

MEKANOELEKTRIK TRANSDUKSI KOKLEA

Faizal Rachman, Nyilo Purnami

Dep/SMF Ilmu Kesehatan Telinga Hidung Tenggorok
Bedah Kepala dan Leher
Fakultas Kedokteran Universitas Airlangga-RSUD Dr. Soetomo Surabaya

PENDAHULUAN

Koklea merupakan organ pendengaran sebagai sumber informasi kedua setelah fungsi penglihatan.¹ Koklea yang terdiri organ sensorik yaitu organ Corti, berperan penting dalam mentransmisi, mengamplifikasi suara, dan menjaga homeostasis telinga bagian dalam. Organ Corti berisikan epitel sensoris untuk pendengaran yaitu sel-sel rambut, bersama dengan sel-sel pendukung, membran tektorial dan membran basilaris akan membuat sebuah kompleks transduksi suara yang dibutuhkan telinga sebagai fungsi pendengaran perifer.²

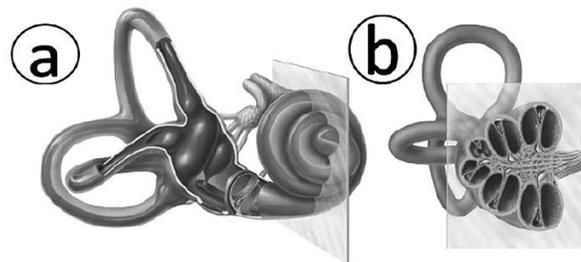
Gangguan pendengaran yang paling umum terjadi di negara maju adalah tuli koklea (*Cochlear hearing loss*). Kerusakan struktur di dalam koklea dapat muncul dalam banyak hal, misalnya dengan adanya paparan suara kuat atau bahan kimia ototoksik, infeksi, gangguan metabolisme, alergi, penyakit autoimun dan faktor genetik. Antara 30% sampai 35% individu usia lebih dari 65 tahun mengalami ketulian dan membutuhkan alat bantu dengar. Sebesar 60% individu usia diatas 70 tahun mengalami gangguan pendengaran 25 dB atau lebih.³

Mekanisme yang terjadi pada telinga dalam sangat kompleks, sehingga penting untuk diketahui. Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk mempelajari struktur anatomi koklea dan mengulas proses mekanoelektrik transduksi koklea, yaitu mengenai bagaimana suara akan diproses oleh koklea dari proses mekanik ke proses transduksi dan potensial elektrik yang terdapat didalamnya, sampai akhirnya menjadi sinyal syaraf yang akan diteruskan ke otak.

1. ANATOMI KOKLEA

Koklea merupakan saluran tulang yang menyerupai cangkang siput dan bergulung $2\frac{3}{4}$

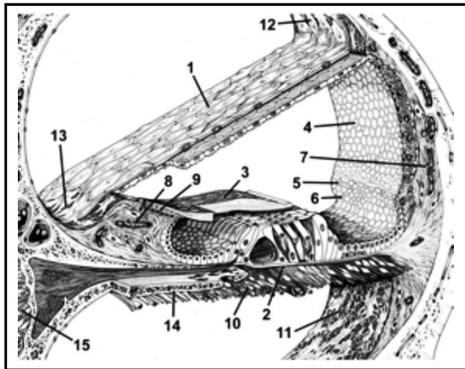
putaran, dengan panjang kurang lebih 35 mm dengan pusatnya yang disebut modiolus (Gambar 1a dan 1b).⁴⁻⁷



Gambar 1. Penampang koklea. a) Koklea, b) Koklea dengan potongan melintang⁴

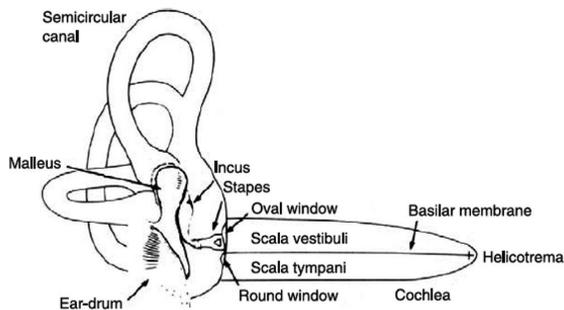
Terbentuknya segitiga dari duktus koklearis dengan sisi dasarnya membentuk batas antara skala media dan skala timpani yaitu membrana basilaris dan lamina spiralis pars osseus termasuk didalamnya sel-sel Claudius, sel-sel Boettcher dan organ Corti. Ligamen spiralis, stria vaskularis, prominensia spiralis dan sulkus eksternal sebagai sisi lateralnya. Dan sisi miringnya adalah membrana Reissner yang membentuk batas antara skala media dan skala vestibuli. Oleh membran Reissner dan membran basilaris, koklea terbagi menjadi 3 ruang yaitu skala vestibuli (atas), skala media (tengah) dan skala timpani (bawah) (gambar 2).^{6,8-10}

Di dalam organ Corti terdapat sel-sel Hensen, sel-sel Deiters, sel-sel pillar, sel-sel batas dalam, sel-sel rambut luar dan sel-sel rambut dalam, sulkus dalam dan limbus spiralis, yang berisi sel-sel interdental dan membrana tektorial. Medial dari lamina spiralis pars osseus terdapat kanalis Rosenthal yang berisi ganglion spiralis dan berhubungan dengan modiolus (gambar 2).^{6,8-10}



Gambar 2. Potongan melintang dari organ koklea
 (1)Membran Reissner, (2)Membran basilaris,
 (3)Membran tektorial, (4)Stria vaskularis,
 (5)Prominensia spiralis, (6)Sel sulkus eksternal,
 (7)Ligamen spiralis, (8)Promenensia spiralis,
 (9)Sel Interdental , (10)Sel mesothelial dari
 membran basilaris, (11)Infrabasilar dari ligamen
 spiralis, (12)Suprastrial dari ligamen spiralis,
 (13)Supraspiral dari ligamen spiralis, (14)Spiral
 lamina pars osseus, (15)Ganglion spiralis.¹⁰

Skala vestibuli dan skala timpani adalah labirin tulang dari koklea yang berisi cairan perilimfe. Skala vestibuli dan skala timpani saling berhubungan di helikotrema pada apeks koklea (gambar 3). Pada bagian basis koklea skala vestibuli berakhir di foramen oval dan skala timpani pada foramen rotundum. Skala Media yang berisikan cairan endolimfe berada diantara skala vestibuli dan skala timpani. ^{6,9,11}



Gambar 3. Skala vestibuli dan skala timpani di koklea⁶

Cairan perilimfe memiliki komposisi ion yang mirip dengan cairan cerebrospinalis (CSF) dan juga mirip dengan cairan ekstraseluler, dengan

