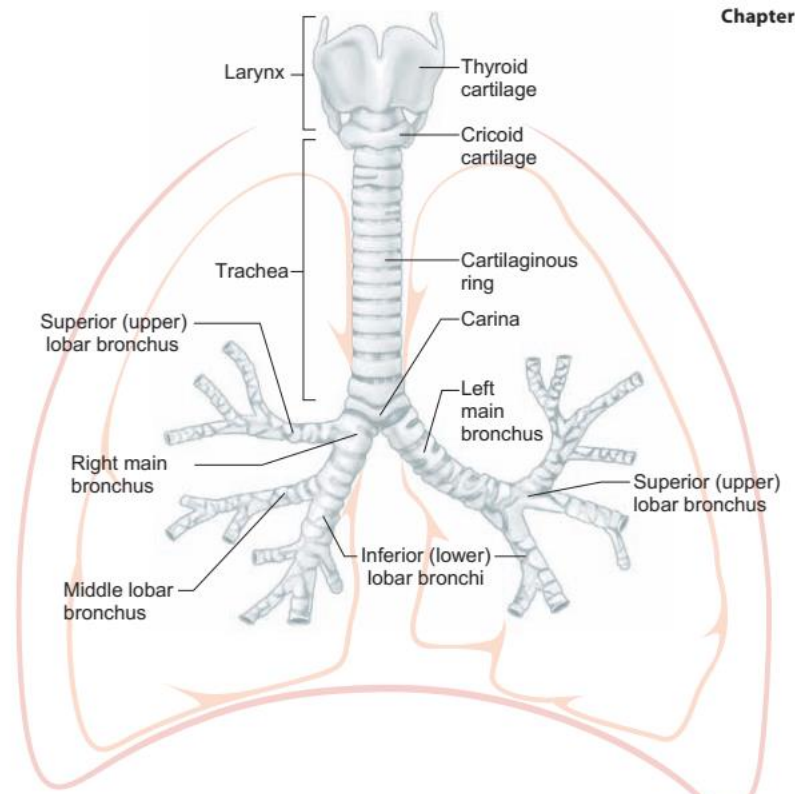
▪ Pohon Brokhus

Pohon bronkhus terdiri dari saluran udara yang bercabang-cabang mengarah dari trakhea ke kantung udara mikroskopis di paru-paru. Cabang-cabangnya dimulai dengan **bronkhus utama (primer)** kanan dan kiri yang muncul dari trakhea pada vertebra thoraks kelima.

Masing-masing bronkhus terbagi menjadi bronkhus lobar (sekunder). Kemudian bronkhus lobar ini akan bercabang menjadi bronkhus segmental (tersier). Cabang dari bronkhus adalah **bronkhiolus** dan perlu diketahui tidak terdapat kartilago pada dinding bronkhiolus. Pada bronkhiolus ujungnya terdapat terminal bronkhiolus, respiratori bronkhiolus dan **saluran alveolar**. Saluran-saluran ini mengarah ke kantung-kantung yang berdinding tipis yang disebut dengan **kantung alveolar**. Kantung alveolar akan menuju ke kantung-kantung udara mikroskopis disebut sebagai **alveoli**, yang didalamnya banyak terdapat pembuluh darah. Alveoli menyediakan permukaan yang luas bagi sel-sel epitel gepeng agar gas-gas respirasi dapat dengan mudah bertukar. Artinya bahwa oksigen dapat dengan mudah berdifusi dari alveoli menuju ke darah melalui pembuluh darah di sekitarnya. Begitu juga dengan karbondioksida dapat dengan mudah berdifusi dari pembuluh darah menuju ke alveoli.

Kotak 1-2	BRONKITIS KRONIS
	<p>Peradangan kronis saluran udara paru-paru biasanya disebabkan oleh rokok. Jarang sekali, infeksi akut yang berulang menimbulkan bronkitis kronis. Pada bronkhitis kronis, bronkhus, saluran udara utama menuju paru-paru, meradang, membengkak, dan menyempit akibat iritasi oleh asap tembakau, infeksi berulang, atau paparan lama terhadap zat polutan. Saluran udara yang meradang mulai menghasilkan dahak berlebihan, awalnya menyebabkan batuk mengganggu di waktu lembap dan dingin, lalu berlanjut sepanjang tahun. Gejala seperti suara</p>

serak, mengi dan sesak napas bahkan disaat sedang istirahat. Jika terjadi saluran sesak napas sekunder, dahak dapat berubah warna dari bening atau putih menjadi kuning atau hijau.



Gambar 1-5 Trakhea yang menghubungkan antara laring dengan bronchus.
(Sumber : Shier et all, 2012)

Kotak 1-3	ASMA
<p>Asma adalah penyakit radang paru-paru yang menimbulkan serangan sesak napas dan mengi yang berulang, disebabkan penyempitan saluran udara di dalam paru-paru. Asma merupakan salah satu kelainan paru-paru yang paling banyak dan paling bervariasi, menyerang satu dari empat anak di beberapa daerah. Beberapa orang mengalami serangan ringan yang jarang, yang lain cenderung menderita sesak napas berat yang mengancam jiwa, beberapa penderita lain mendapat serangan yang bervariasi dan tak terduga setiap harinya. Otot dinding saluran udara berkontraksi seperti kejang, menyebabkan saluran udara menyempit, sehingga terjadi sesak napas. Penyempitan diperburuk oleh sekresi lendir yang berlebihan. Sebagian besar kasus terjadi di masa kanak-kanak dan biasanya berkaitan dengan penyakit yang didasari oleh alergi seperti eksema dan keduanya mempunyai faktor penyakit turunan. Pada sebagian besar anak, pemicu serangan adalah reaksi alergi terhadap benda asing, atau alergen, yang dapat berupa partikel kecil terhirup, seperti polen, jamur dari kotoran tungau debu rumah, dan partikel-partikel dari rambut atau bulu hewan. Kasus lain disebabkan oleh alergi makanan atau minuman, obat tertentu, stress, infeksi saluran napas, dan aktivitas berat dalam cuaca dingin.</p>	

