

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Telinga merupakan organ yang sangat sensitif terutama pada suara dengan intensitas tinggi. Suara berintensitas tinggi yang menimbulkan kerusakan pada pendengaran biasanya berasal dari suara tembakan senjata atau ledakan. Makin tinggi intensitasnya, makin besar kerusakan yang terjadi pada telinga.¹ Ledakan tersebut menyebabkan trauma akustik akibat intensitas suara yang melampaui batas ambang elastisitas alat pendengaran perifer (≥ 130 desibel/dB). Gangguan pendengaran pada trauma akustik berupa tuli sensorineural berat yang sukar disembuhkan.^{2,3}

Saat ini terdapat 1,5 miliar orang yang mengalami gangguan dengar (20% dari populasi dunia) dan akan meningkat menjadi 2,5 miliar di tahun 2050. Indonesia menempati peringkat ke-4 di Asia Tenggara untuk angka ketulian tertinggi setelah Sri Lanka, Myanmar, dan India.⁴ Berdasarkan Riskesdas 2013 prevalensi gangguan pendengaran di Indonesia sebesar 2,6% dari seluruh penduduk Indonesia.⁵ Gangguan pendengaran akibat bising (GPAB) adalah penyebab gangguan dengar sensorineural kedua terbanyak setelah presbikusis, mengenai 5% dari populasi global, sebagian besar laki-laki, dan 16% terjadi karena pekerjaan. Gangguan dengar merupakan penyakit akibat kerja yang terbanyak.⁴

Trauma akustik umum dialami oleh personel militer.⁶ Angka kejadian trauma akustik di Pusat Pendidikan Artileri Medan Tentara Nasional Indonesia-Angkatan Darat (Pusdik Armed TNI-AD) sebesar 23,5%.⁷ Pusdik Armed TNI-AD adalah institusi pencetak prajurit Armed yang menggunakan senjata meriam Howitzer 105 sebagai sarana latihan siswa sejak tahun 1985 sampai sekarang, dengan frekuensi latihan 3-4 kali per tahun. Latihan

menembak meriam umumnya dilaksanakan pada akhir siklus pendidikan selama 2-4 hari dengan lama latihan selama 6-8 jam per hari. Pada saat menembak meriam, para prajurit berada pada jarak ± 1 meter, sedangkan pelatih berada pada jarak $\pm 1-5$ meter di samping meriam. Jumlah tembakan meriam yang dilakukan prajurit berkisar 2-10 kali tembakan per meriam.⁷

Hasil pengukuran intensitas suara meriam Howitzer 105 adalah 183 dB dan tekanan suara meriam di Pusdik Armed TNI-AD sebesar 148,6 dBA dengan waktu meluruh sampai 60 dBA sekitar 2 detik.^{7,8} *U.S Departemen of Health and Human Service, Public Health Service, Center for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health* menentukan tekanan suara 130-140 dB hanya boleh terpapar kurang dari 1 detik.^{9,10} Berdasarkan Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi No.5 tahun 2018, Nilai Ambang Batas (NAB) kebisingan adalah 85 desibel dengan lama paparan 8 jam dan lama paparan untuk intensitas 139 dB adalah sebesar 0,12 detik.¹¹

Klasifikasi gangguan dengar akibat bising (GPAB) atau *noise induced hearing loss* (NIHL) adalah *noise induced hearing loss temporary treshold shift* (NIHL-TTS) dan *noise induced permanent treshold shift* (NIHL-PTS). NIHL-PTS dapat terjadi setelah paparan bising berulang dan setelah paparan tunggal. Trauma akustik adalah gangguan dengar yang terjadi segera setelah paparan suara tunggal dengan intensitas sangat tinggi.¹² Skrining adanya trauma akustik adalah dengan anamnesis dan pemeriksaan audiometri nada murni. Gambaran khas trauma akustik pada audiogram yaitu adanya penurunan pada frekuensi 3000-6000 Hz, terutama di 4000 Hz sebagai akibat dari hilangnya atau rusaknya sel rambut luar dan degenerasi ganglion spiralis.¹² OSHA menentukan gangguan dengar akibat pekerjaan apabila terjadi peningkatan ambang dengar 10 dB pada frekuensi 2000, 3000, dan 4000 Hz. Meskipun tidak ada keluhan gangguan dengar, tapi gambaran audiogram ini sebagai penanda adanya PTS.

Efek paparan atau bising yang berlebihan terhadap beberapa individu sangat bervariasi dan sulit diprediksi, tapi paparan dengan intensitas tinggi sudah dipastikan akan menimbulkan kerusakan yang tidak dapat dihindari.^{12,13} Suara ≥ 130 dB(A) akan menyebabkan pergerakan cairan yang berlebihan di koklea sehingga terjadi kerusakan mekanik (ruptur hidrolimfatikus di koklea akibat rupturnya membran Reissner). Paparan suara intensitas sangat tinggi juga menyebabkan defleksi stereosilia yang berkepanjangan, akumulasi kalsium di mitochondria, dan hipoksia koklea sehingga terjadi kerusakan metabolik berupa peningkatan stres oksidatif di organ korti, penurunan aliran darah koklea, perubahan struktur mikromekanik di koklea, apoptosis, dan nekrosis sel rambut luar.^{1,12} Beberapa faktor yang mempengaruhi kerentanan seseorang terhadap bising, yaitu usia (dekade 6), jenis kelamin (laki-laki), merokok, diabetes, hipertensi, dan genetik.¹²⁻¹⁴

Secara histopatologi target utama trauma akustik adalah basal dari koklea yang menghubungkan antara stereosilia dengan puncak sel rambut. Dengan hilangnya stereosilia, sel rambut akan mati. Kematian sel sensorik akan menginduksi progresifitas Degenerasi Walerian dan hilangnya serabut saraf pendengaran primer.¹⁵ Kerusakan sel-sel rambut luar dapat dilihat dengan mengukur nilai emisi otoakustik, sehingga uji emisi otoakustik dapat dipakai sebagai indikator sensitif penurunan fungsi dengar akibat kerusakan sel rambut yang disebabkan oleh bising. *Distortion product otoacoustic emissions* (DPOAE) adalah pemeriksaan objektif yang cepat, mudah, dan dapat digunakan untuk deteksi dini kerusakan koklea akibat bising, lebih baik dari audiometri nada murni terutama penggunaannya pada gangguan dengar akibat bising di lingkungan militer.¹⁶ Hasil *pass* untuk koklea normal dan *refer* untuk gangguan patensi koklea.¹²

Pada stres oksidatif akibat paparan suara intensitas sangat tinggi, akan terjadi peningkatan *Reactive Oxygen Species* (ROS) dan *Reactive Nitrogen Species* (RNS) di dalam organ korti, akibatnya akan terbentuk

radikal bebas seperti *superoksida anion* (O_2^-), *hydroxyl radical* (OH^-), *hypochlorite* (OCl^-), dan *nitric oxide* (NO^-), serta terjadi peningkatan neurotoksisitas (glutamat) dan iskemia/reperfusi dari *cochlear blood flow* (CBF). Selanjutnya terjadi kerusakan *deoxyribonucleic acid* (DNA) dan protein sel, serta peroksidasi lipid dari membran sel-sel rambut dengan hasil akhir terjadinya apoptosis dan nekrosis. Akibat terjadi kematian sel rambut maupun stereosilia, maka akhirnya fungsi dengar rusak.^{17,18}