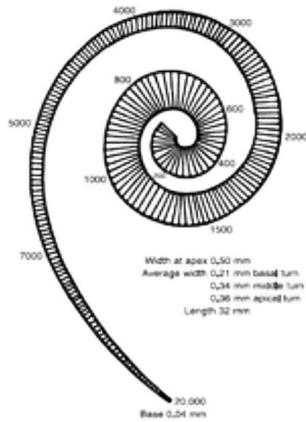
kosentrasi natrium (Na^+) tinggi dan kalium (K^+) rendah. Sedangkan pada endolimfe, memiliki komposisi ionnya yang unik dan tidak ditemukan di bagian tubuh yang lain yaitu kosentrasi natrium (Na^+) rendah dan kalium (K^+) yang tinggi (tabel 1).^{7,8,10,11}

Tabel 1. Komposisi cairan koklea⁷

KOMPONEN	ENDOLIMFE	SKALA VESTIBULI	SKALA TIMPANI
Na (mM)	1,3	141	148
K (mM)	157	6	4,2
Ca (mM)	0,023	0,6	1,3
HCO_3 (mM)	31	21	21
Cl (mM)	132	121	119
Protein (mg/dl)	38	242	178
pH (unit)	7,4	7,3	7,3

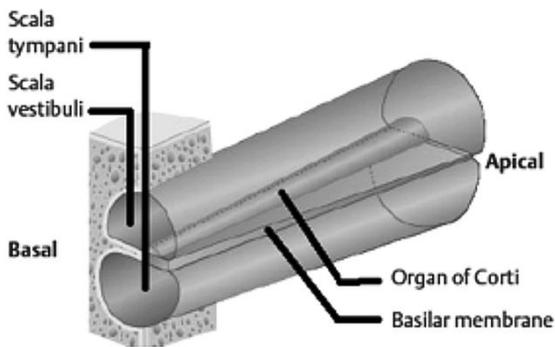
Stria vaskularis terdiri dari 3 lapisan sel yaitu sel marginal, sel intermediet, dan sel basal.^{2,10} Sel-sel stria vaskularis merupakan satu-satunya sel yang berhubungan dengan pembuluh darah di koklea. Stria vaskularis bertanggung jawab dalam menjaga konsentrasi ion kalium dalam cairan endolimfe tetap tinggi dan menjaga potensial endolimfe skala media positif tetap tinggi.^{2,10} Gangguan pada stria vaskularis dapat mengakibatkan ketulian dan ketidakseimbangan cairan.

Membran basilaris adalah struktur fibrosa yang berlapis-lapis dari lamina spiral pars osseus ke ligamen spiral.^{2,10} Elastitas membran basilaris bervariasi di sepanjang koklea dari kekakuan dan kelebihannya. Membran basilaris tampak kaku dan sempit di daerah basis koklea dan tampak lebih fleksibel dan luas di daerah apeks koklea (gambar 4).^{2,10,12} Membran basilaris 100 kali lebih kaku di dekat stapes daripada di daerah helikotrema.¹³ Sehingga dengan sifat elastis seperti itu maka suara dengan frekuensi tinggi akan dikodekan di basal dan suara dengan frekuensi rendah akan dikodekan di apeks.^{9,10}



Gambar 4. Lebar membran basilaris dari basal ke apeks¹²

Organ Corti ini merupakan rumah dari sel sensoris pendengaran.² Organ Corti ini terletak di sepanjang membran basilaris, dan menonjol dari basis ke apeks koklea.⁵ Ukuran organ Corti bervariasi secara bertahap dari basis koklea ke apeks koklea (gambar 5).⁸ Organ Corti di basal lebih kecil sedangkan organ Corti di apeks koklea lebih besar.^{8,10} Organ Corti terdapat sel-sel yang terdiri dari sel sensoris (sel rambut dalam dan sel rambut luar), sel pendukung (sel Deiter, sel Phalangeal dalam), ujung syaraf eferen (ganglion spiral tipe 1 dan 2) dan eferen (olivocochlear medial dan lateral), sel pilar dalam dan luar, dan sel Hensen.⁸⁻¹⁰

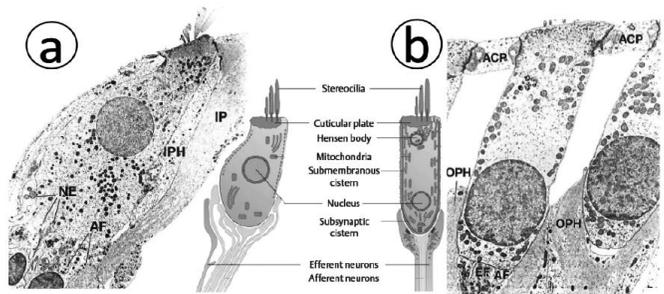


Gambar 5. Membran basilaris dan organ Corti⁸

Sel rambut merupakan sel sensoris yang menghasilkan impuls saraf dalam menanggapi getaran membran basilaris. Di organ Corti terdapat 1 deret sel rambut dalam dan 3 deret sel rambut luar. Ada sekitar 4000 sel rambut dalam dan 12000 sel rambut luar (gambar 7a).^{2,10} Bentuk dari sel rambut

dalam seperti botol dan ujung syarafnya berbentuk piala yang menyelubunginya, sedangkan bentuk dari sel rambut luar seperti silinder dan ujung syarafnya hanya pada basis sel (gambar 6a dan 6b).^{2,8}

Badan sel dari kedua sel rambut ini berisikan banyak vesikula dan mitokondria dan didinding lateralnya terdapat semacam protein membran yang dikenal sebagai *prestin* sebagai motor sel. Selain itu pada badan sel rambut terdapat retikulum endoplasma (ER) yang terorganisasi dan khusus di sepanjang dinding lateralnya yaitu *apical cistern*, *Hensen body*, *subsurface cistern*, dan *subs synaptic cistern* (gambar 6a dan 6b).² Sekitar 90-95% dendrit neuron ganglion spiralis (akson aferen) menginervasi sel rambut dalam, dan 5-10% menginervasi sel rambut luar. Sebaliknya akson eferen sebagian besar mensarafi sel rambut luar.^{8,10}