PERAWATAN ASMA

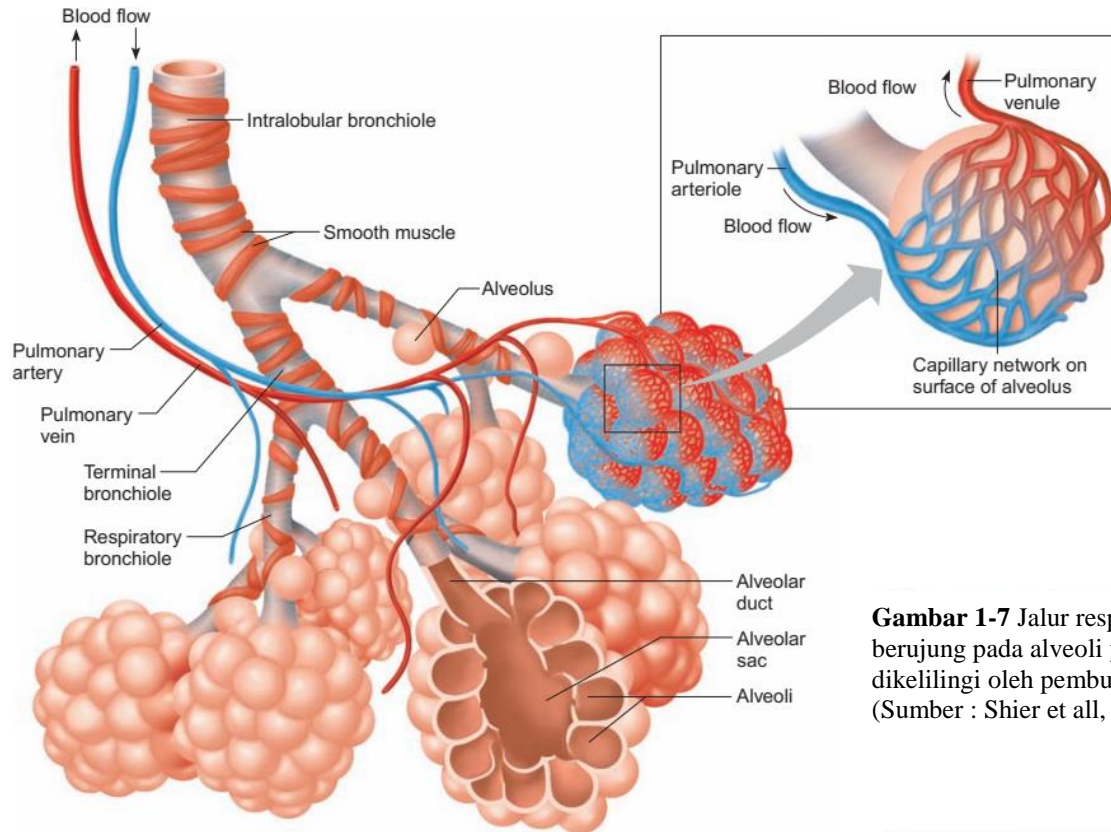
- **Paru-paru**

Paru-paru terletak di kedua sisi jantung dalam rongga dada dan dilindungi secara melingkar oleh rongga yang dibentuk oleh rangka iga. Dasar masing-masing paru terletak pada diafragma dibawahnya, apeks (ujung atas) terletak setingkat klavikula. Terdapat dua buah **paru**, yaitu paru kanan dan kiri, masing-masing dibagi menjadi beberapa lobus dan masing-masing mendapat satu bronkhus. Jaringan paru itu sendiri terdiri dari serangkaian jalan napas yang sangat bercabang-cabang, alveolus, pembuluh darah paru dan sejumlah besar jaringan ikat elastik. Satu-satunya otot didalam paru adalah otot polos di dinding arteriol dan dinding bronkiolus, dimana keduanya berada dibawah kontrol. Tidak terdapat otot di dalam dinding alveolus untuk mengembangkan atau mengempiskan alveolus selama bernapas.

Paru-paru kanan lebih besar dari paru-paru kiri, dimana paru-paru kanan terbagi menjadi tiga lobus, sedangkan paru-paru kiri terbagi menjadi dua lobus. Cabang utama dari pohon bronkhus juga memasuki masing-masing lobus. Tiap lobus mempunyai hubungan dengan pembuluh darah dan limfa yang terdapat dalam jaringan ikat. Dengan demikian paru-paru mempunyai komponen yaitu saluran udara, alveoli, pembuluh darah, jaringan ikat, pembuluh limfa, dan saraf.

Paru menempati sebagian besar volume rongga thoraks (dada), dan struktur-struktur lain di dada adalah jantung dan pembuluh-pembuluh terkaitnya, esofagus, timus dan beberapa saraf. Dinding dada (thoraks) luar dibentuk oleh 12 pasang **iga** melengkung, yang berhubungan dengan **sternum** (tulang dada) di anterior dan **vertebra thorakalis** (tulang punggung) di posterior. Sangkar iga merupakan tulang protektif bagi paru dan jantung. **Diafragma** yang membentuk lantai rongga thoraks, adalah suatu lembaran otot rangka yang lebar, berbentuk kubah dan memisahkan secara total rongga thoraks dari rongga abdomen.

Setiap paru dipisahkan dari dinding thoraks dan struktur lain di sekitarnya oleh suatu kantung tertutup berdinding rangkap yaitu **kantung pleura**. Interior kantung pleura dikenal sebagai **rongga pleura**. Permukaan pleura mengeluarkan suatu **cairan intrapleura** tipis, yang melumasi permukaan pleura selagi keduanya saling bergeser sewaktu pergerakan napas.



Gambar 1-7 Jalur respirasi yang berujung pada alveoli yang dikelilingi oleh pembuluh darah. (Sumber : Shier et all, 2012)

Kotak 1-4	KANKER PARU-PARU
<p>Tumor ganas di dalam paru-paru, kanker paru-paru adalah kanker paling umum di dunia dengan lebih dari satu juta kasus baru ditemukan setiap tahun. Penyebab paling sering kanker paru-paru ditemukan dalam hampir 90 persen dari seluruh kasus adalah rokok. Dahulu, kanker paru-paru lebih sering diderita laki-laki, karena lebih banyak laki-laki yang merokok daripada wanita. Namun demikian, munculnya penyakit ini pada wanita meningkat secara cepat di akhir decade abad ke-20. Penyakit ini juga meningkat di Negara berkembang dengan penyebaran rokok dan pertumbuhan populasi. Banyak zat iritan yang terhirup saat bernapas memicu pertumbuhan sel abnormal di dalam paru-paru, karena rokok mengandung ribuan zat karsinogen (penyebab kanker). Dalam kasus yang sangat jarang, kanker paru-paru disebabkan oleh asbes, zat kimia beracun, atau gas radioaktif radon.</p>	
<p>Gejala kanker paru-paru</p>	
<p>Batuk yang terus-menerus biasanya adalah gejala paling awal. Karena kebanyakan orang yang menderita kanker paru-paru adalah perokok, maka bisa disebut “batuk perokok”. Gejala lain berupa batuk berdarah, mengi, berat badan turun, suara serak yang terus-menerus, dan nyeri dada. Jika uji laboratorium memastikan adanya kanker paru-paru, lobektomi (pengangkatan sebuah lobus paru-paru atau pneumonektomi (pengangkatan sebuah paru secara keseluruhan)</p>	

dapat dilakukan. Ini biasanya disarankan hanya jika tumor berukuran kecil dan belum menyebar. Kemoterapi dan radioterapi dapat diberikan untuk meredakan gejala, bukan bertujuan untuk menyembuhkan penyakit.

Penyebaran kanker paru-paru

Kanker paru-paru dapat menyebar (metastasis) ke bagian tubuh lain. Metastasis ke tulang dapat menimbulkan rasa nyeri dan patah tulang; dalam otak, menyebabkan sakit kepala dan penurunan kesadaran, dan dalam hati menyebabkan penurunan berat badan.

Penyebab kanker paru-paru

Asap tembakau merupakan campuran rumit lebih dari 3.000 zat berbeda, termasuk zat stimulant adiktif nikotin, benzene, ammonia, hydrogen sianida, karbon monoksida, dan tar. Elemen tar yang terbakar dalam rokok diketahui sebagai penyebab kanker (karsinogenik). Risiko terserang kanker paru-paru meningkat seiring jumlah rokok yang diisap perhari, kandungan tar, lama merokok, dan kedalaman penghirupan oleh paru-paru. Penyebab berisiko lain adalah paparan berulang oleh asap rokok orang lain yang disebut merokok pasif.

MEKANISME FAAL

▪ Mekanisme Bernapas

Bernapas atau ventilasi adalah pergerakan udara dari lingkungan luar tubuh ke dalam dan keluar dari pohon bronkhi dan alveoli. Tindakan bernapas ini terjadi satu kali menghirup (**inspirasi**) atau inhalasi dan satu kali menghembuskan (**ekspirasi**) atau ekshalasi. Udara cenderung mengalir dari daerah dengan tekanan tinggi ke daerah dengan tekanan rendah, yaitu menuruni **gradien tekanan**.

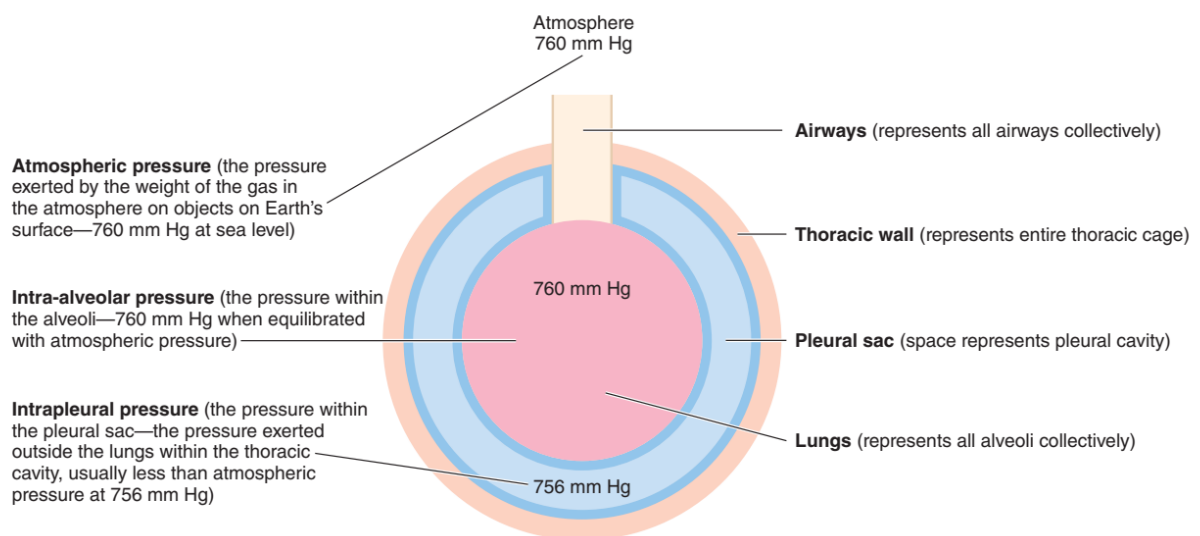
Hubungan antara tekanan di dalam dan diluar paru penting dalam ventilasi.