Target kerusakan ROS adalah protein, lipid, dan DNA. Membran plasma merupakan tempat utama reaksi radikal bebas, karena memiliki struktur yang terdiri dari *polyunsaturated fatty acids* (PUFA) yang sangat mudah teroksidasi; peristiwa yang terjadi disebut sebagai peroksidasi lipid, ditandai dengan terbentuknya hidrogen peroksida, epoksida, malondialdehid (MDA), dan sebagainya.^{17,18} Selain itu, produk ini juga dapat menyebabkan mutasi DNA mitokhondria. Mutasi ini berhubungan dengan disfungsi seluler dan jaringan, serta kematian sel. Di dalam sel, ROS/RNS tidak stabil dan tidak dapat diukur kadarnya. Oleh sebab itu sebagai indikator utama kerusakan sel akibat stres oksidatif adalah dengan mengukur kadar MDA. Pengambilan sampel darah dari vena perifer untuk mengukur kadar MDA mencerminkan oksidatif stres seluruh tubuh.¹⁷

Mekanisme pertahanan langsung terhadap radikal bebas dilakukan oleh antioksidan endogen. Proses ini bertujuan untuk membuang radikal bebas atau mengubah faktor-faktor radikal agresif menjadi kurang agresif. Antioksidan dapat ditemukan pada intraseluler maupun ekstraseluler. Pada stria vaskularis dan organ korti terdapat aktivitas antioksidan glutathione peroksidase (GPx) yang mengubah H_2O_2 dan bentuk-bentuk hidroperoksida serta lipid peroksida melalui siklus redoks glutathione.¹⁹

Penelitian di Cimahi (2015) menunjukkan terjadi peningkatan kadar MDA plasma dan penurunan kadar GPx eritrosit pada trauma akustik.⁷ Penelitian lain di Surabaya (2020) menunjukkan terdapat hubungan yang

signifikan antara kadar MDA plasma dengan ambang dengar pada frekuensi 4000 Hertz (Hz) setelah paparan tembakan senjata pada siswa Sekolah Polisi Negara (SPN).²⁰

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia dengan membentuk Komisi Nasional Penanggulangan Gangguan Pendengaran dan Ketulian (Komnas PGPKT), mendukung program WHO melalui program *Sound Hearing 2030* yaitu penanggulangan gangguan dengar yang dapat dicegah sebanyak 90% pada tahun 2030.²¹ WHO merekomendasikan untuk 11 negara di Asia Tenggara, termasuk Indonesia, tentang prioritas penanganan gangguan dengar yang dapat dicegah salah satunya adalah gangguan dengar akibat bising. Cara paling mudah untuk mencegah gangguan dengar akibat bising adalah penggunaan alat pelindung pendengaran. Hari Pendengaran Dunia yang digelar setiap 3 Maret bertujuan meningkatkan kesadaran untuk mengkampanyekan agar masyarakat dunia memusatkan perhatiannya pada isu global tentang gangguan pendengaran dan ketulian. Tahun 2023 mengusung tema "*Ear and Hearing Care For All, Let's Make It Reality*" untuk tema internasional.²²

Menurut *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) paparan bising lebih dari 90 dB harus menggunakan alat pelindung pendengaran.⁶ Penggunaan alat pelindung pendengaran dapat mengurangi jumlah energi akustik pada mekanisme pendengaran. Terdapat beberapa jenis alat pelindung pendengaran diantaranya jenis *earplugs* dan *earmuffs*.^{23,24} Jenis bahan untuk *earplugs* biasanya dari busa atau silikon. Efektifitas alat pelindung pendengaran tergantung dari jenis pekerjaan/kegiatan, efek reduksi bising yang diharapkan (NRR: *Noise Reduction Rating* dalam dB), kenyamanan saat digunakan, serta ketepatan insersi alat pelindung pendengaran ke dalam liang telinga.¹

Untuk mengurangi efek bising meriam Howitzer sebesar 148,6 dB maka diperlukan reduksi bising minimal sebesar 63,6 dB yang aman untuk 8

jam paparan. Alat pelindung pendengaran yang selama ini disediakan oleh Pusdik Armed untuk prajurit yang mengikuti kegiatan latihan menembak meriam Howitzer 105 berupa *foam earplug* (NRR: 20-30 dB), dan *earmuff* (NRR: 25-30 dB). APP berbahan busa mudah rusak dan kotor sehingga tidak untuk pemakaian berulang. Bentuk dan ukurannya standar, risiko tidak tepat insersi, sehingga efek proteksi tidak sesuai NRR. Meskipun alat pelindung pendengaran disediakan, tetapi masih ada yang tidak menggunakannya saat latihan berlangsung dan kejadian trauma akustik pada prajurit penembak Meriam Howitzer 105 di Pusdik Armed Kota Cimahi tanpa pelindung telinga didapatkan sebesar 23,5%.⁷

Penelitian pada personel militer di Korea tahun 2021 menyebutkan 81,2% tidak pernah atau kadang-kadang saja menggunakan alat pelindung pendengaran selama pelatihan militer. Penelitian ini juga menyebutkan terdapat hubungan yang bermakna antara penggunaan *earplug* dengan kejadian gangguan dengar pada tentara yang melakukan latihan menembak dan senjata artileri.²⁵ Penelitian pada tentara Israel yang terlibat perang konflik Israel-Gaza tahun 2016 didapatkan kejadian trauma akustik pada tentara yang tanpa alat pelindung pendengaran (*earplug*) lebih tinggi dari yang menggunakan pelindung pendengaran.¹ Diperlukan alat pelindung pendengaran yang dimodifikasi menjadi alat yang nyaman sehingga prajurit mau memakainya pada saat latihan dengan intensitas bising yang melebihi NAB atau paparan bising yang berisiko trauma akustik dan efektivitas proteksinya maksimal sesuai dengan nilai NRR.

Pusat alat bantu dengar yang sudah banyak didirikan di Indonesia membuat *earmould* sebagai bagian dari alat bantu dengar. *Costum earmould* ini terbuat dari bahan silikon lembut yang nyaman digunakan, memiliki ukuran sesuai ukuran liang telinga masing-masing individu sehingga memberikan efek oklusi yang baik, memiliki NRR 30 dB, dan dapat digunakan berulang karena mudah dibersihkan dan tidak mudah rusak. Murphy dkk (2022)

menyarankan untuk mengukur kesesuaian alat pelindung pendengaran untuk telinga secara individual.²⁶ Penelitian pada pekerja pabrik di Cina ditemukan kepatuhan penggunaan alat pelindung pendengaran jenis *earmould* lebih tinggi dibandingkan jenis *foam earplug*.²⁷ *Costum earmould* ini menjadi dasar pembuatan alat pelindung pendengaran yang dimodifikasi.

Sesuai dengan kebijakan kesehatan kerja internasional, di lingkungan kemiliteran sudah seharusnya memiliki suatu aturan/kebijakan dan organisasi yang melaksanakan program konservasi pendengaran bagi para personilnya. Sebagai contoh di Departemen Pertahanan, maupun Angkatan Darat Amerika Serikat telah memiliki kebijakan tertulis untuk perlindungan pendengaran bagi tentara maupun masyarakat sipil yang terkait, baik saat bekerja, latihan, maupun peperangan.²⁸ Saat ini di jajaran TNI masih belum memiliki aturan/kebijakan khusus maupun organisasi kesehatan kerja yang menangani program konservasi pendengaran bagi para personilnya yang berisiko terjadi trauma akustik. Dampak paparan suara meriam adalah gangguan pendengaran permanen yang tidak dapat diobati sehingga apabila menghindari sumber bising tidak dapat dilakukan (latihan menembak meriam merupakan kurikulum pendidikan siswa prajurit), maka upaya terbaik adalah menggunakan alat pelindung pendengaran (APP).³