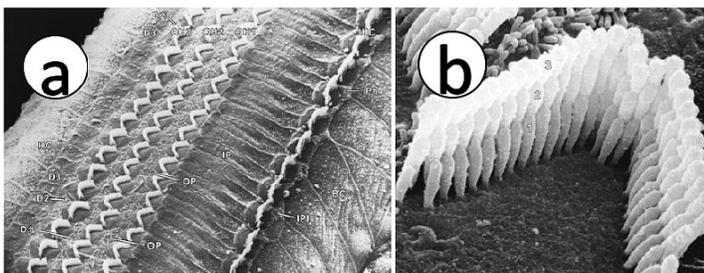


Gambar 6. Sel rambut. a) Sel rambut dalam, b) Sel rambut luar^{2,8}

Sel rambut dalam dan luar ini memegang peranan penting pada perubahan energi mekanik menjadi energi listrik. Fungsi sel rambut dalam sebagai mekanoreseptor utama yang mengirimkan sinyal syaraf ke neuron pendengaran ganglion spiral dan pusat pendengaran, sedangkan fungsi sel rambut luar adalah meningkatkan atau mempertajam puncak gelombang berjalan dengan meningkatkan aktivitas membran basilaris pada frekuensi tertentu. Peningkatan gerakan ini disebut cochlear amplifier yang memberikan kemampuan sangat baik pada telinga untuk menyeleksi frekuensi, telinga menjadi sensitif dan mampu mendeteksi suara yang lemah.¹⁰ Adanya proses cochlear amplifier tersebut didukung oleh fenomena

emisi akustik yaitu bila telinga diberikan rangsangan akustik yang dapat memberikan pantulan energi yang lebih besar dari rangsangan yang diberikan, faktor yang memberi kontribusi pada cochlear amplifier gerakan sel rambut luar, sifat mekanik stereosillia, dan membran tektorial.^{6,8,10}

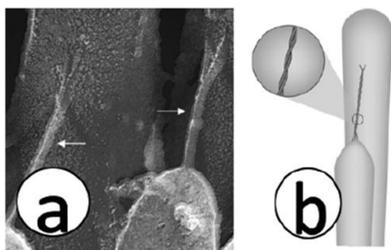
Ujung dari sel rambut terdapat berkas serabut aktin yang membentuk pipa dan masuk ke dalam lapisan kutikuler (stereosillia).² Stereosillia dari sel rambut dalam tidak melekat pada membran tektorial dan berbentuk huruf U sedangkan stereosillia dari sel rambut luar kuat melekat pada membran tektorial atasnya dan berbentuk huruf W (gambar 7b).²



Gambar 7. Sel rambut dan stereosillia.

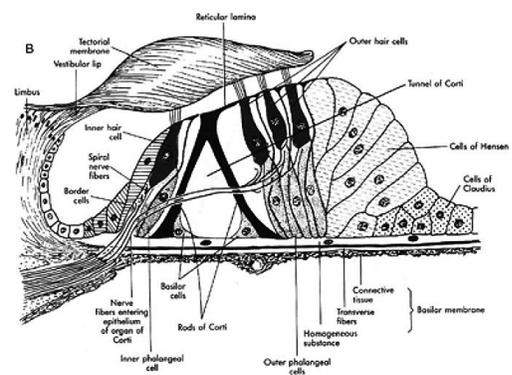
a) Sel rambut dalam dan sel rambut luar dilihat dengan mikroskop elektron, b) Stereosillia sel rambut luar dilihat dengan mikroskop elektron²

Pada bagian ujung dari stereosillia terdapat filamen aktin yang terpilin, filamen tersebut nantinya akan dikenal sebagai *tip link*.^{10,13} *Tip link* menghubungkan ujung stereosillia dengan ujung stereosillia yang lain. Bagian basal dari sel rambut diliputi oleh dendrit dari neuron ganglionik spiral yang terletak pada bagian modiolus (gambar 8a dan 8b).^{10,13}



Gambar 8a. *Tip link* dilihat dengan mikroskop elektron¹⁰ Gambar 8b. *Tip link*¹⁰

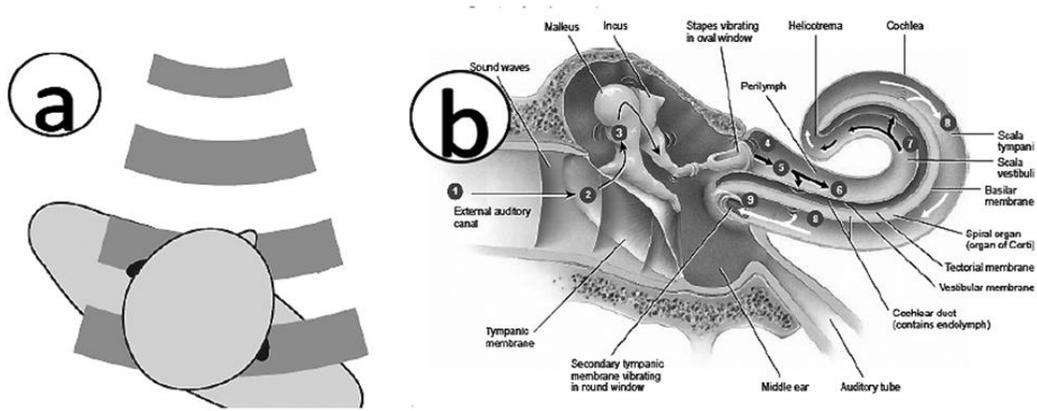
Selain sel rambut dalam dan luar, komponen utama organ Corti yang lain adalah 3 lapis penyokong (sel Deiters, Hensen, Claudius). Membran tektorial, dan kompleks lamina retikularis lempeng kutikular.² Sel-sel pendukung yang mengelilingi sel rambut luar adalah sel Dieter dan sel pilar luar. Sel pilar luar berada di sisi modiolar dari sel rambut luar baris pertama dan diantara sel rambut luar baris pertama dengan kedua. Sel Dieter berada di antara sel rambut luar baris dua dengan tiga dan disisi lateral dari sel rambut luar baris tiga. Gabungan dari sel rambut luar dengan sel Dieter dan sel pilar luar menciptakan sebuah penghalang yang kuat antara endolimfe dan perilymfe (gambar 9).^{2,7,10}



Gambar 9. Sel-sel pada organ Corti⁷

Sel pilar luar dan dalam membentuk terowongan Corti, yang memisahkan wilayah sel rambut dalam dan wilayah sel rambut luar. Sel pilar luar dan dalam merupakan sel-sel struktural utama organ Corti yang diisi dengan mikrofilamen dan mikrotubulus (gambar 9).^{2,7}

Membran tektorial adalah struktur seperti gel yang terdiri dari kolagen, protein, dan glukosaminoglikan. Membran tektorial terletak di dekat permukaan lamina retikuler dari organ Corti. Membran tektorial kontak langsung dengan sel rambut luar. Sedangkan untuk sel rambut dalam tidak berkontak secara langsung dengan membran tektorial. Meskipun membran tektorial bukan bagian dari organ Corti, tapi membran tektorial memainkan peran penting dalam fungsi organ Corti.⁶



Gambar 10a. Sumber suara menuju ke kepala⁵
 Gambar 10b. Transmisi suara ke koklea¹⁴