Udara mengalir masuk dan keluar paru selama tindakan bernapas karena berpindah mengikuti gradien tekanan antara alveolus dan atmosfer yang berbalik arah secara bergantian dan ditimbulkan oleh aktivitas otot pernapasan. Terdapat tiga tekanan yang berperan penting dalam ventilasi.

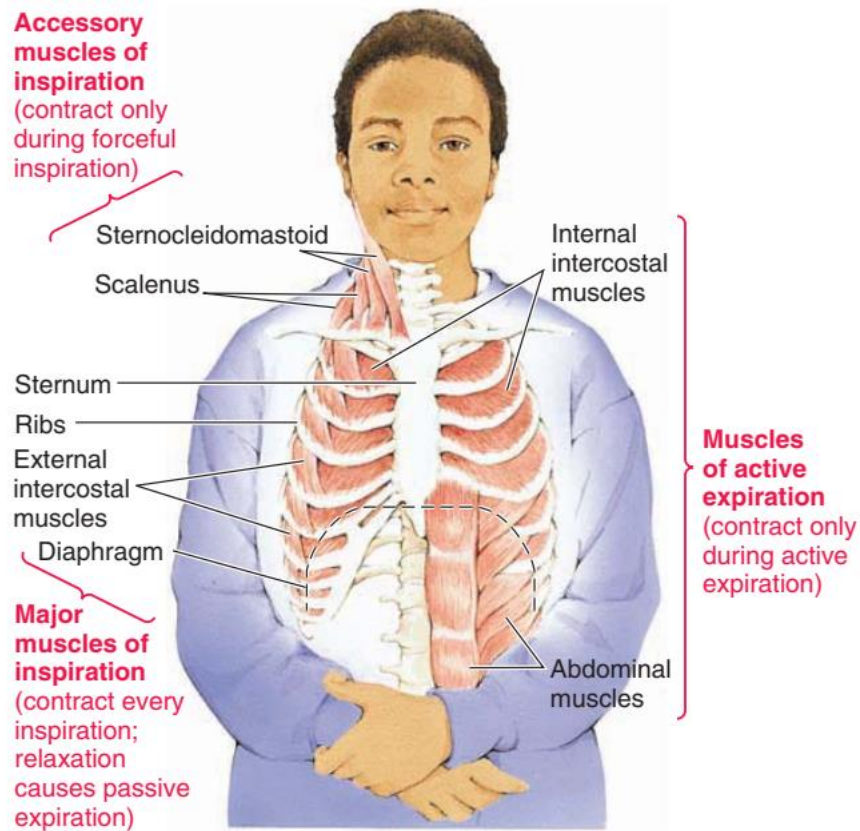
1. **Tekanan atmosfer (barometrik)** adalah tekanan yang ditimbulkan oleh berat udara di atmosfer pada benda di permukaan bumi. Pada ketinggian permukaan laut tekanan ini sama dengan 760 mmHg. Tekanan atmosfer berkurang seiring dengan penambahan ketinggian diatas permukaan laut karena lapisan-lapisan udara di atas permukaan bumi

juga semakin menipis. Pada setiap ketinggian terjadi perubahan minor tekanan atmosfer karena perubahan kondisi cuaca (yaitu, tekanan barometrik naik atau turun).

2. **Tekanan intra-alveolus**, yang juga dikenal sebagai **tekanan intraparu**, adalah tekanan di dalam alveolus. Karena alveolus berhubungan dengan atmosfer melalui jalan napas penghantar, udara cepat mengalir menuruni gradient tekanannya setiap tekanan intra-alveolus berbeda dari tekanan atmosfer, udara terus mengalir sampai kedua tekanan seimbang (ekuilibrium).
3. **Tekanan intrapleura** adalah tekanan di dalam kantung pleura. Tekanan ini juga dikenal sebagai **tekanan intrathoraks**, adalah tekanan yang ditimbulkan di luar paru di dalam rongga thoraks. Tekanan intrapleura biasanya lebih rendah daripada tekanan atmosfer, rerata 756 mmHg saat istirahat.



Gambar 1-8 Berbagai tekanan yang penting pada ventilasi.
(Sumber : Sherwood, 2011)



Gambar 1-9 Anatomi otot pernapasan
(Sumber : Sherwood, 2011)

Udara mengalir mengikuti penurunan gradien tekanan, maka tekanan intra-alveolus harus lebih kecil dari tekanan atmosfer agar udara mengalir masuk ke dalam paru sewaktu inspirasi. Demikian juga, tekanan intra-alveolus harus lebih besar daripada tekanan atmosfer agar udara mengalir keluar paru sewaktu ekspirasi. Tekanan intra-alveolus dapat diubah dengan mengubah volume paru, sesuai hukum Boyle. **Hukum Boyle** menyatakan bahwa pada suhu konstan, tekanan yang ditimbulkan oleh suatu gas berbanding terbalik dengan volume gas, yaitu sewaktu volume gas meningkat, tekanan yang ditimbulkan oleh gas berkurang. Sebaliknya, tekanan meningkat sewaktu volume berkurang.

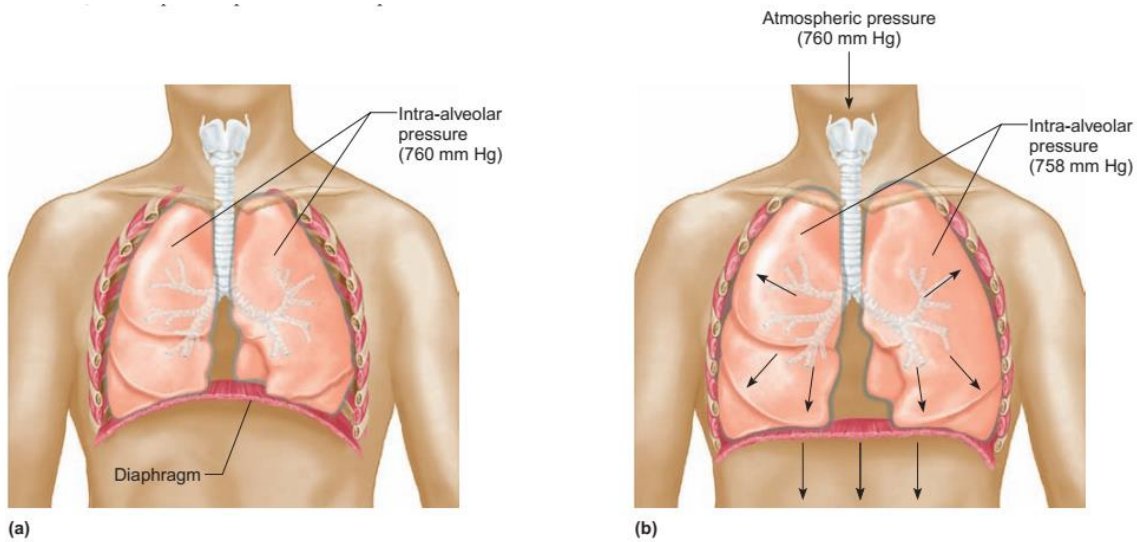
Inspirasi

Sebelum inspirasi :

- Otot-otot pernapasan berada dalam keadaan lemas
- Tidak ada udara yang mengalir
- Tekanan intra-alveolus setara dengan tekanan atmosfer

Pada saat inspirasi :