Ketidakmampuan mendengar seperti orang normal (≤ 20 dB) akan terisolasi secara sosial, terutama pada orang tua, dan menyebabkan kerugian ekonomi secara global sebesar 980 miliar dolar/tahun.²⁹ Trauma akustik akan menurunkan kewaspadaan sehingga mempengaruhi pelaksanaan tugas pokok seorang prajurit TNI AD. Gangguan dengar yang terjadi akibat bising bersifat *irreversible*, sebagian besar memiliki derajat ringan, meningkat seiring dengan bertambahnya usia, dan sedikit lebih tinggi pada laki-laki.³⁰

Penelitian untuk mengetahui efektifitas alat pelindung pendengaran masih sangat sedikit dilaporkan terutama alat pelindung pendengaran yang

dimodifikasi menjadi alat yang efektif memberikan perlindungan dan nyaman digunakan belum pernah dilakukan di Indonesia. Penelitian untuk konservasi pendengaran di lingkungan militer juga masih belum banyak dilakukan, terutama penelitian mengenai masalah pendengaran setelah latihan menembak meriam Howitzer 105. Penelitian sebelumnya dilakukan Sasongko dkk (2015) mengenai pengaruh Ebselen (SPI 1005) terhadap kadar glutathione dan malondialdehid serta nilai emisi otoakustik pada prajurit dengan risiko trauma akustik. Hasil penelitian tersebut belum dijadikan protokol pencegahan karena harga Ebselen masih sangat mahal.⁷ Penelitian mengenai trauma akustik di Indonesia juga masih sedikit.

Berdasarkan uraian di atas, peneliti ingin mengetahui efektivitas APP modifikasi terhadap reduksi bising impulsif berdasarkan gambaran audiogram, gambaran DPOAE, kadar GPx, dan kadar MDA plasma. Penelitian ini dilakukan sebagai bagian dari strategi pencegahan terjadinya gangguan dengar yang sudah diketahui penyebabnya.

1.2 Rumusan Masalah

1. Apakah terdapat perubahan gambaran audiogram pada prajurit yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
2. Apakah terdapat perubahan gambaran audiogram pada prajurit yang menggunakan APP modifikasi sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
3. Apakah terdapat perbedaan gambaran audiogram antara prajurit yang menggunakan APP modifikasi dan yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?

4. Apakah terdapat perubahan gambaran DPOAE pada prajurit yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
5. Apakah terdapat perubahan gambaran DPOAE pada prajurit yang menggunakan APP modifikasi sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
6. Apakah terdapat perbedaan gambaran DPOAE antara prajurit yang menggunakan APP modifikasi dan yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
7. Apakah terjadi perubahan kadar GPx darah pada prajurit yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
8. Apakah terjadi perubahan kadar GPx darah pada prajurit yang menggunakan APP modifikasi sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
9. Apakah terjadi perbedaan kadar GPx darah antara prajurit yang menggunakan APP modifikasi dan yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
10. Apakah terjadi perubahan kadar MDA darah pada prajurit yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?

11. Apakah terjadi perubahan kadar MDA darah pada prajurit yang menggunakan APP modifikasi sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?
12. Apakah terjadi perbedaan kadar MDA darah antara prajurit yang menggunakan APP modifikasi dan yang menggunakan APP standar sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105 dibandingkan dengan sebelum latihan menembak meriam Howitzer 105?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini untuk mengevaluasi efektivitas modifikasi alat pelindung pendengaran terhadap reduksi bising impulsif dengan intensitas sangat tinggi dan kondisi stres oksidatif pada sel rambut luar koklea dengan:

1. Melihat gambaran audiogram prajurit yang menggunakan APP standar sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
2. Melihat gambaran audiogram prajurit yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
3. Membandingkan gambaran audiogram antara prajurit yang menggunakan APP standar dan yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
4. Melihat gambaran DPOAE prajurit yang menggunakan APP standar sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
5. Melihat gambaran DPOAE prajurit yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
6. Membandingkan gambaran DPOAE antara prajurit yang menggunakan APP standar dan yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.

7. Mengukur kadar GPx darah prajurit yang menggunakan APP standar sebelum dan setelah latihan menembak meriam Howitzer 105.
8. Mengukur kadar GPx darah prajurit yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
9. Membandingkan kadar GPx darah antara prajurit yang menggunakan APP modifikasi dan yang menggunakan APP standar sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
10. Mengukur kadar MDA darah prajurit yang menggunakan APP standar sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
11. Mengukur kadar MDA darah prajurit yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.
12. Membandingkan kadar MDA darah antara prajurit yang menggunakan APP modifikasi dan yang menggunakan APP modifikasi sebelum dan sesudah latihan menembak meriam Howitzer 105.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Ilmu Pengetahuan

Dari hasil penelitian ini, secara ilmiah diharapkan akan:

1. Memberikan wawasan baru mengenai penggunaan alat pelindung pendengaran yang dimodifikasi sesuai dengan bentuk liang telinga dan risiko paparan bising yang aman untuk koklea dengan menganalisis kadar antioksidan endogen, kadar radikal bebas, serta gambaran DPOAE dan audiogram pada individu yang berisiko trauma akustik.
2. Memberikan wawasan baru di bidang pencegahan terhadap penggunaan alat pelindung pendengaran yang dimodifikasi sesuai dengan bentuk liang telinga dan risiko paparan bising yang aman untuk koklea.

1.4.2 Manfaat Klinis

Secara praktis dari hasil penelitian ini dapat:

1. Melaksanakan deteksi dini terhadap risiko terjadinya trauma akustik yang disebabkan bising impulsif berlebihan dengan cara melakukan pemeriksaan fungsi dengar menggunakan audiometri nada murni dan DPOAE serta mengukur kadar glutathione peroksidase dan malondialdehid darah.
2. Memberi pandangan baru mengenai pencegahan dengan alat pelindung pendengaran yang disesuaikan dengan bentuk meatus individu yang berisiko trauma akustik.
3. Memberi masukan pada unsur pimpinan TNI dalam membuat kebijakan baik pendidikan, latihan, maupun operasional bagi para prajurit.
4. Dijadikan dasar untuk penggunaan alat pelindung pendengaran untuk individu yang akan terpapar bising ledakan.
5. Merealisasikan dan mengimplementasikan program konservasi pendengaran, khususnya di jajaran TNI.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Trauma Akustik

2.1.1 Definisi

Gangguan pendengaran akibat bising/GPAB atau *noise induced hearing loss*/NIHL adalah kerusakan struktur auditori yang multifaktorial setelah paparan suara keras yang berasal dari pekerjaan, lingkungan, dan rekreasional.¹⁶ GPAB dibagi menjadi 2, yaitu GPAB akut dan GPAB kronik (Tabel 2.1). GPAB kronik terbagi menjadi gangguan dengar akibat kerja (*occupational*) dan bukan akibat kerja (*non-occupational*). Sebagian besar GPAB kronis disebabkan pekerjaan. GPAB akut juga dibagi menjadi dua kategori, yaitu trauma akustik dan GPAB akut lain misalnya *concert-related hearing loss*.³¹

Tabel 2.1 Klasifikasi gangguan pendengaran akibat bising/GPAB

Klasifikasi	Penyebab	Lama Paparan
Akut		
Trauma Akustik	Tembakan, ledakan	Instan
GPAB Akut	Konser	Menit - jam
Kronik		
GPAB Akibat Kerja	Paparan lama akibat pekerjaan	5-15 tahun
GPAB Bukan Akibat Kerja	Paparan lama akibat bukan pekerjaan (misal: rekreasional)	Tergantung kasus

Dikutip dari Wada T et al. 2017³¹

Trauma akustik adalah GPAB akut yang disebabkan oleh pajanan gelombang suara tunggal dalam waktu singkat/seketika yang dapat menimbulkan penurunan pendengaran permanen (*permanent threshold shift*/PTS) tanpa didahului oleh perubahan ambang dengar sementara (*temporary threshold shift*/TTS).^{2,3} Paparan suara dengan intensitas sangat tinggi (≥ 130 dB), misalnya akibat letusan senjata api atau ledakan bom, menyebabkan trauma mekanis yang melampaui batas ambang elastisitas organ pendengaran perifer.^{3,31}