2. TRANSMISI SUARA

Sebelum membahas mekanoelektrik transduksi koklea perlu diketahui tentang bagaimana suara mencapai koklea. Suara terjadi karena adanya sumber suara, media penghantar gelombang suara serta adanya reseptor penerima informasi tersebut.⁵ Suara datang dari sumber akan berjalan secara longitudinal dan menyebar ke segala arah (gambar 10a), sedangkan pada media penghantar gelombang suara di udara akan lebih cepat daripada melalui media air, karena kecepatan penghantaran suara bervariasi tergantung jenis medianya.⁵ Karena itu dalam proses pendengaran terdapat istilah *impedance*.² *Impedance* adalah proses perambatan suara antara dua medium yang berbeda seperti dari udara menuju ke medium yang lebih padat seperti tulang atau air.¹⁴

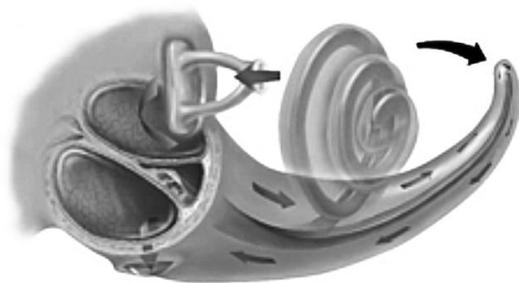
Suara akan ditangkap serta dihimpun aurikula kemudian diarahkan oleh meatus akustikus eksternus sampai mengetarkan membran timpani lalu dikonduksikan osikel tulang pendengaran dari maleus, inkus, stapes. Selanjutnya kaki dari stapes bergerak ke arah dalam membran foramen oval dan membuat foramen rotundum menonjol keluar.^{6,15,7} Dan dari membran timpani ke tulang pendengaran terjadi proses amplifikasi suara atau terjadi refleksi timpani. Fungsi dari organ telinga luar dan tengah adalah untuk meneruskan energi akustik dari luar ke cairan limfe didalam koklea dan juga memproses energi tersebut sebelum memasuki koklea (gambar 10b).^{6,7,8,14}

Sebagian kecil suara dikonduksikan melalui tulang kepala dan diteruskan langsung menuju koklea, tetapi biasanya telinga jauh lebih sensitif menerima udara melalui udara. Dalam keadaan abnormal tertentu, pada kasus tuli konduksi, pasien mendengar dominan dengan konduksi tulang daripada dengan konduksi udara.^{5,15}

**3. MEKANOELEKTRIK
 TRANSDUKSI KOKLEA**

3.1 Proses Mekanik Di Koklea

Energi hasil dari pergerakan stapes pada foramen oval adalah mendorong cairan perilimfe skala vestibuli, kemudian ke membran Reissner dan cairan endolimfe skala media, sehingga akan menimbulkan pergerakan membran basilaris.^{6,7,15} Stimulasi tersebut yang bergerak sepanjang membran basilaris dalam bentuk *traveling wave* (gambar 11).^{6,10,16}

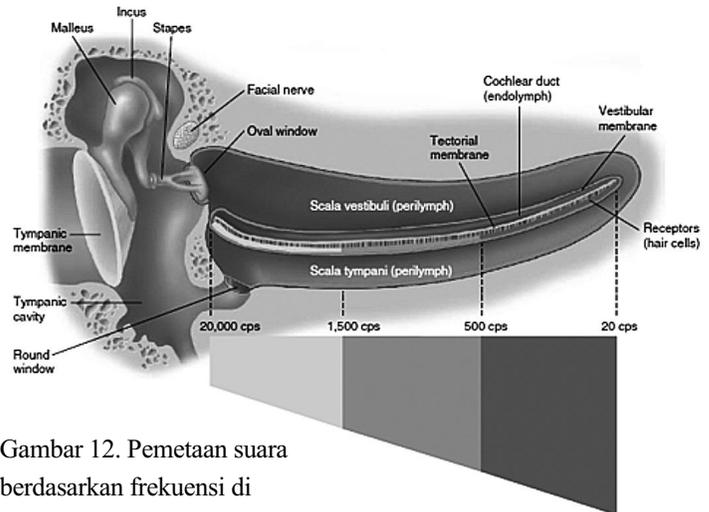


Gambar 11. Arah gerakan cairan perilimfe yang diakibatkan oleh gerakan stapes di foramen oval¹⁶

Pergerakan membran basilaris atau dari cairan perilimfe skala vestibuler akan mengerjakan cairan perilimfe skala timpani diteruskan sampai ke foramen rotundum sehingga akhirnya membuat foramen rotundum menonjol keluar.^{5,7,15}

Gelombang suara dari berbagai frekuensi akan menyebabkan daerah tertentu dari membran basilaris bergetar lebih kuat dari daerah lainnya. Setiap segmen dari membran basilaris disetel untuk frekuensi tertentu. Karena membran basilaris lebih sempit dan kaku di basal koklea (bagian yang lebih dekat dengan foramen oval) ,suara dengan frekuensi tinggi (sekitar 20.000 Hz) membuat *traveling wave* dengan puncak maksimal dan mengetarkan maksimal di wilayah basal koklea. Sedangkan di membran basilaris pada apeks koklea (dekat dengan helikotrema) tampak lebih luas dan lebih fleksibel sehingga suara dengan frekuensi rendah (sekitar 20Hz) membuat *traveling wave* dengan puncak maksimal dan mengetarkan maksimal di wilayah apeks koklea.^{10,14-16} Membran basilaris terdapat pemetaan suara yang rapi berdasarkan frekuensi. Suara dengan frekuensi tinggi mengetarkan bagian pangkal dan suara dengan frekuensi lebih rendah mengetarkan bagian ujung (gambar 12) .^{10,14-16}

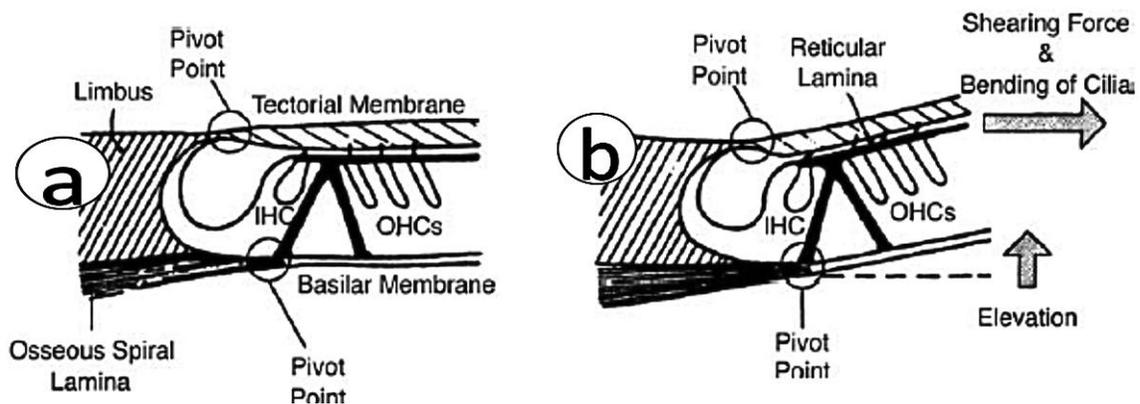
Pergerakan membran basilaris naik turun akan menimbulkan gerakan relatif (pergeseran) terhadap membran tektoria dan hal ini dikarenakan kedua membran tersebut mempunyai titik sumbu