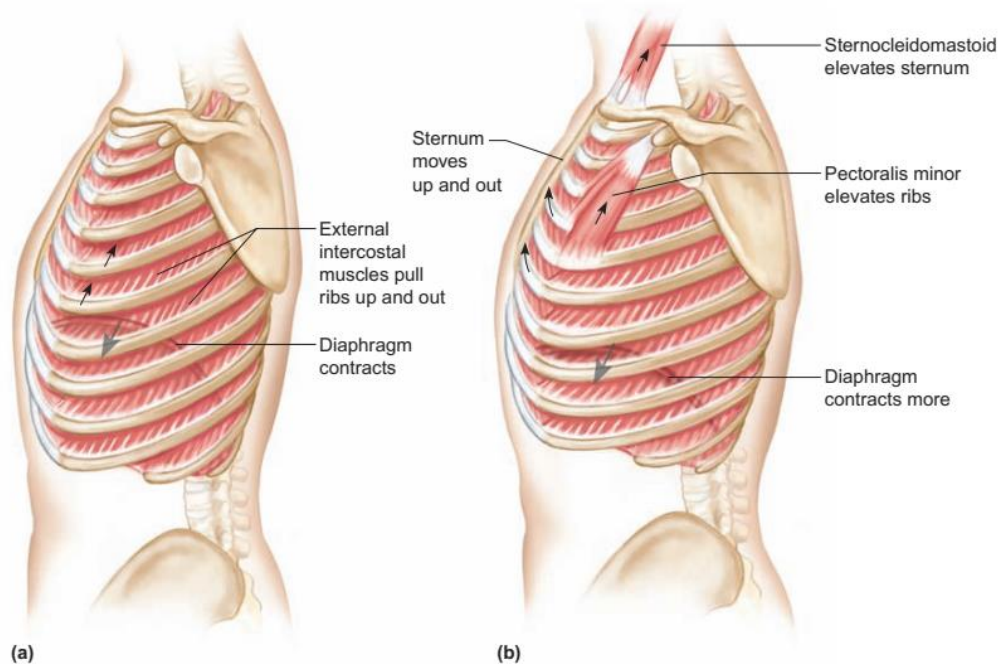
- Otot-otot inspirasi utama (Gambar 1-9), yaitu diafragma dan intercostal eksternal berkontraksi sehingga rongga dada (thoraks) membesar. Otot inspirasi utama adalah **diafragma**, suatu lembaran otot rangka yang membentuk lantai rongga thoraks dan disarafi oleh **saraf frenikus**. Diafragma jika dalam keadaan melemas berbentuk kubah yang menonjol ke atas ke dalam rongga thoraks. Ketika berkontraksi diafragma turun dan memperbesar volume rongga thoraks (Gambar 1-10).
- Pada saat kontraksi otot interkostal eksternal akan memperbesar rongga thoraks, mengangkat iga dan selanjutnya sternum ke atas dan ke depan. Rongga thoraks membesar maka paru otomatis akan mengembang. Pada saat paru mengembang, tekanan intra-alveolus turun 1 mmHg yaitu 759 mmHg. Tekanan intra-alveolus yang lebih kecil dari tekanan atmosfer maka mengakibatkan udara mengalir ke dalam paru mengikuti penurunan gradien tekanan dari tekanan tinggi ke tekanan rendah.
- Udara terus memasuki paru sampai tidak ada lagi gradien yaitu sampai tekanan intra-alveolus setara dengan tekanan atmosfer.



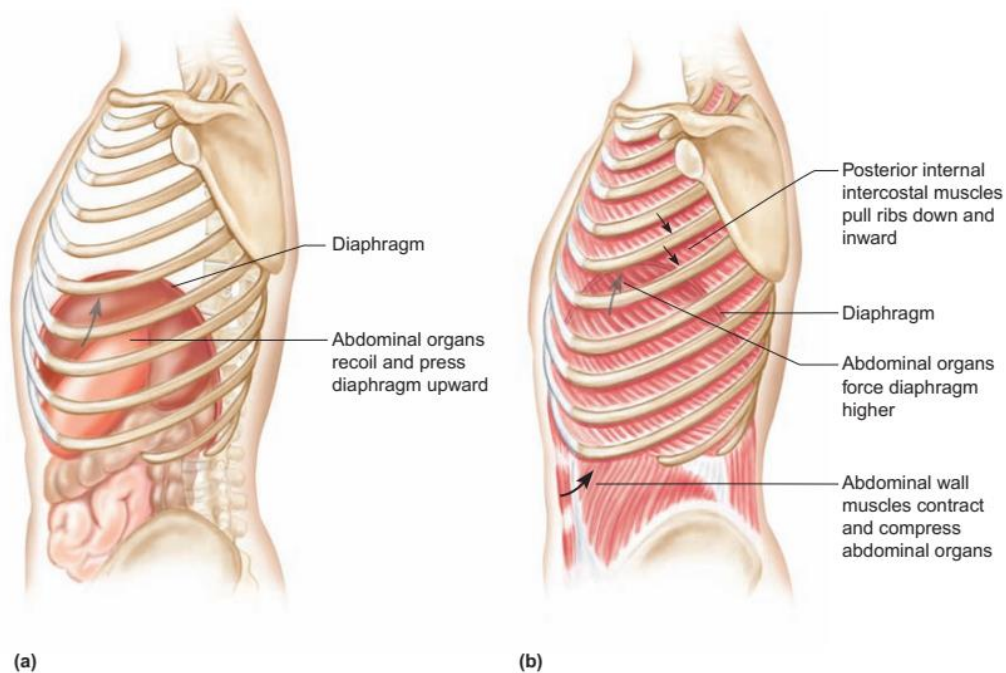
Gambar 1-10 Normal inspirasi (a). Inspirasi dengan tekanan intra-alveolas 760 mmHg (b). Tekanan intra-alveolar menurun sampai 758 mmHg rongga thoraks membesar dan mengalirkan udara ke jalan napas.

Ekspirasi

- Pada akhir inspirasi, otot inspirasi akan melemas. Diafragma mengambil posisi aslinya yaitu berbentuk kubah yang menonjol ke atas ke dalam rongga thoraks.
- Ketika otot interkostal eksternal melemas, sangkar iga turun, dinding dada dan paru yang semula teregang mengalami *recoil* ke ukuran prainspirasinya karena sifat-sifat elastiknya, seperti balon yang teregang dan mengempis kembali.
- Sewaktu paru kembali mengecil, tekanan intra-alveolus meningkat 1 mmHg diatas tekanan atmosfer menjadi 761 mmHg. Hal ini mengakibatkan udara meninggalkan paru menuruni gradien tekanannya dari tekanan intra-alveolus yang lebih tinggi ke tekanan atmosfer yang lebih rendah. Aliran keluar udara berhenti ketika tekanan intra-alveolus menjadi sama dengan tekanan atmosfer dan gradient tekanan tidak ada lagi.



Gambar 1-11 Inspirasi maksimal (a) Bentuk thoraks pada saat akhir normal inspirasi (b) Bentuk thoraks pada saat akhir inspirasi, diikuti oleh kontraksi otot sternocleidomastoid dan otot pectoralis minor



Gambar 1-12 Ekspirasi (a) Normal ekspirasi menyebabkan organ-organ abdominal dan jaringan paru-paru kembali ke elastisitasnya (b) Kontraksi otot dinding abdominal menyebabkan dan otot intercostal posterior internal memaksimalkan ekspirasi

Volume dan Kapasitas Udara Respirasi

Volume dan kapasitas udara respirasi meliputi :

1. **Volume alun napas** (*tidal volume*, TV). Volume udara yang masuk atau keluar paru selama satu kali bernapas. Nilai rerata pada kondisi istirahat = 500 ml.
2. **Volume cadangan inspirasi** (*inspiratory reserve volume*, IRV). Volume udara tambahan yang dapat maksimal dihirup diatas volume alun napas istirahat. IRV dicapai oleh kontraksi maksimal diafragma, otot interkostal eksternal dan otot inspirasi tambahan. Nilai rerata = 3000 ml.
3. **Kapasitas inspirasi** (*inspiratory capacity*, IC). Volume udara maksimal yang dapat dihirup pada akhir ekspirasi tenang normal ($IC = IRV + TV$). Nilai rerata = 3500 ml.
4. **Volume cadangan ekspirasi** (*expiratory reserve volume*, ERV). Volume udara tambahan yang dapat secara aktif dikeluarkan dengan mengontaksikan secara maksimal otot-otot ekspirasi melebihi udara yang secara normal dihembuskan secara pasif pada akhir volume alun napas istirahat. Nilai rerata = 1000 ml.
5. **Volume residual** (*residual volume*, RV). Volume udara minimal yang tertinggal di paru bahkan setelah ekspirasi maksimal. Nilai rerata = 1200 ml.
6. **Kapasitas residual fungsional** (*functional residual capacity*, FRC). Volume udara di paru pada akhir ekspirasi pasif normal ($FRC = ERV + RV$). Nilai rerata = 2200 ml.
7. **Kapasitas vital** (*vital capacity*, VC). Volume udara maksimal yang dapat dikeluarkan dalam satu kali bernapas setelah inspirasi maksimal. Subyek pertama-tama melakukan inspirasi maksimal lalu ekspirasi maksimal ($VC = IRV + TV + ERV$). Nilai rerata = 4500 ml.
8. **Kapasitas paru total** (*total lung capacity*, TLC). Volume udara maksimal yang dapat ditampung oleh paru ($TLC = VC + RV$). Nilai rerata = 5700 ml.