2.1.2 Epidemiologi

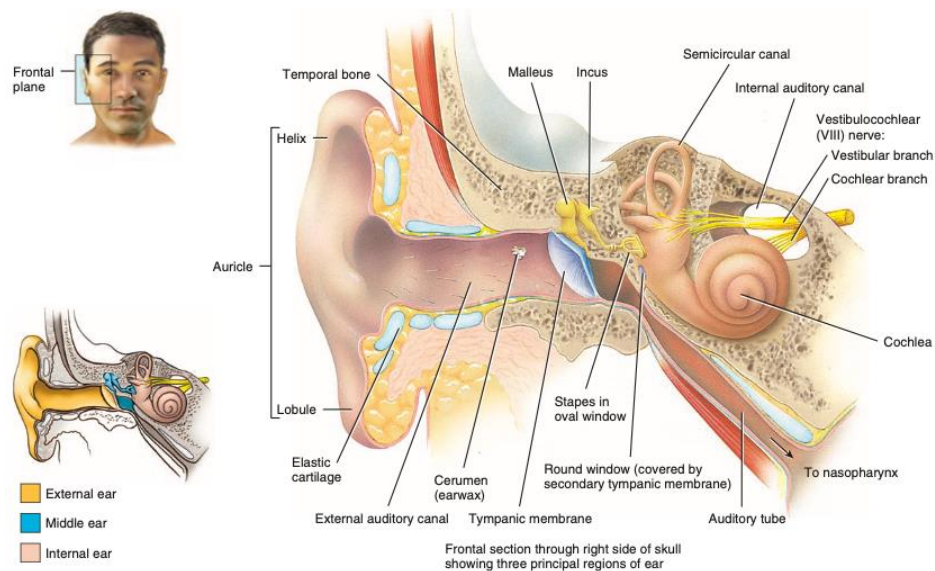
Gangguan pendengaran akibat bising dikenal sebagai kelainan medis selama revolusi industri dan pertama-tama dinamakan *boilermaker's diseases* karena mengenai pekerja pembuat mesin untuk transportasi dan mesin untuk pabrik.³² Menurut WHO, secara global saat ini terdapat 1,5 miliar orang yang mengalami gangguan dengar (20% dari populasi dunia) dan akan meningkat menjadi 2,5 miliar di tahun 2050. Indonesia menempati peringkat ke-4 di Asia Tenggara untuk angka ketulian tertinggi setelah Sri Lanka, Myanmar, dan India.²⁹ Berdasarkan Riskesdas 2013 prevalensi gangguan pendengaran di Indonesia sebanyak 2,6% dari seluruh penduduk Indonesia.⁵

Gangguan pendengaran akibat bising adalah penyebab gangguan dengar sensorineural kedua terbanyak setelah presbikusis, mengenai 5% dari populasi global, sebagian besar laki-laki, dan 16% terjadi karena pekerjaan. Gangguan dengar merupakan penyakit akibat kerja yang terbanyak.^{16,29} Angka kejadian trauma akustik di Pusat Pendidikan Artileri Medan Tentara Nasional Indonesia-Angkatan Darat (Pusdik Armed TNI-AD) sebesar 23,5%.⁷ Meskipun alat pelindung pendengaran disediakan, tetapi personel militer menolak menggunakannya karena mengganggu instruksi pada saat latihan militer.^{1,16,33}

2.2 Anatomi Telinga Dalam dan Sistem Auditori Perifer

2.2.1 Telinga Dalam

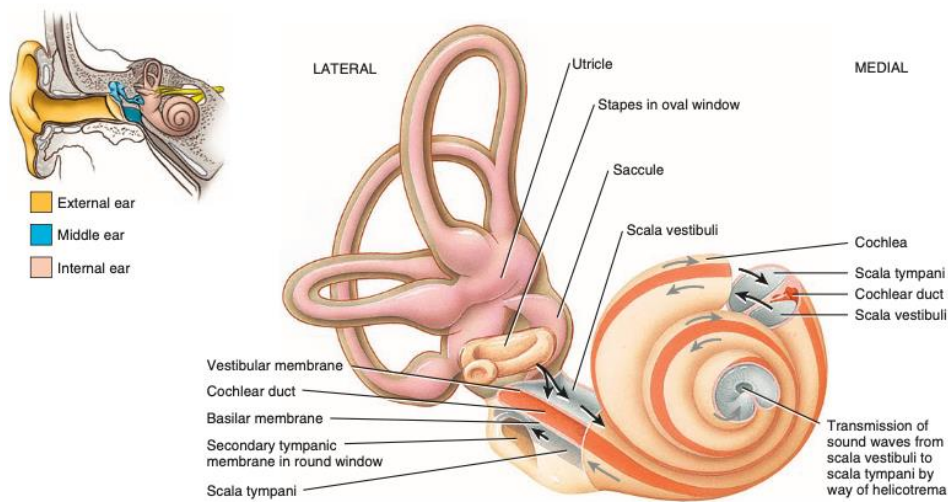
Telinga adalah sepasang organ tubuh manusia yang terdapat di kanan-kiri kepala yang berfungsi sebagai indera pendengaran dan organ keseimbangan. Telinga terbagi atas telinga luar, telinga tengah, dan telinga dalam (labirin) seperti terlihat pada Gambar 2.1.^{34–36}



Gambar 2.1 Anatomi telinga.

Dikutip dari: Tortora GJ & Derrickson B. 2017³⁵

Labirin terbagi atas labirin tulang (labirin oseosa) dan labirin membranosa (Gambar 2.2). Labirin membranosa berisi cairan bening yang disebut endolimf, sedangkan rongga antara labirin membranosa dan labirin tulang berisi cairan yang disebut perilimf.^{34–36}



Gambar 2.2 Anatomi telinga dalam.

Dikutip dari: Tortora GJ & Derrickson B. 2017³⁵

2.2.1.1 Labirin Tulang

Labirin tulang terdiri dari tiga bagian, yaitu vestibulum, kanalis semisirkularis, dan koklea.^{34–36}

2.2.1.2 Vestibulum

Pada dinding lateral vestibulum yang merupakan ruang sentral labirin terdapat fenestra ovalis (oval window). Pada dinding medial ada dua cekungan, yang satu berbentuk bulat tempat sakulus berada, dan cekungan satunya berbentuk lonjong tempat utrikulus. Di bawah cekungan lonjong terdapat muara akuaduktus vestibuli yang dilalui oleh duktus endolimfatik. Di bagian postero-superior vestibulum terdapat lima celah yang merupakan muara kanalis semisirkularis. Di dinding anterior ada lubang berbentuk elips ke skala vestibuli koklea.^{34–36}

2.2.1.3 Kanalis Semisirkularis

Ada tiga kanalis semisirkularis (KSS), yaitu KSS lateral, KSS posterior, dan KSS superior yang letaknya tegak lurus satu dengan lainnya. Setiap kanal mempunyai ujung menggelembung (disebut ampula), yang masing-masing bermuara ke vestibulum, serta ujung yang tidak menggelembung (lurus). Ujung lurus dari KSS posterior dan superior bersatu membentuk krus komunis sebelum bermuara di vestibulum, sedangkan ujung lurus KSS lateral tersendiri. Jadi, muara KSS pada vestibulum berjumlah lima buah.³⁴⁻³⁶