Gambar 12. Pemetaan suara berdasarkan frekuensi di membran basilaris¹⁶

rotasi yang berbeda. Titik rotasinya membran basilaris adalah di bagian bawah lamina spiralis osseous, sedangkan titik rotasinya membran tektorial adalah di bibir atas dari limbus. Sebagai hasilnya, dengan sumbu rotasi berbeda untuk kedua membran maka pergerakan pada kedua membran akan terjadi gaya geser pada stereosilia sehingga menghasilkan impuls saraf (potensial reseptor).^{11,13}

Pada gambar 13a menunjukkan posisi relatif dari membran basilaris dan membran tektorial saat istirahat, dan gambar 13b menunjukkan posisi relatif dari kedua membran tersebut ketika media skala yang dibelokkan ke atas menuju skala vestibuli. Seandainya kedua membran tersebut adalah papan kaku dengan titik sumbu rotasi yang berbeda maka gerakan kedua membran tersebut akan menghasilkan gaya geser

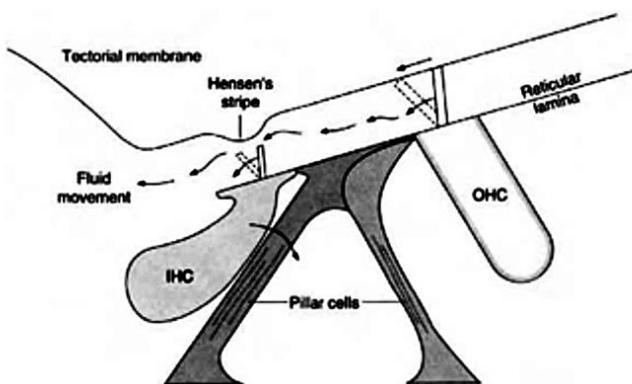


Gambar 13a. Sumbu rotasi membran tektorial dengan membran basilaris¹³

Gambar 13b. Sumbu rotasi kedua membran saat fase depolarisasi¹³

stereosillia sel rambut. Depolarisasi sel rambut terjadi ketika membran basilaris bergerak ke atas (ke arah skala vestibuli), stereosillia menekuk keluar (jauh dari modiulus).^{11,13}

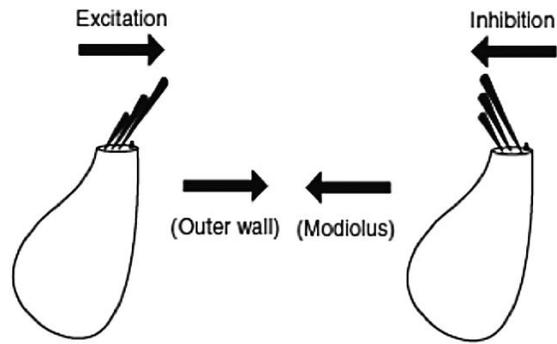
Stereosillia sel rambut luar kuat melekat pada membran tektorial atasnya, sedangkan stereosillia sel rambut dalam tidak melekat pada membran tektorial tapi hanya sebatas menyentuh saja.^{2,6,13} Perbedaan tersebut menyebabkan defleksi pada kedua sel rambut ini akan berbeda juga. Penyebab defleksinya sel rambut luar adalah karena pergerakan relatif membran retikuler dengan membran tektorial, sedangkan defleksinya sel rambut dalam terjadi karena aliran cairan endolimfe yang diakibatkan dari pergerakan membran basilaris atau pergerakan dari stereosillia sel rambut luar (gambar 14).^{6,11,13}



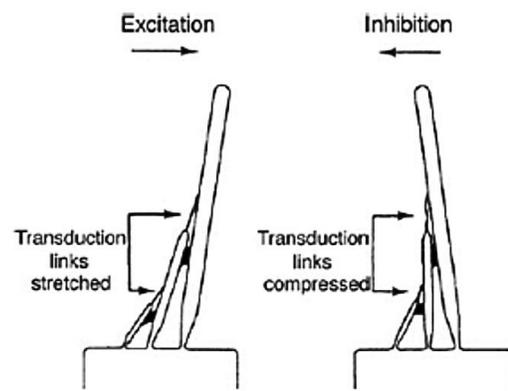
Gambar 14. Pergerakan stereosillia sel rambut dalam dan luar⁶

Arah gerakan stereosillia di fase depolarisasi adalah stereosillia yang pendek menuju ke arah stereosillia yang paling tinggi, dan ke arah menjauhi modiulus.^{11,13} Sedangkan arah gerakan stereosillia di fase hiperpolarisasi adalah dari stereosillia yang rendah menjauhi stereosillia yang paling tinggi dan ke arah mendekati modiulus (gambar 15).^{11,13}

Ujung dari stereosillia terdapat filamen halus yang disebut dengan *tip link*, filamen halus ini menghubungkan ujung stereosillia dengan yang lain. Bila saat sel rambut defleksi ke arah menjauhi modiulus (eksitasi), *tip link* akan meregang. Peregangan inilah nantinya akan membuka saluran pada bagian atas stereosillia yang akan dikenal



sebagai saluran transduksi mekanoelektrik (MET), dan sebaliknya bila saat sel rambut defleksi ke arah mendekati modiulus (inhibisi), *tip link* akan mengendur dan membuat saluran MET tertutup (gambar 16).^{7,10,13}