Pertukaran Gas

Tujuan utama bernapas adalah secara kontinyu memasok O_2 segar untuk diserap oleh darah dan mengeluarkan CO_2 dari darah. Darah bekerja sebagai sistem transport untuk O_2 dan CO_2 antara paru dan jaringan, dengan sel jaringan mengekstraksi O_2 dari darah dan mengeliminasi CO_2 ke dalamnya.

Pertukaran gas di tingkat kapiler paru dan kapiler jaringan berlangsung secara difusi pasif sederhana O_2 dan CO_2 menuruni *gradien tekanan parsial*. Tidak terdapat mekanisme transport aktif untuk gas-gas ini.

Tekanan Parsial

Udara atmosfer adalah campuran gas : udara kering mengandung sekitar 79% nitrogen (N_2) dan 21% O_2 , dengan persentase CO_2 , uap H_2O , gas lain, dan polutan hampir dapat diabaikan. Secara keseluruhan gas-gas ini menimbulkan tekanan atmosfer total sebesar 760 mmHg di permukaan laut. Tekanan total ini sama dengan jumlah tekanan yang disumbangkan oleh masing-masing gas dalam campuran. Tekanan yang ditimbulkan oleh gas tertentu berbanding lurus dengan persentase gas tersebut dalam campuran udara total. Setiap molekul gas, berapapun ukurannya menimbulkan tekanan yang sama, sebagai contoh, sebuah molekul N_2 menimbulkan tekanan yang sama dengan sebuah molekul O_2 . Karena 79% udara terdiri dari molekul N_2 , maka 79% dari 760 mmHg tekanan atmosfer, atau 600 mmHg, ditimbulkan oleh molekul-molekul N_2 . Demikian juga, karena O_2 membentuk 21% atmosfer, maka 21% dari 760 mmHg tekanan atmosfer, atau 160 mmHg, ditimbulkan oleh O_2 . Tekanan yang ditimbulkan secara independen oleh masing-masing gas dalam suatu campuran gas dikenal sebagai **tekanan parsial** yang dilambangkan oleh P_{gas} . Karena itu tekanan parsial O_2 dalam atmosfer, PO_2 , normalnya adalah 160 mmHg. Tekanan parsial CO_2 , atmosfer, PCO_2 , hampir dapat dipastikan (0,23 mmHg).

Gas-gas yang larut dalam cairan misalnya darah atau cairan tubuh yang lainnya juga menimbulkan tekanan parsial. Semakin besar tekanan parsial suatu gas dalam cairan, semakin banyak gas tersebut larut.

Gradien Tekanan Parsial

Perbedaan tekanan parsial antara kapiler darah dengan struktur disekitarnya dikenal sebagai gradien tekanan parsial. Terdapat gradien tekanan parsial antara udara alveolus dan darah kapiler paru. Demikian juga, terdapat gradien tekanan parsial antara darah kapiler sistemik dan jaringan disekitar. Suatu gas selalu berdifusi menuruni gradien tekanan parsialnya dari daerah dengan tekanan parsial tinggi ke daerah dengan tekanan parsial yang lebih rendah, serupa dengan difusi menuruni gradien konsentrasi.

PO₂ dan PCO₂ Alveolus

O₂ dan CO₂ menurunkan gradien tekanan parsialnya saat melewati membrane respiratorik. Molekul gas berdifusi dari area bertekanan tinggi ke area bertekanan rendah terlepas dari konsentrasi gas lain dalam larutan, dengan demikian, kecepatan difusi gas menembus membrane ditentukan oleh tekanan parsialnya.

PO₂ dalam alveolus adalah 100 mmHg, sedangkan PO₂ atmosfer adalah 160 mmHg, dengan demikian udara dapat memasuki alveolus. O₂ secara terus-menerus berpindah secara difusi pasif menuruni gradien tekanan parsialnya dari alveolus ke dalam darah. O₂ yang tiba di alveolus dalam udara yang baru diinspirasi hanya mengganti O₂ yang berdifusi keluar alveolus masuk ke kapiler paru. Karena itu PO₂ alveolus tetap relatif konstan sekitar 100 mmHg. Karena PO₂ darah paru seimbang dengan PO₂ alveolus, maka PO₂ darah yang meninggalkan paru juga konstan pada nilai yang sama.

CO₂ diproduksi secara terus-menerus oleh jaringan tubuh sebagai produk sisa metabolisme, ditambahkan ke darah ditingkat kapiler sistemik. Di kapiler paru, CO₂ berdifusi menuruni gradien tekanan parsialnya dari darah ke dalam alveolus dan kemudian dikeluarkan dari tubuh sewaktu ekspirasi. PCO₂ alveolus relatif tetap konstan dengan nilai yang lebih rendah yaitu 40 mmHg.

Gradien PO₂ dan PCO₂ Menembus Kapiler Paru

Darah yang masuk ke kapiler paru adalah darah vena sistemik yang dipompa ke dalam paru melalui arteri-arteri paru. Darah ini, yang baru kembali dari jaringan tubuh, relatif kekurangan O₂ dengan PO₂ 40 mmHg dan relatif kaya CO₂, dengan PCO₂ 46 mmHg. Karena PO₂ alveolus pada 100 mmHg lebih tinggi dari pada PO₂ 40 mmHg di darah yang masuk ke paru, maka O₂ berdifusi menuruni gradien tekanan parsialnya dari alveolus ke dalam darah. Sewaktu meninggalkan kapiler paru, darah memiliki PO₂ sama dengan PO₂ alveolus yaitu 100 mmHg.