2.2.1.4 Koklea

Koklea adalah saluran berbentuk 2,5 lingkaran yang mengelilingi sebuah tulang berbentuk piramid di tengahnya, yang disebut modiolus. Dasar modiolus berhadapan dengan meatus akustikus internus yang dilalui oleh pembuluh darah dan saraf ke koklea. Lingkaran koklea yang paling dasar menonjol ke dinding medial telinga tengah, disebut promontorium. Terdapat tiga saluran di dalam koklea bagian tulang yang terbagi menjadi tiga bagian: 1) skala vestibuli; 2) skala timpani; dan 3) skala media (koklea membranosa).³⁴⁻³⁶

Skala vestibuli dan skala timpani berisi perilimf, dan saling berhubungan di bagian puncak koklea melalui celah yang disebut helikotrema. Skala vestibuli berakhir di kavum timpani sebagai fenestra ovalis yang tertutup oleh kaki stapes, yang membatasinya dengan rongga telinga tengah yang berisi udara. Skala timpani ditutupi oleh membran timpani sekunder di fenestra rotunda. Skala timpani berhubungan dengan rangkaian subaraknoid otak melalui akuaduktus koklea.³⁴⁻³⁶

2.2.1.5 Labirin Membranosa

Labirin membranosa terdiri atas duktus koklearis, utrikulus, sakulus, tiga duktus semisirkularis, duktus endolimfatikus, dan sakulus endolimfatikus.^{34–35}

2.2.1.6 Duktus Koklearis

Duktus koklearis disebut juga koklea membranosa atau skala media, yaitu saluran melingkar yang tertutup. Pada potongan melintang berbentuk segitiga dengan dinding-dindingnya, yaitu: 1) membran basilaris, tempat berdirinya organ Corti; 2) membran Reissner, yang berbatasan dengan skala vestibuli; dan 3) stria vaskularis, yang mengandung epitel vaskular, dan berperan pada sekresi endolimf. Duktus koklearis berhubungan dengan sakulus melalui duktus reunien.^{34–35}

2.2.1.7 Utrikulus dan Sakulus

Utrikulus terletak di bagian posterior vestibulum tulang dan berhubungan dengan lima saluran dari ketiga duktus semisirkularis. Utrikulus juga berhubungan dengan sakulus melalui duktus utrikulo-sakularis. Epitel sensoris pada utrikulus disebut makula, yang berperan pada akselerasi linier dan deselerasi.^{34–35}

Sakulus juga terletak di vestibulum tulang, di anterior utrikulus, dan berhadapan dengan kaki stapes. Epitel sensoris sakulus juga disebut makula. Fungsinya juga mungkin berhubungan dengan akselerasi linier dan deselerasi.^{34–35}

2.2.1.8 Duktus semisirkularis

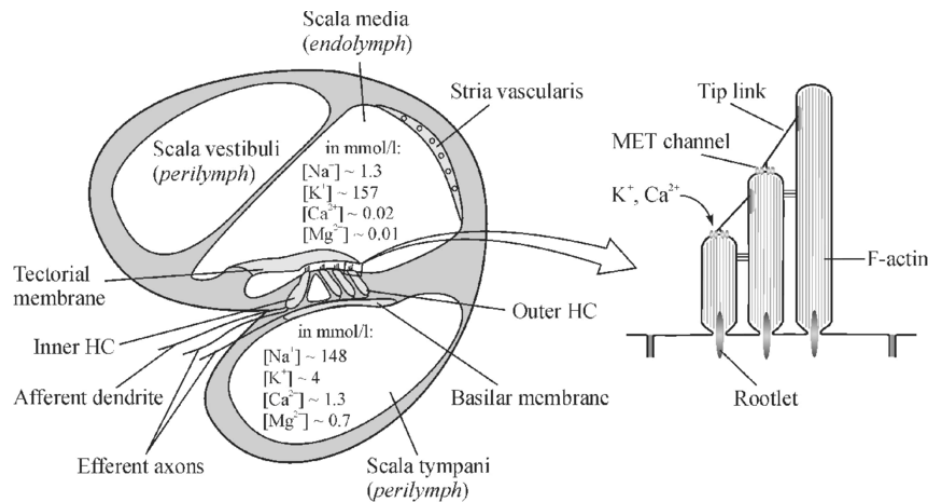
Duktus semisirkularis berjumlah tiga dan sesuai dengan bentuk kanalis semisirkularis (KSS) tulang. Duktus berhubungan dengan utrikulus. Ujung yang berbentuk ampula mengandung neuroepitelium yang menebal, disebut krista ampularis.^{34–35}

2.2.1.9 Duktus dan Sakus Endolimfatikus

Duktus endolimfatikus adalah gabungan dari akhir duktus sakulus dan duktus utrikulus. Ujung duktus endolimfatikus menggelembung membentuk sakus endo-limfatikus, yang terletak di antara dua lapisan duramater pada permukaan posterior os petrosus.^{34–36}

2.2.1.10 Sirkulasi Cairan Telinga Dalam

Terdapat dua macam cairan di telinga dalam, yaitu perilimf dan endolimf. Homeostasis cairan ini dipengaruhi oleh siklus K^+ , pH, HCO_3^- dan Ca^{2+} . Perilimf mengisi ruangan antara labirin tulang dan labirin membranosa dan mirip dengan cairan ekstraseluler yang kaya akan ion Na^+ . Perilimf berhubungan dengan likuor serebrospinal melalui akuaduktus koklea yang berhubungan dengan skala timpani di dekat fenestra rotundum (*round window*). Perilimf merupakan filtrasi serum darah yang dibentuk oleh kapiler pada ligamentum spiralis. Endolimf merupakan cairan yang mengisi labirin membranosa dan mirip dengan cairan intraseluler yang kaya akan ion K^+ dengan konsentrasi Na^+ serta Ca^{2+} rendah. Kandungan ion K^+ dalam endolimfe sangat penting, karena K^+ merupakan penyebab utama untuk transduksi sensoris. Kondisi pH endolimfe (7,5) lebih tinggi dibandingkan dengan pH perilimfe (7,3) ataupun plasma.^{34–36}



Gambar 2.3 Komposisi cairan koklea

Dikutip dari: Gagov H dkk. 2018³⁶

2.2.1.11 Vaskularisasi Telinga Dalam

Seluruh labirin mendapat aliran darah arterial dari a. labirintin, yaitu cabang dari a. serebelaris anterior-inferior. Namun, kadang-kadang berasal dari a. basilaris. Di dalam kanalis auditorius internus, arteri ini bercabang-cabang menjadi a. vestibularis anterior dan a. koklearis komunis, yang kemudian bercabang menjadi a. koklearis utama dan a. vestibulokoklearis. A. vestibularis anterior memperdarahi n. vestibularis, utrikulus, dan sebagian duktus semisirkularis. A. vestibulokoklearis sampai di modiolus daerah putaran basal koklea, terpisah menjadi cabang terminal vestibularis dan cabang koklear. Cabang vestibular mendarahi sakulus, sebagian besar kanalis semisirkularis, dan ujung basal koklea. Cabang koklearis mendarahi ganglion spiralis, lamina spiralis ossea, limbus, dan ligamentum spiralis. A. koklearis utama berjalan mengitari n. akustikus di kanalis akustikus internus, dan di dalam koklea mengitari modiolus.³⁴⁻³⁵

Aliran balik melalui v. labirintin, yang diteruskan ke sinus petrosus inferior dan sinus sigmoid. Vena-vena kecil dialirkan melalui akuaduktus

vestibuli dan koklearis ke sinus petrosus superior dan inferior. Aliran darah ke telinga dalam tidak berhubungan sama sekali dengan aliran darah ke telinga tengah dan dinding tulang telinga. Aliran darah ke koklea dan labirin vestibular juga terpisah sehingga bisa terjadi gangguan iskemia dengan gejala masing-masing pada koklea atau labirin, misalnya pada keadaan tuli saraf mendadak (*sudden sensorineural hearing loss*).^{34–35}