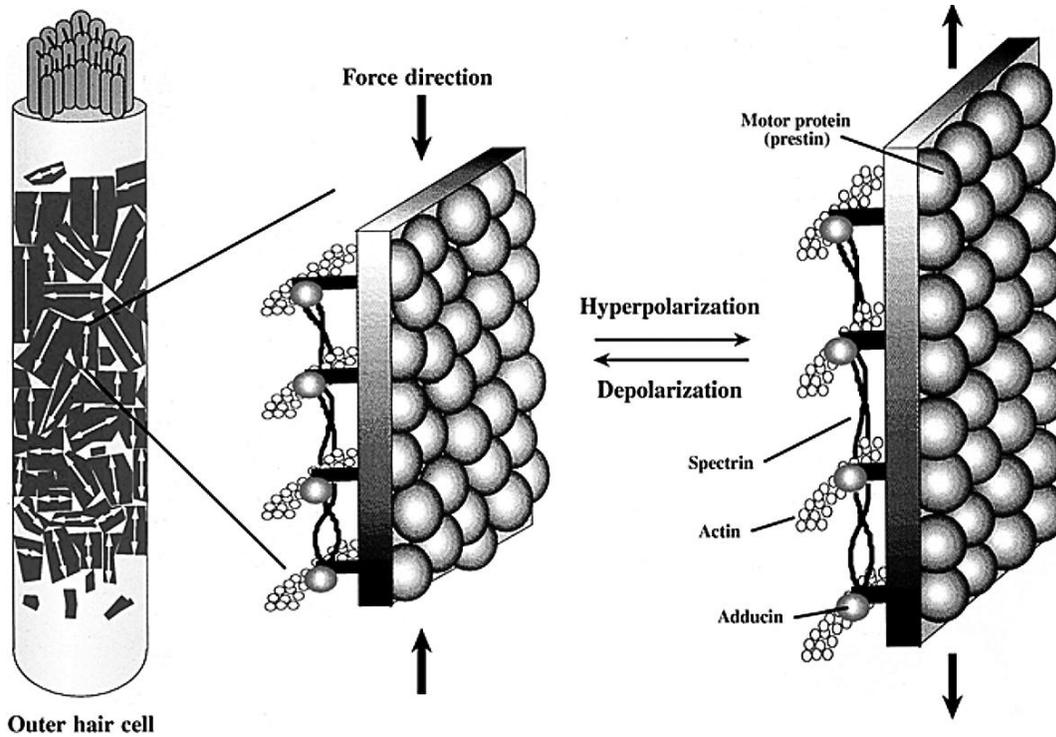


Gambar 16. *Tip link* saat depolarisasi dan hiperpolarisasi¹³

3.2 Proses Transduksi di Koklea

Proses transduksi adalah proses konversi dari suatu bentuk energi menjadi bentuk energi lain.⁷ Pada koklea proses transduksi terjadi pada sel rambut dalam dimana energi mekanis (getaran) diubah menjadi energi elektrokimia yaitu potensial membran atau potensial aksi.¹²

Gerakan membran basilaris ke atas akan membengkokkan stereosillia ke arah stereosillia yang lebih tinggi pada fase depolarisasi mengakibatkan terjadinya peregangan pada serabut *tip link* di puncak stereosillia. Ketika *tip link* meregang langsung membuka saluran MET pada membran stereosillia dan menimbulkan aliran arus K⁺ ke dalam sel sensoris. Aliran kalium timbul karena terdapat perbedaan potensial endokoklea +80mV dan potensial intraseluler negatif pada sel rambut, sel



Gambar 17. Prestin (protein membran) memendek saat depolarisasi dan memanjang saat hiperpolarisasi¹⁰

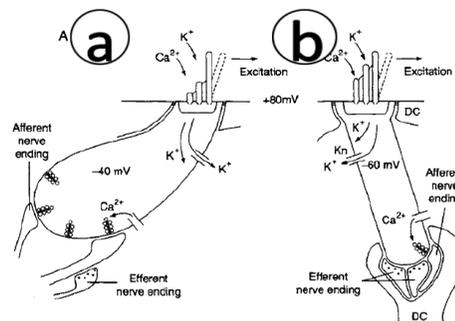
rambut dalam -40mV dan sel rambut luar -70mV. Hal tersebut menghasilkan depolarisasi intraseluler yang menyebabkan kation termasuk kalium dan kalsium mengalir ke dalam sel rambut.⁵ Masuknya ion K akan mengubah potensial listrik dalam sel rambut dan mendepolarisasi sel, pada akhirnya sel rambut memendek dengan mempengaruhi motor sel rambut luar (*prestin*) (gambar 17).¹⁰

Dan ketika membran basilaris bergerak turun, stereosillia membengkok ke arah stereosillia yang terpendek pada fase hiperpolarisasi mengakibatkan terjadinya pengenduran pada serabut *tip link* di puncak stereosillia maka saluran MET akan tertutup. Bila stereosilia tegak lurus, pembukaan saluran MET tak akan berpengaruh. *Tip link* ini seperti saluran elastis yang bisa mengendalikan buka tutupnya saluran MET.¹⁶

Saluran K-Ca diaktifkan dan mencegah untuk depolarisasi. Ca²⁺ masuk dan K⁺ keluar, dengan masuknya Ca terjadi pelepasan neurotransmitter kimia dari vesikula sinapstik di dasar sel dan ditangkap oleh reseptor aferen saraf koklearis.¹⁰ Serat-serat pendengaran merespon neurotransmitter dengan menghasilkan potensial aksi, lonjakan arus listrik merambat, diteruskan dari

serabut saraf koklearis menuju nukleus koklearis dalam sekian detik dan itu diterjemahkan oleh otak, sehingga dalam pengertian kita sebut dengar.

Ion K keluar dari sel rambut luar ke dalam ruang ekstraseluler disekitar sel rambut luar kemudian masuk ke sel pendukung. Rangsangan suara diubah menjadi getaran membran basilaris, dan mengarahkan pada pembukaan dan penutupan saluran MET pada stereosillia kemudian menghasilkan respon elektrokimia dan akhirnya akan memrepresentasikan suara pada saraf pendengaran (gambar 18a dan 18b).



Gambar 18a. Proses transduksi di sel rambut dalam⁶

Gambar 18b. Proses transduksi di sel rambut luar

3.3 Potensial elektrik

Di Koklea

Potensial elektrik di koklea yang dapat direkam ada 3 jenis:¹²

3.3.1 Potensial endokoklea

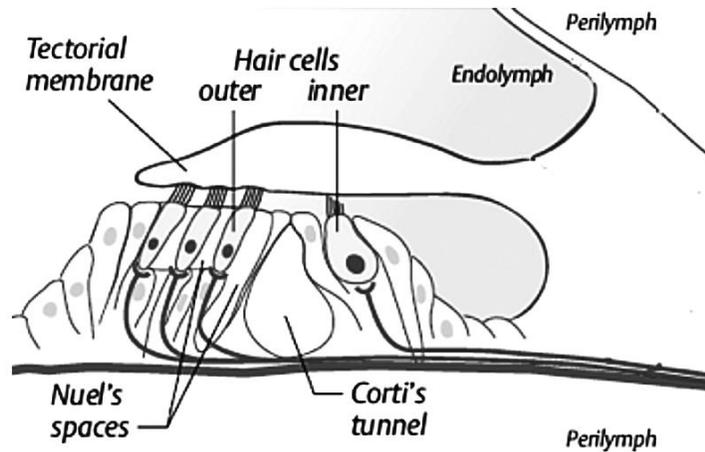
Diketahui bahwa stereosillia terletak di skala media (ruangan cairan endolimfe) sedangkan dasar dari sel rambut terletak di skala timpani (ruangan cairan perilimfe) (gambar 19).