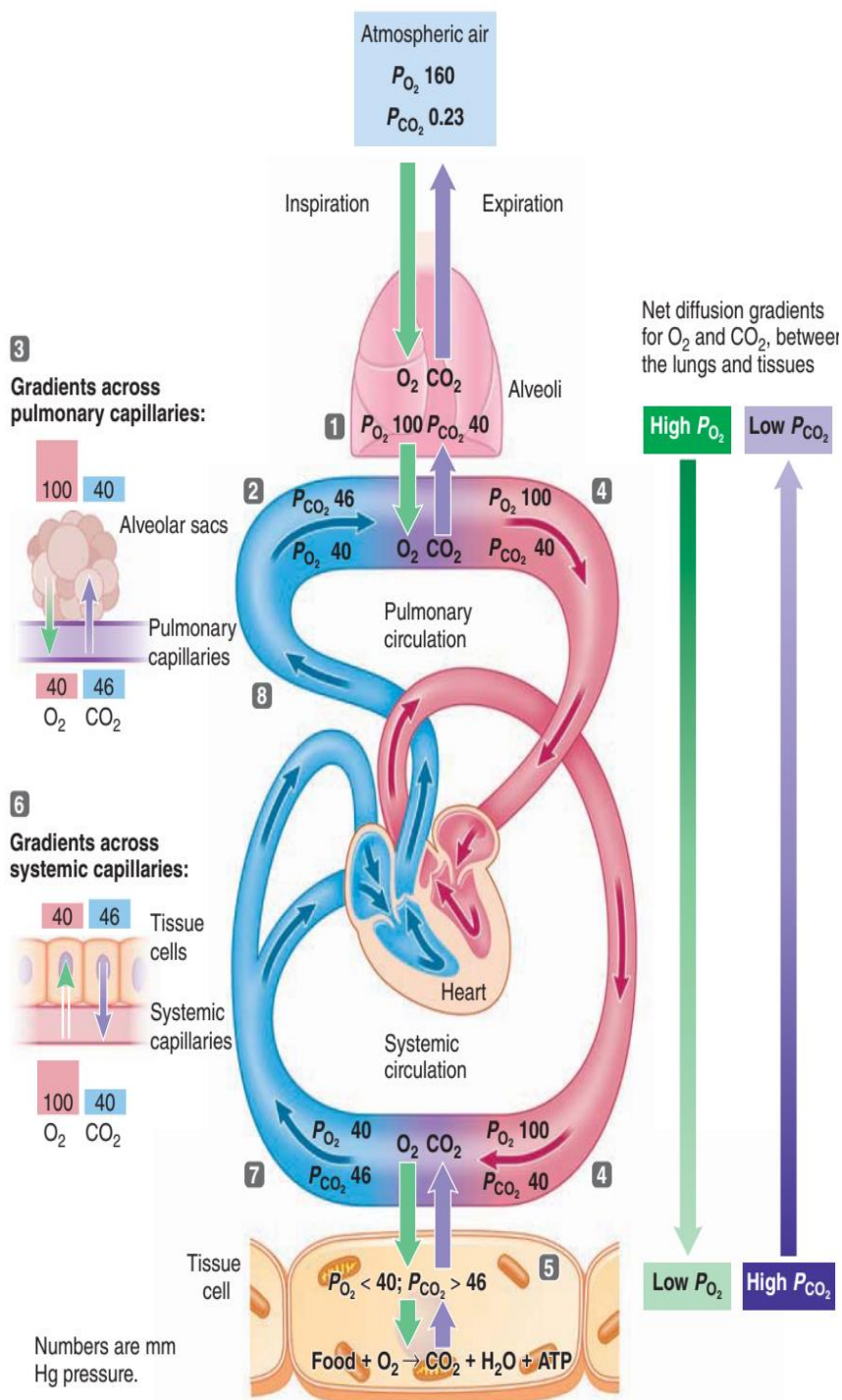
Gradien tekanan parsial CO₂ memiliki arah berlawanan. Darah yang masuk ke kapiler paru memiliki PCO₂ 46 mmHg, sementara PCO₂ alveolus hanya 40 mmHg. CO₂ berdifusi dari darah ke dalam alveolus sampai PCO₂ darah seimbang dengan PCO₂ alveolus. Karena itu, darah yang meninggalkan kapiler paru memiliki PCO₂ 40 mmHg. Setelah meninggalkan paru, darah yang kini memiliki PO₂ 100 mmHg dan PCO₂ 40

mmHg kembali ke jantung, kemudian dipompa ke jaringan tubuh sebagai darah arteri sistemik.

Gradien PO₂ dan PCO₂ Menembus Kapiler Sistemik

Sel-sel secara terus menerus mengonsumsi O₂ dan menghasilkan CO₂ melalui proses metabolisme. PO₂ sel adalah 40 mmHg dan PCO₂ 46 mmHg. Oksigen berpindah melalui difusi mengikuti penurunan gradien tekanan parsialnya dari darah kapiler sistemik (PO₂ = 100 mmHg) ke dalam sel (PO₂ = 40 mmHg) sampai tercapai keseimbangan. Karena itu, darah vena yang meninggalkan kapiler sistemik sama dengan PO₂ jaringan yaitu 40 mmHg.

Situasi terbalik dijumpai untuk CO₂. Karbon dioksida cepat berdifusi keluar sel (PCO₂ = 46 mmHg) ke dalam darah kapiler (PCO₂ = 40 mmHg) menuruni gradien tekanan parsial yang tercipta oleh produksi CO₂ yang terus-menerus. Pemindahan CO₂ terus berlanjut, karena itu darah yang meninggalkan kapiler sistemik memiliki PCO₂ 46 mmHg. Darah vena sistemik ini relatif rendah PO₂ nya (PO₂ = 40 mmHg) dan relatif tinggi PCO₂ nya (PCO₂ = 46 mmHg), kembali ke jantung dan kemudian dipompa ke paru seiring dengan berulangnya siklus.



1. PO_2 alveolus tetap relatif tinggi dan PCO_2 alveolus tetap relatif rendah karena sebagian dari udara alveolus ditukar dengan udara atmosfer baru setiap kali bernapas.
2. Sebaliknya, darah vena sistemik yang masuk ke paru relatif rendah dalam O_2 dan tinggi dalam CO_2 karena telah menyerahkan O_2 dan menyerap CO_2 di tingkat kapiler sistemik.
3. Hal ini menciptakan gradien tekanan parsial antara udara alveolus dan darah kapiler baru yang memicu difusi pasif O_2 ke dalam darah dan CO_2 keluar darah sampai tekanan parsial darah dan alveolus setara.
4. Karena itu, darah yang meninggalkan paru relative mengandung O_2 tinggi dan CO_2 rendah. Darah ini disalurkan ke jaringan dengan kandungan gas darah yang sama dengan ketika darah tersebut meninggalkan paru.
5. Tekanan parsial O_2 relatif rendah dan CO_2 relatif tinggi di sel jaringan yang mengonsumsi O_2 dan memproduksi CO_2 .
6. Akibatnya, gradient tekanan parsial untuk pertukaran gas di tingkat jaringan mendorong perpindahan pasif O_2 keluar darah menuju sel untuk menunjang kebutuhan metabolik sel-sel tersebut dan juga mendorong pemindahan secara simultan CO_2 ke dalam darah.
7. Setelah mengalami keseimbangan dengan sel-sel jaringan, darah yang meninggalkan jaringan relatif mengandung O_2 rendah dan CO_2 tinggi.
8. Darah ini kemudian kembali ke paru untuk kembali diisi oleh O_2 dan dikeluarkannya CO_2 nya.

Gambar 1-13 Pertukaran O_2 dan CO_2 menembus kapiler paru dan kapiler sistemik akibat gradient tekanan parsial. (Sumber : Sherwood, 2011).

Transpor Gas

Oksigen yang diserap oleh darah di paru harus diangkut ke jaringan untuk digunakan oleh sel. Sebaliknya, CO₂ yang diproduksi di tingkat sel harus diangkut ke paru untuk dikeluarkan.

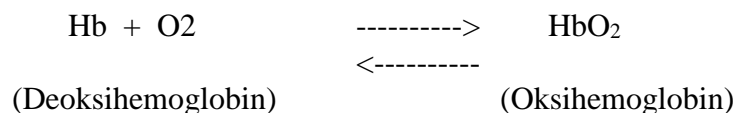
Transpor O₂

Oksigen terdapat dalam darah dalam dua bentuk, yaitu larut secara fisik dan secara kimiawi berikatan dengan hemoglobin (Tabel 1-1).

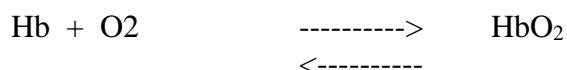
Tabel 1-1 Metode Transpor Gas dalam Darah		
Gas	Metode Transpor dalam Darah	Presentase yang Dibawa dalam Bentuk Ini
O ₂	- Larut secara fisik	1,5
	- Berikatan dengan hemoglobin	98,5
CO ₂	- Larut secara fisik	10
	- Berikatan dengan hemoglobin	30
	- Sebagai bikarbonat	60

Sangat sedikit O₂ yang larut secara fisik dalam cairan plasma, karena O₂ kurang larut dalam cairan tubuh. Jumlah yang larut berbanding lurus dengan PO₂ darah : semakin tinggi PO₂, semakin banyak O₂ yang larut. Hanya 1,5% O₂ dalam darah yang larut, sisa 98,5%-nya diangkut dalam ikatan dengan Hb. O₂ yang terikat ke Hb tidak ikut membentuk PO₂ darah, karena itu, PO₂ darah bukan ukuran kandungan O₂ total darah tetapi hanya ukuran bagian O₂ yang larut.