2.2.1.12 Persarafan Telinga Dalam

Nervus vestibulokoklearis (n. akustikus) dibentuk oleh n. koklearis dan n. vestibularis yang bersatu di dalam meatus akustikus internus (MAI) pada sisi lateral n. fasialis, dan masuk batang otak di antara pons dan medula. Sel-sel sensoris vestibuler dipersarafi oleh n. koklearis melalui ganglion vestibularis (ganglion scarpa) yang terletak di bagian lateral dari MAI. Sel-sel sensoris pendengaran dipersarafi n. koklearis melalui ganglion spiralis corti yang terletak di modiolus.^{34–35}

2.2.3 Sistem Auditori Perifer

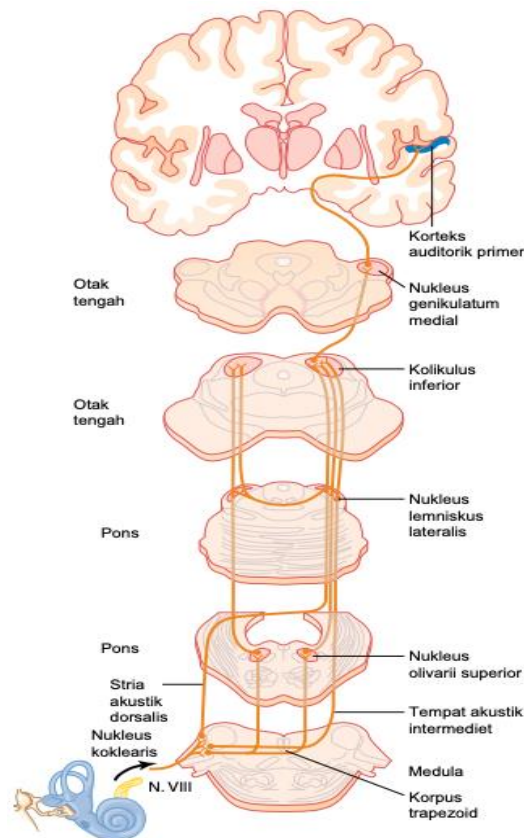
Organ Corti adalah reseptor indra pendengaran. Letaknya pada lemniskus basilar. Komponen-komponen penting dari organ Corti adalah kanalis Corti, sel rambut, sel penunjang, dan lemniskus tektorial. Kanalis Corti dibentuk oleh sel-sel batang eksterna dan interna. Saluran ini berisi cairan yang berisi kortilimf. Sel rambut merupakan sel reseptor pendengaran yang mengubah energi suara menjadi energi saraf. Sel-sel rambut dalam membentuk satu lapisan, sedangkan sel rambut luar tersusun dalam tiga sampai empat lapisan. Sel rambut dalam mengandung banyak sekali serabut aferen koklea sehingga merupakan bagian yang penting pada transmisi rangsang auditori. Sel rambut luar terutama mengandung saraf eferen dari kompleks olivarius dan berperan mengatur fungsi sel rambut dalam. Sel

diater terdapat di sela-sela sel-sel rambut luar, dan fungsinya menunjang sel-sel rambut luar. Ada juga sel Hensen yang terdapat di luar sel-sel Dieter.³⁴⁻³⁵

Membran tektorial terdiri atas matriks gelatin dengan serabut-serabut yang halus. Terletak di atas organ Corti. Sentuhan sel rambut dengan lemniskus tektorial menghasilkan rangsangan terhadap sel-sel rambut. Sel-sel rambut dipersarafi oleh dendrit sel bipolar dari ganglion spiralis yang terletak di kanalis Rosenthal (kanal yang berjalan mengikuti lamina spiralis tulang). Akson sel-sel bipolar ini berasal dari cabang koklear n. VIII dan berakhir di lemniskus koklearis dorsal dan ventral di kedua sisi lemniskus. Selanjutnya lemniskus nukleus yang penting dari bawah ke atas adalah 1) kompleks olivarius superior; 2) lemniskus lateralis; 3) kolikulus inferior; 4) korpus genikulatum medial; dan 5) korteks auditori.³⁴⁻³⁵

Serabut-serabut saraf auditori berjalan melalui rute ipsilateral dan kontralateral, serta mempunyai beberapa titik pertemuan. Jadi, masing-masing telinga berhubungan dengan kedua hemisfer otak. Di otak, pusat pendengaran terdapat pada girus temporalis superior. Untuk

memudahkan mengingat jalur indra pendengaran, ingatlah E.COLI-MA: *Eighth nerve, Cochlear nuclei, Olivary complex, Lateral lemniscus, Inferior colliculus, Medial geniculate body, and Auditory cortex*. Ilustrasi jaras pendengaran dapat dilihat pada Gambar 2.5 di bawah ini.^{34-35,38}



Gambar 2.4 Jarak pendengaran

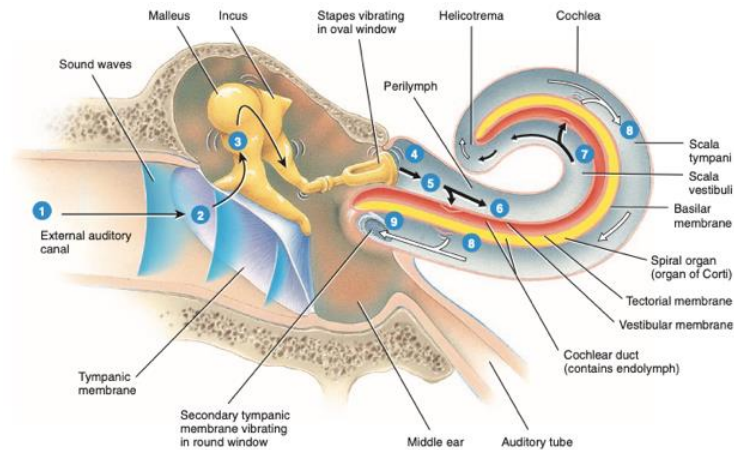
Dikutip dari: Hall dkk. 2016³⁷

2.3 Fisiologi Pendengaran dan Gangguan Pendengaran

2.3.1 Fisiologi Pendengaran

Telinga berfungsi sebagai organ pendengaran. Bunyi atau suara dari lingkungan dikumpulkan oleh daun telinga, diteruskan melalui liang telinga luar, dan menggetarkan membran timpani. Getaran membran timpani selanjutnya dihantarkan ke kaki stapes melalui rangkaian tulang yang berhubungan dengan membran timpani. Getaran kaki stapes menimbulkan perubahan tekanan cairan labirin yang menggerakkan membran basilar. Hal ini menstimulasi sel rambut pada organ korti. Sel rambut ini mengubah energi mekanik menjadi impuls elektrik yang disalurkan melalui n. auditorius. Jadi,

mekanisme pendengaran secara garis besar dapat dibagi menjadi: 1) konduksi (penghantaran) suara secara mekanik (organ-organ konduktif); 2) transduksi (perubahan) energi mekanik menjadi impuls elektrik (sistem sensoris koklea); dan 3) penghantaran impuls elektrik ke otak (jalur saraf) (Gambar 2.5).^{34-35,37}