Komposisi ion cairan endolimfe dan perilimfe berbeda. Cairan endolimfe memiliki potensial sekitar 80-110mV sedangkan cairan perilimfe memiliki potensial 0mV (gambar 20).^{2,5,11,13}

Potensial endolimfe diperlukan untuk menjaga sensitifitas sel rambut dan stria vaskular berperan penting dalam menjaga lingkungan listrik dalam organ Corti.^{5,6} Perbedaan potensial dari cairan perilimfe dan endolimfe inilah yang disebut sebagai potensial endokoklea.^{9,11} Potensial endokoklea merupakan potensial arus searah dan saat istirahat atau saat tidak adanya stimulus suara yang masuk ke koklea.^{2,5,11,13}

Pada tahun 1952, Bekesy mengukur potensial istirahat koklea marmut dengan memasukkan elektroda ke dalam perilimfe skala vestibuli (yang ditetapkan sebagai acuan 0mV), kemudian maju ke bawah melalui skala media dan organ Corti. Didalam skala media ditemukan potensial istirahat sebesar +50 sampai +80 mV, sedangkan di dalam organ Corti tegangan turun dari sekitar +50 sampai -50mV, dan kemudian menjadi 0mV ketika elektroda melewati membran basilaris menuju ke skala timpani.^{2,15}

Potensial sel rambut luar sekitar -70mV dan potensial rambut dalam sekitar -40mV, beda potensial sel rambut dengan cairan endolimfe sekitar 150-180mV untuk sel rambut luar dan 120-150mV untuk sel rambut dalam (gambar 20). Pada tahun 1954 Tasaki mengukur potensial istirahat negatif dari sekitar -60 ke -70 mV di organ Corti, yang merupakan potensial dari sel-sel rambut.¹³



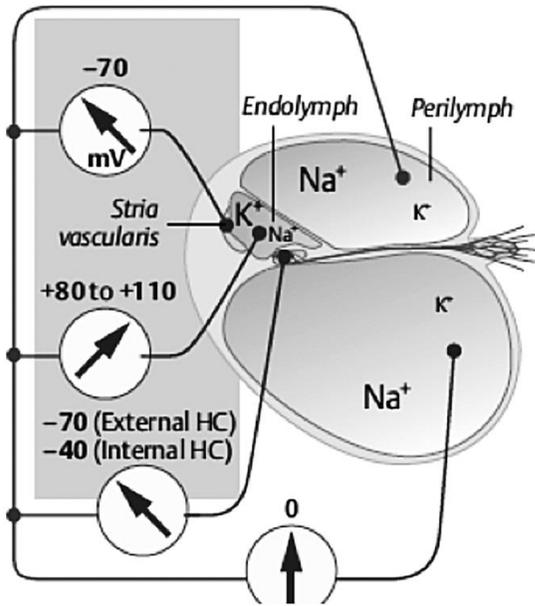
Gambar 19. Dasar sel rambut berada di ruang perilimfe dan stereosillia di ruang endolimfe⁵

3.3.2 Koklear mikrofonik

Disaat saluran MET di membran stereosillia terbuka, potensial endolimfe akan masuk ke dalam sel rambut dan mengubah potensial listrik di dalam sel rambut.^{11,13} Bila dilakukan pengukuran dengan elektroda pada koklea pada saat terjadi perangsangan suara maka akan tercatat adanya suatu arus potensial listrik bolak balik. Arus potensial listrik bolak balik inilah yang disebut sebagai koklea mikrofonik, potensial tersebut dihasilkan terutama oleh sel rambut luar (gambar 20).^{5,11,13}

Pada tahun 1930 Wever dan Bray menemukan potensial listrik AC didekat saraf yang ditangkap oleh elektroda dan ditemukan bahwa respon kuat di foramen rotundum daripada di saraf, dan masih ditemukan walaupun saraf hancur atau dibius. Temuan tersebut menunjukkan bahwa potensial AC yang dihasilkan oleh koklea disebut sebagai koklea mikrofonik.

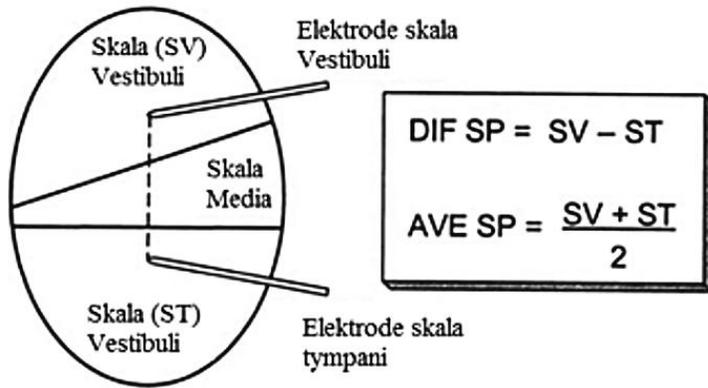
Hubungan antara sel-sel rambut dengan koklear mikrofonik adalah koklear mikrofonik dihasilkan oleh defleksi membran basilaris dan ujung stereosillia.



Gambar 20. Potensial listrik di dalam koklea⁵

3.3.3 Potensial tambahan

Potensial yang lain berupa potensial arus searah yang disebut dengan potensial tambahan yang menyebabkan skala media bisa menjadi lebih positif atau lebih negatif yang terjadi disaat stimulus suara masuk ke koklea.¹³



Gambar 21. Percobaan Honrubia dan Ward.¹³

Pada tahun 1950, Davis, Fernandez, McAuliffe dan Bekesy menjelaskan tentang potensial tambahan bahwa potensial tambahan merupakan potensial searah (DC) yang berbeda

dengan koklea mikrofonik, potensial tambahan ini dikaitkan dengan pergerakan *traveling wave* dan bagaimana potensi dicatat. Seperti koklea mikrofonik, potensial tambahan ini merupakan potensial yang nilai besar berdasarkan besar tingkat stimulusnya.¹³

Pada tahun 1969, Honrubia dan Ward mengukur potensial tambahan secara simultan di setiap bagian koklea marmut dengan menggunakan elektroda. Elektroda pertama di skala vestibuli (SV) dan elektroda kedua di skala timpani (ST). Dengan mengurangi potensial skala timpani dan skala vestibuli, mendapat nilai perbedaan potensial di koklea (DIF). Rata-rata potensial (AVE) yang diperoleh dari rata-rata penjumlahan potensial di kedua (gambar 21).