Hemoglobin merupakan suatu molekul protein yang mengandung besi dan terdapat di dalam sel darah merah, dapat membentuk ikatan yang longgar dan reversibel dengan O₂. Ketika tidak berikatan dengan O₂, Hb disebut sebagai **hemoglobin tereduksi** atau **deoksihemoglobin** dan ketika berikatan dengan O₂ disebut **oksihemoglobin (HbO₂)** :



Masing-masing dari keempat atom besi didalam bagian hem sebuah molekul hemoglobin dapat berikatan dengan satu molekul O₂, sehingga setiap molekul Hb dapat membawa hingga empat molekul O₂. Hemoglobin dianggap jenuh ketika semua Hb yang ada membawa O₂-nya secara maksimal. Faktor terpenting yang menentukan suatu ukuran seberapa banyak Hb berikatan dengan O₂ (%) adalah PO₂ darah, yang berkaitan dengan konsentrasi O₂ yang secara fisik larut dalam darah. Menurut **hukum aksi massa**, jika konsentrasi suatu bahan yang terlibat dalam suatu reaksi reversibel meningkat maka reaksi terdorong ke arah yang berlawanan. Sebaliknya, jika konsentrasi satu bahan berkurang maka reaksi terdorong ke arah sisi tersebut. Dengan menerapkan hukum ini ke reaksi reversibel yang melibatkan Hb dan O₂ :



Ketika PO₂ darah meningkat, seperti di kapiler paru, reaksi bergerak ke arah sisi kanan persamaan, meningkatkan pembentukan HbO₂ (peningkatan Hb yang berikatan dengan O₂). Ketika PO₂ darah turun, seperti di kapiler sistemik, reaksi terdorong ke arah sisi kiri persamaan dan oksigen dibebaskan dari Hb karena HbO₂ berdisosiasi (efek penurunan Hb yang berikatan dengan O₂). Karena itu, akibat perbedaan PO₂ di paru dan jaringan lain, maka Hb secara otomatis “mengambil O₂” di paru, tempat ventilasi secara terus-menerus menyediakan pasokan segar O₂ dan “melepaskannya” di jaringan, yang secara terus-menerus menggunakan O₂.

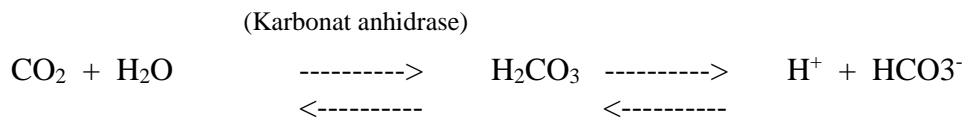
Transpor CO₂

Karbon dioksida diangkut oleh darah dalam tiga cara, yaitu :

1. *Larut secara fisik.* Seperti O₂ yang larut, jumlah CO₂ yang larut secara fisik dalam darah bergantung pada PCO₂. Karena CO₂ lebih larut daripada O₂ dalam cairan plasma maka proporsi CO₂ lebih besar daripada O₂. Meskipun demikian, hanya 10% dari kandungan CO₂ total darah yang terangkut dengan cara ini pada tingkat PCO₂ vena sistemik normal.
2. *Terikat ke hemoglobin.* Sebanyak 30% dari CO₂ berikatan dengan Hb untuk membentuk **karbaminohemoglobin (HbCO₂)**. Karbon dioksida berikatan dengan bagian globin Hb, berbeda dari O₂ yang berikatan dengan bagian hem. Hb tereduksi memiliki afinitas yang

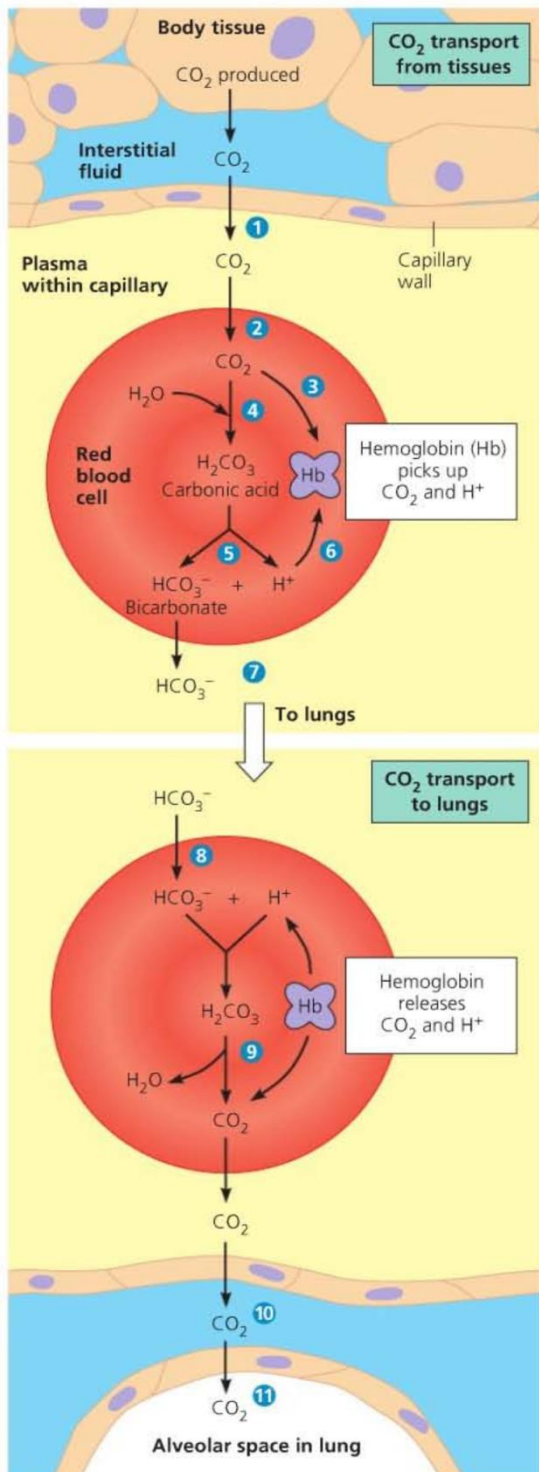
lebih besar terhadap CO₂ daripada HbO₂. Karena itu, dibebaskannya O₂ dari Hb di kapiler jaringan mempermudah penyerapan CO₂ oleh Hb.

3. *Sebagai bikarbonat.* Sejauh ini cara yang paling penting untuk mengangkut CO₂ adalah sebagai bikarbonat (HCO₃⁻), dengan 60% CO₂ diubah menjadi HCO₃⁻ oleh reaksi kimia berikut, yang berlangsung di dalam sel darah merah :



Dalam reaksi pertama, CO₂ berikatan dengan H₂O untuk membentuk **asam karbonat (H₂CO₃)**. Reaksi ini dapat terjadi sangat lambat di plasma, tetapi berlangsung sangat cepat di dalam sel darah merah karena adanya enzim eritrosit **karbonat anhidrase**, yang mengatalisis (mempercepat) reaksi. Sesuai sifat asam sebagian dari molekul asam karbonat secara spontan terurai menjadi ion hidrogen (H⁺) dan ion bikarbonat (HCO₃⁻).

Sewaktu reaksi ini berlangsung HCO₃⁻ dan H⁺ mulai menumpuk di dalam sel darah merah di kapiler sistemik. Membran sel darah merah memiliki pembawa HCO₃⁻ dan Cl⁻ yang secara pasif mempermudah difusi ion-ion ini di dalam arah berlawanan menembus membran. Membran relatif impermeabel terhadap H⁺. Karena itu, HCO₃⁻, bukan H⁺, berdifusi menuruni gradien konsentrasinya keluar eritrosit ke dalam plasma menuju ke paru. Sebagian besar H⁺ yang tetap tinggal di dalam sel darah merah akan berikatan ke Hb, karena seperti pada CO₂, Hb tereduksi memiliki afinitas yang lebih besar terhadap H⁺ daripada HbO₂. Ketika darah mengalir melalui paru-paru, PCO₂ mendorong difusi CO₂ keluar dari darah. Saat CO₂ berdifusi ke dalam alveoli, jumlah CO₂ di dalam darah berkurang. Pengurangan ini menggeser kesetimbangan kimiawi yang mendorong konversi HCO₃⁻ menjadi CO₂, sehingga memungkinkan difusi neto CO₂ lebih lanjut ke dalam alveoli.