Gambar 2.5 Jalur fisiologi pendengaran

Dikutip dari: Tortora GJ & Derrickson B. 2017³⁵

Efek pengungkit tulang-tulang pendengaran menimbulkan peningkatan kekuatan penghantaran yang terjadi dari membran timpani. Lengan maleus 1,3 kali lebih panjang daripada prosesus longus inkus sehingga terjadi peningkatan kekuatan penghantaran 1,3 kali. Luas membran timpani jauh lebih besar daripada area kaki stapes, dengan rasio rata-rata 21:1. Getaran membran timpani yang efektif hanya dua pertiganya, sehingga rasio efektif menjadi 14:1. Keseluruhan peningkatan kekuatan penghantaran karena daya pengungkit dan perbandingan luas membran menjadi 18:1. Gerak membran timpani lebih kuat di bagian perifer daripada di bagian tengah tempat perlekatan lengan maleus. Gerak ini juga menambah peningkatan kekuatan hantaran kira-kira 20 kali lebih besar dari stimulus suara asli.³⁴

Gelombang suara yang menggetarkan membran timpani tidak bersamaan sampai ke fenestra ovale dan fenestra rotundum. Jalur ke fenestra ovale lebih cepat karena adanya rangkaian tulang pendengaran. Jadi, saat fenestra ovale terdorong karena rangsangan gelombang suara, fenestra rotundum berada dalam fase relaksasi. Jika gelombang suara itu mendorong kedua fenestra secara bersamaan, efeknya akan saling meniadakan sehingga tidak ada pergerakan perilimf dan tidak ada pendengaran. Perbedaan fase ini menambah peningkatan sebesar 4 dB jika membran timpani utuh.^{34-35, 37}

Bentuk anatomi dan kemampuan fisiologik telinga luar dan telinga tengah juga membuat frekuensi suara tertentu lebih mudah mencapai telinga dalam karena resonansi alamiahnya. Resonansi alamiah telinga luar adalah pada 3000 Hz dan di telinga tengah pada 800 Hz. Frekuensi paling efisien yang disalurkan melalui rangkaian tulang pendengaran adalah antara 500-2000 Hz, sedangkan melalui membran timpani adalah 800-1600 Hz. Jadi, transmisi suara yang paling sensitif adalah antara 500-3000 Hz, dan inilah frekuensi yang penting untuk manusia pada percakapan sehari-hari.^{34-35, 37}

Getaran kaki stapes yang disalurkan ke cairan koklea akan menggerakkan membran basilar dan menimbulkan *shearing force* antara membran tektorial dan sel rambut (stapes bergerak seperti piston). Distorsi sel rambut akan menimbulkan getaran mikrofonik koklear yang akan merangsang impuls saraf. Gelombang suara bergantung pada frekuensinya akan mencapai amplitudo maksimum pada lokasi tertentu di membran basilar dan merangsang segmen tersebut. Frekuensi yang tinggi terdapat di lingkaran basal koklea, sedangkan frekuensi yang makin rendah makin ke arah apeks.^{34-35, 37}

Di dalam skala media koklea terdapat organ korti, yaitu alat seluler untuk mentransduksi getaran suara menjadi sinyal saraf yang dapat ditafsirkan oleh otak. Organ korti adalah mosaik dari sel-sel rambut sensorik

dan sel-sel pendukung non-sensorik, yang pada mamalia, tidak memiliki kapasitas untuk mengganti sel-sel yang hilang setelah rusak. Ada dua jenis sel rambut sensorik, yaitu satu baris sel rambut bagian dalam/*inner hair cell*(IHC) berjumlah 3500 pada manusia dan tiga sampai lima baris sel rambut bagian luar/*outer hair cell*(OHC) berjumlah 12.000. Kedua jenis sel rambut tersebut memiliki 3-4 baris "rambut" kaya aktin yang disebut stereosilia, yang bertambah tinggi di sepanjang membran basilar dari pangkal ke puncak. Peran sel pendukung secara umum memberikan dukungan struktural, metabolik, dan kekebalan pada organ Corti dan sangat penting untuk kelangsungan hidup sel rambut. Ini termasuk sel pilar, memisahkan IHC dan OHC untuk membentuk terowongan korti, serta sel Deiters, Hensen, dan Claudius.³⁸

Sementara skala vestibuli berkomunikasi dengan skala timpani di puncak koklea (helikotrema), skala media dipisahkan dari kedua bilik oleh membran Reissner dan membran basilaris. Pemisahan ini sangat penting untuk mempertahankan komposisi ionik yang unik dari cairan ekstraseluler di dalam ruang ini, sehingga menghasilkan potensi endoklear yang sangat penting untuk transduksi pendengaran. Secara khusus, skala vestibuli dan skala tympani mengandung perilimf yang miskin K⁺ dan kaya Na⁺. Sebaliknya, skala media diisi dengan endolimf yang kaya K⁺ dan miskin Na⁺ yang disekresikan oleh epitel khusus yang disebut stria vaskularis. Ujung stereosilia sel rambut tertanam dalam membran tektorial yang fleksibel dan bergerak sebagai respons terhadap getaran suara.³⁹

Ikatan stereosilia juga terhubung satu sama lain (dalam sel rambut yang sama) melalui hubungan ujung ekstra seluler yang sebagian dibentuk oleh protein cadherin 23 (CDH23) dan protocadherin 15 (PCDH15).⁴⁰ Tautan ini memungkinkan stereosilia untuk bergerak bersama dan menyebabkan saluran ion yang terjaga keamanannya secara mekanis non-selektif terbuka, mengalirkan arus kation (K⁺ dan Ca⁺) dari endolimf.³⁹

Masuknya kation yang mendepolarisasi sel rambut, menghasilkan efek yang berbeda pada sel rambut luar dan sel rambut dalam. Sel rambut luar secara fisik memanjang dan berkontraksi, mengaktifkan *cochlear amplifier*/penguat kohlea untuk mempersempit area eksitasi dan memberikan sensitivitas yang lebih besar pada gelombang suara yang merambat. Hal ini membantu dalam diskriminasi frekuensi dan dalam mendeteksi suara yang pelan. Sementara itu, sel rambut dalam melepaskan neurotransmitter glutamat ke butiran sinapsis neurit ganglion spiral tipe I (bermyelin) yang membentuk saraf pendengaran. Glutamat mengaktifkan reseptor glutamat pada serabut saraf aferen yang pada gilirannya akan mengirimkan sinyal saraf ke inti rumah siput dan area pemrosesan pendengaran yang lebih tinggi.

40

Sel-sel rambut dipersarafi oleh sel-sel bipolar dari ganglion spiralis. Akson dari sel-sel ini bergabung membentuk n. koklearis yang berjalan menuju nukleus koklearis ventral dan dorsal. Selanjutnya, bersama saraf dari kontralateral menuju ke nukleus olivarius superior, lemniskus lateral, kolikulus inferior, korpus genikulatum medial, dan akhirnya sampai ke korteks auditorius di lobus temporalis otak area 39-40. Melalui jalur ini, impuls saraf pendengaran akan sampai ke korteks auditorius untuk diinterpretasikan.³⁴⁻³⁵

2.3.2 Gangguan Pendengaran

Gangguan pendengaran adalah keadaan saat seseorang tidak dapat mendengar sebaik pendengaran normal atau hilangnya kemampuan mendengar bunyi dalam rentang frekuensi yang normal untuk didengar.^{41,42} Gangguan pendengaran dapat mengenai salah satu atau kedua telinga, dapat ringan sampai berat sehingga penderita mengalami kesulitan dalam berkomunikasi.⁴²

2.3.2.1 Derajat Gangguan Pendengaran

Gangguan pendengaran dapat diketahui berdasarkan pemeriksaan audiometri. Jenis gangguan pendengaran dibagi menjadi gangguan dengar konduktif, sensorineural, dan campur. Derajat gangguan dengar ditentukan menurut indeks Fletcher, yang menghitung ambang dengar rata-rata frekuensi 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, dan 4000 Hz. Menurut WHO, seseorang dengan gangguan pendengaran memiliki ambang pendengaran di atas 20 dB (Tabel 2.2).^{4,42}