Hasilnya dari pengukuran tersebut ditemukan bahwa perbedaan potensial (DIF) menjadi positif di sisi basal pergerakan membran basilaris dan menjadi negatif pada sisi apeksnya. Rata-rata potensial (AVE) ditemukan positif hanya di sekitar puncak *travelling wave* dan negatif di selain puncak *travelling wave* (gambar 22).¹³

RINGKASAN

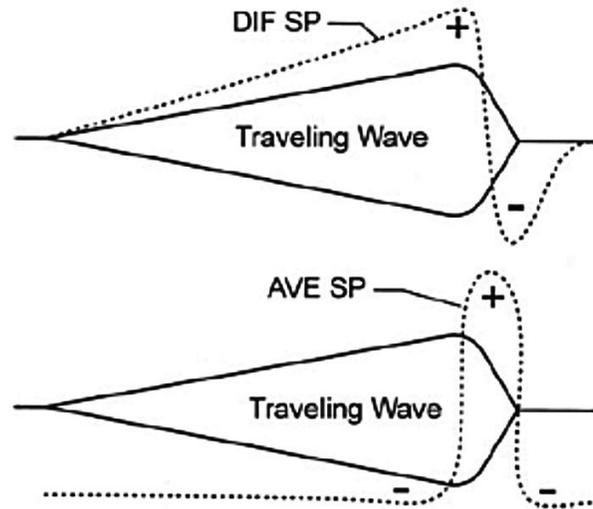
Suara yang masuk ke koklea akhirnya berubah menjadi gelombang cairan perilimfe skala vestibuli akibat dari pergerakan stapes pada foramen oval. Gerakan stapes mendorong cairan perilimfe skala vestibuli ke membran Reissner dan cairan endolimfe skala media, sehingga menimbulkan pergerakan membran basilaris dan defleksi stereosillia.

Defleksi stereosillia adalah kunci penting dalam proses transduksi mekanik sel rambut. Ketika membran basilaris bergerak ke atas maka stereosillia akan terdorong ke arah kinosillia dan mengaktifkan *tip link* untuk membuka saluran mekanoelektrik transduksi (MET channel) pada ujung stereosillia.

Perbedaan potensial yang terjadi pada cairan endolimfe dengan sel rambut membuat kation di endolimfe (ion K⁺) masuk ke sitosol sel rambut dan menyebabkan depolarisasi. Depolarisasi

cepat menyebar di sepanjang plasma membran, membuka saluran Ca^{2+} di dasar sel rambut. Masuknya Ca^{2+} memicu eksositosis vesikel berisi neurotransmitter, merangsang sabut saraf aferen.

Ada 3 jenis potensial yang terekam pada koklea yaitu potensial endokoklea, koklear mikrofonik dan potensial tambahan. Potensial endokoklea disaat tidak ada stimulus suara yang masuk atau saat istirahat, potensial arus yang searah yang dikarenakan adanya perbedaan potensial cairan endolimfe dengan perilimfe sebesar positif 80-110mV. Koklear mikrofonik dan penambahan potensial terjadi disaat adanya stimulus suara yang masuk ke koklea. Koklear mikrofonik potensial arus bolak balik (AC), timbul dikarenakan potensial endolimfe masuk ke dalam sel rambut dan akhirnya merubah potensial intraseluler sel rambut. Sedangkan pada potensial tambahan adalah potensial yang searah bisa hasilnya negatif dan positif dan tergantung pada pergerakan membran basilaris.



Gambar. 22. Hasil dari percobaan Honrubia dan Ward.¹³

DAFTAR PUSTAKA

1. Lim DJ. Ultrastructural anatomy of the cochlea. In : Water TRVD, Staecker H,eds. Otolaryngology basic science and clinical review.New York : Thieme,2006;313-25
2. Pawlowski KS. Anatomy and physiology of the cochlea. In : Roland PS, Rutka JA,eds. Ototoxicity.Hamilton : BC Decker Inc,2004;1-15
3. Moore BCJ. Physiological aspects of cochlear hearing loss. In : Moore BCJ,ed. Cochlear hearing loss.2nd ed.West Sussex : John Wiley & Sons Ltd,2007;1
4. Shier D.Somatic and spesial senses. In:Shier D,Butler J,Lewis R,eds.Hole's essentials of human anatomy and physiology.9th ed.McGraw-Hill : Columbus,2005;468-78
5. Despopoulos A, Silbernagl S. Central nervous system and senses. In: Despopoulos A, Silbernagl S,eds. Color atlas of physiology.6th ed.New York : Thieme,2008;368-76
6. Møller AR.Hearing. In : Møller AR,ed.Sensory systems anatomy and physiology. California : Elsevier Science,2003;272-304
7. Keener J, Sneyd J.The inner ear. In : Keener J, Sneyd J,eds. Mathematical physiology. 2nd ed.New York : Springer,2009;943-60
8. Tortora GJ, Derrickson B.The special senses. In : Tortora GJ, Derrickson B,eds.Principles of anatomy and physiology.12th ed.Hoboken : John Wiley & Sons inc ,2009;620-7
9. Guyton AC,Hall JE.The sense of hearing. In Guyton AC,Hall JE,eds.Textbook of medical physiology.11th ed.Philadelphia:Elsevier Saunders,2006;652-7
10. Gillespie PG. Hair cell function. In : Water TRVD, Staecker H,eds. Otolaryngology basic science and clinical review.New York : Thieme,2006;332-8
11. Lonsbury-Martin BL,Martin GK,Luebke AE. Physiology of the audiotory and vestibular systems. In : Snow JB, Ballenger JJ,eds.Ballenger's Otorhinolaryngology Head & Neck Surgery.16th ed.Hamilton : BC Decker ,2003;75-81
12. Dhingra PL.Peripheral receptors and physiology of auditory and vestibular systems. In:Dhingra PL,ed.Diseases of ear nose and throat.4th ed. Elsevier health sciences : New Dehli,2006;14-17
13. Gelfand SA.Cochlear mechanisms and processes. In Gelfand SA,ed. Hearing an introduction to psychological and physiological acoustics.5th ed.London : Informa healthcare,2010;72-86
14. Hersh MA, Johnson MA.Anatomy and physiology of hearing, hearing impairment and treatment. In :Hersh MA, Johnson MA,eds. Assistive technology for the hearing-impaired, deaf and deafblind.Springer Verlag : London,2003;1-27
15. Møller AR.Physiology of the ear and the auditory nervous system. In : Jackler RK, Brackmann DE,eds. Neurotology.2nd ed.Philadelphia : Elsevier Mosby,2005;52-7
16. Liberman MC.Auditory processing in sensorineural hearing loss. In : Water TRVD, Staecker H,eds. Otolaryngology basic science and clinical review.New York : Thieme,2006;340-2