1. Karbon dioksida yang dihasilkan oleh jaringan-jaringan tubuh berdifusi ke dalam cairan interstitial dan plasma.
2. Kurang lebih 90% CO₂ berdifusi ke dalam sel darah merah, menyisakan kurang lebih hanya 10% dalam plasma sebagai CO₂ terlarut.
3. Sebagian CO₂ diikat dan ditranspor oleh hemoglobin
4. Akan tetapi, sebagian besar CO₂ bereaksi di dalam sel darah merah, membentuk asam karbonat (H₂CO₃). Reaksi ini dikatalisis oleh karbonat anhidrase dalam sel darah merah.
5. Asam karbonat berdisosiasi ke dalam ion bikarbonat (HCO₃⁻) dan ion hydrogen (H⁺).
6. Hemoglobin mengikat sebagian besar H⁺ dari H₂CO₃, sehingga mencegah mengasamkan darah, dan dengan demikian mencegah pergeseran Bohr.
7. Sebagian besar HCO₃⁻ berdifusi ke dalam plasma, dimana ion tersebut diangkut dalam aliran darah menuju paru-paru.
8. Di paru-paru HCO₃⁻ berdifusi dari plasma ke dalam sel darah merah, berkombinasi dengan H⁺ yang dilepaskan dari hemoglobin dan membentuk H₂CO₃.
9. Asam karbonat dikonversi lagi menjadi CO₂ dan air. CO₂ juga dilepaskan dari hemoglobin.
10. CO₂ berdifusi ke dalam plasma dan cairan interstitial.
11. CO₂ juga berdifusi ke dalam rongga alveoli, dan dari situ dibuang saat ekshalasi. Pengurangan kadar CO₂ dalam plasma mendorong penguraian H₂CO₃ menjadi CO₂ dan air dalam sel darah merah (lihat langkah 9), pembalikan reaksi yang terjadi di dekat jaringan tubuh.

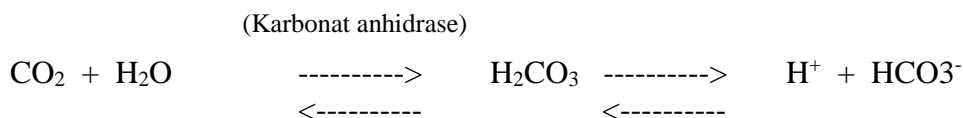
Gambar 1-14 Transpor CO₂ dalam darah (Sumber : Campbell, 2008).

Kontrol Pernapasan

Bernapas harus berlangsung dalam pola yang terus-menerus untuk mempertahankan proses-proses kehidupan. Otot-otot inspirasi secara berirama berkontraksi dan melemas secara bergantian untuk mengisi paru-paru dengan udara dan mengosongkannya. Aktivitas ini berlangsung secara otomatis, tanpa upaya sadar.

Kumpulan neuron yang mengatur pernapasan disebut **pusat-pusat kontrol pernapasan (breathing control centers)**, terletak di dua wilayah otak, yaitu medula oblongata dan pons. Sirkuit kontrol di dalam medula menentukan ritme pernapasan, sementara neuron-neuron di dalam pons mengatur tempo.

Dalam mengatur pernapasan, medula menggunakan pH cairan jaringan di sekitar sebagai indikator konsentrasi CO_2 darah. Alasan pH dapat digunakan adalah bahwa CO_2 darah merupakan penentu utama pH cairan cerebrospinal (cerebrospinal fluid), cairan yang mengelilingi otak dan sumsum tulang belakang. Karbon dioksida berdifusi dari darah ke cairan cerebrospinal, tempat CO_2 bereaksi dengan air dan membentuk asam karbonat (H_2CO_3). Kemudian H_2CO_3 berdisosiasi menjadi ion bikarbonat (HCO_3^-) dan ion hidrogen (H^+).



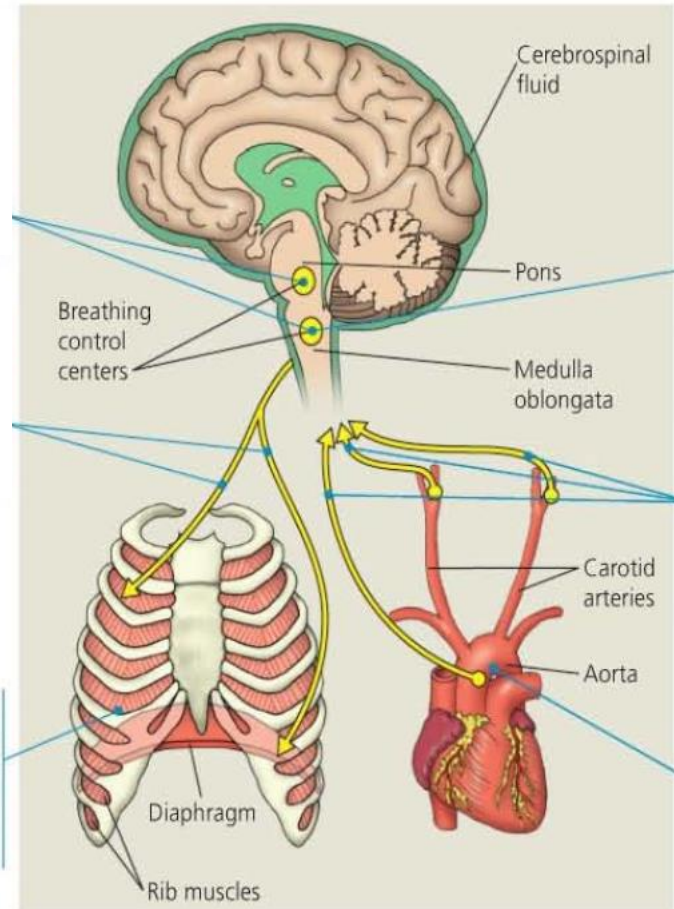
Aktivitas metabolik yang meningkat, misalnya yang terjadi pada saat olahraga, menurunkan pH dengan meningkatkan konsentrasi CO_2 dibuang dalam udara yang diekshalasi dan pH kembali ke nilai normal.

Konsentrasi O_2 di dalam darah biasanya berpengaruh kecil pada pusat-pusat kontrol pernapasan. Akan tetapi, ketika kadar O_2 jatuh sangat rendah (misalnya di tempat yang tinggi), sensor-sensor O_2 di dalam aorta dan arteri-arteri karotid di dalam leher mengirimkan sinyal-sinyal ke pusat-pusat kontrol pernapasan, yang merespons dengan meningkatkan laju pernapasan.

Kontrol pernapasan efektif hanya jika terkoordinasi dengan kontrol sistem kardiovaskuler sehingga ventilasi sesuai dengan aliran darah melalui kapiler-kapiler alveoli. Saat

berolahraga misalnya laju pernapasan akan meningkat, yang menambah pengambilan O_2 dan pembuangan CO_2 diikuti dengan keluaran jantung yang meningkat.

2. Pusat kontrol pernapasan di dalam medulla menetapkan ritme dasar, sementara pusat kontrol di dalam pons mengatur ritme, memuluskan transisi antara inhalasi dan ekshalasi.
1. Saraf-saraf dari pusat control medula mengirimkan impuls ke diafragma dan otot-otot rusuk, merangsang oto-otot itu untuk berkontraksi dan menyebabkan inhalasi.
5. Pada seseorang yang sedang beristirahat, impuls-impuls saraf ini menghasilkan sekitar 10 hingga 14 inhalasi per menit. Diantara dua inhalasi, otot-otot berelaksasi dan orang itu menghembuskan nafas.



3. Sensor-sensor di dalam medula mendeteksi perubahan pada pH (mencerminkan konsentrasi CO_2) darah dan cairan serebrospinal yang merendam permukaan otak.
4. Sensor-sensor pada pembuluh-pembuluh darah utama mendeteksi perubahan pada pH darah dan mengirimkan impuls saraf ke medula. Sebagai responnya, pusat control medulla mengubah laju dan kedalaman pernapasan, keduanya ditingkatkan jika kadar CO_2 naik dan dikurangi jika kadar CO_2 turun.
6. Sensor-sensor lain di dalam aorta dan arteri-arteri carotid memberikan sinyal ke medulla untuk meningkatkan laju pernapasan saat kadar O_2 di dalam darah menjadi amat rendah.

Gambar 1-15 Kontrol Pernapasan pada Manusia (Sumber : Campbell,