Tabel 2.2 Derajat gangguan pendengaran menurut WHO

Derajat	Ambang pendengaran (dB)
Normal	< 20
Gangguan pendengaran ringan	20 – 34
Gangguan pendengaran sedang	35 – 49
Gangguan pendengaran cukup parah	50 – 64
Gangguan pendegaran parah	65 – 79
Gangguan pendengaran berat	80 – 94
Gangguan pendengaran total	> 95
Unilateral	> 35 pada salah satu telinga

Dikutip dari: WHO. 2021⁴

Menurut Bashiruddin J dkk, seseorang dengan gangguan pendengaran memiliki ambang pendengaran diatas 25 dB.⁴²

Tabel 2.3 Derajat gangguan pendengaran menurut Bashiruddin J dkk

Derajat	Ambang pendengaran (dB)
Normal	< 25
Tuli ringan	26 - 40

Tuli sedang	41 - 55
Tuli sedang-berat	56 - 70
Tuli berat	71 - 90
Tuli sangat berat	91 - 105
Tuli total	>110

Dikutip dari: Bashiruddin J dkk. 2023⁴²

2.3.2.2 Jenis Gangguan Pendengaran

Klasifikasi gangguan pendengaran yaitu gangguan pendengaran konduktif, gangguan pendengaran sensorineural, dan gangguan pendengaran campuran.^{34,42}

Gangguan pendengaran konduktif jika hasil pemeriksaan audiogram disebut ada *gap* antara hantaran udara (*Air Conduction/AC*) dan hantaran tulang (*Bone Conduction/ BC*) terdapat perbedaan 20 dB pada 2 frekuensi yang berdekatan, dan dianggap ada gangguan konduktif jika *gap* pada 3 frekuensi rata-rata 25 dB. Tuli konduktif juga dibagi dari ringan sampai berat bergantung dari ambang dengar hantaran suara (AC) dan besarnya *gap*. Tuli konduktif disebabkan oleh kelainan yang terdapat di telinga luar atau telinga tengah. Kelainan di telinga luar penyebab tuli konduktif adalah sumbatan oleh serumen, benda asing, otitis eksterna, atresia liang telinga, atau tumor seperti osteoma. Kelainan di telinga tengah berupa sumbatan tuba eustachius, perforasi membran timpani, otitis media, mastoiditis, dislokasi tulang pendengaran, hemotimpanum, atau timpanosklerosis.⁴²

Dikatakan gangguan pendengaran sensorineural jika ambang dengar AC dan BC berhimpit atau jika ada *gap* 0 dB, dan beratnya gangguan pendengaran sensorineural ditentukan oleh ambang dengar AC. Gangguan pendengaran sensorineural dibagi menjadi gangguan pendengaran sensorineural koklear dan retrokoklear. Gangguan pendengaran sensorineural koklear dapat disebabkan labirinitis, kerusakan saraf karena obat (streptomisin, kina, dll), trauma kepala, trauma akustik, pajanan bising, atau kelainan kongenital. Tuli mendadak termasuk gangguan pendengaran

tipe koklear yang disebabkan iskemia koklea atau infeksi virus. Gangguan pendengaran sensorineural retrokoklear dapat disebabkan oleh tumor otak seperti neuroma akustik, tumor serebelopontin, atau mieloma multipel, perdarahan otak, trauma kapitis, dan lain-lain.^{34,42}

Pada gangguan pendengaran campuran, pemeriksaan ambang dengar AC 25 dB dan ada *gap* antara AC dan BC rata-rata 25 dB. Sering disebabkan oleh otitis media atau mastoiditis yang mengenai koklea.^{34,42}

Presbikusis adalah gangguan pendengaran sensorineural yang terjadi pada usia lanjut. Gambaran audiogramnya khas, yaitu penurunan ambang dengar (AC dan BC) pada nada tinggi.⁴²

2.4 Bising

Bising adalah suara yang tidak dikehendaki dan dapat mengganggu atau membahayakan kesehatan. Bising berdasarkan sifatnya ada empat, yaitu bising yang kontinyu, bising terputus-putus, bising impulsif, dan bising impulsif berulang. Bising kontinyu adalah bising dengan intensitas kurang dari 6 dB. Bising terputus-putus atau disebut *intermittent noise* adalah bising yang tidak berlangsung terus menerus dengan periode tenang. Bising impulsif adalah perubahan intensitas suara yang sangat cepat hingga melebihi 40 dB. Bising impulsif berulang adalah bising yang melebihi 40 dB secara cepat dan terjadi berulang kali.⁴³

Adapun jenis bising berdasarkan pengaruh pada manusia, yaitu ada bising yang mengganggu dengan intensitas rendah, bising yang menutupi, dan bising yang merusak karena intensitasnya melebihi ambang batas pendengaran.⁴³

Frekuensi bunyi dinilai dalam satuan Hertz (Hz) dan intensitas bunyi (kekerasan suara) diperiksa berupa tekanan suara dengan satuan intensitas (dB). Bunyi ada yang aman dan juga tidak aman untuk telinga, seperti terlihat pada Gambar 2.5. Telinga normal dapat membedakan bunyi mulai dari 0 dB

dalam frekuensi 20-20.000 Hz. Untuk perbandingan, suara percakapan sehari-hari berkisar 60 dB, suara lalu lintas sekitar 80 dB, suara sangat keras pada saat konser rock atau diskotik sebesar 120 dB, dan suara mesin pesawat jet sebesar 140 dB. Tekanan suara di atas 110 dB akan menimbulkan ketidaknyamanan dan intensitas suara lebih dari 130 dB akan menimbulkan rasa sakit. Meskipun kerentanan seseorang terhadap bising bersifat individual, namun secara umum diketahui bahwa kebisingan di atas 85 dB akan dianggap berbahaya bagi kesehatan. Paparan suara terus menerus di atas 70 dB secara kumulatif dapat menyebabkan gangguan dengar, sedangkan suara di atas 130 dB akan langsung menyebabkan gangguan dengar.^{2,3}

Breathing	10 dB	Safe sound level
Ticking watch	20 dB	
Average room noise	30-50 dB	
Normal conversation/ background music	60 dB	
Average office noise	70 dB	
Landscaping equipment (inside house)	75 dB	Repeated or prolonged exposure could lead to NIHL over time
Vacuum / inside an airplane	80 dB	
City traffic (inside a car) / noisy restaurant	85 dB	
Subway, shouted conversation	90-95 dB	
Pro sports events/ car horn at 16 ft	95-100 dB	
Motorcycle, stereo	100 dB	
Chainsaw, leafblower, snowmobile	106-115 dB	
Music concert, ambulance siren	120 dB	Can result in immediate and permanent hearing loss after a single close-range exposure
Jet engine taking off	140 dB	
Gun shot	140-60 dB	

Gambar 2.6 Besar dan keamanan paparan suara

Dikutip dari: NIOSH. 2017¹⁰

2.4.1 Nilai Ambang Batas Pendengaran dan Unit Paparan Bising

Occupational Safety and Health Administration (OSHA) menyatakan paparan bising maksimum perhari selama 8 jam tidak boleh melebihi 90 dB (Tabel 2.4).⁶

Adapun kriteria lainnya menurut Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia (Permenaker RI) tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesejahteraan Kerja Lingkungan Kerja (Tabel 2.5).¹¹

Tabel 2.4 Nilai ambang batas pendengaran menurut OSHA

Waktu Paparan Per Hari (jam)	Intensitas kebisingan (dB)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1	105
0,5	110
≤ 0,25	115

Dikutip dari: OSHA, 1984⁶

Adapun kriteria lainnya menurut Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia (Permenaker RI) tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesejahteraan Kerja Lingkungan Kerja (Tabel 2.5).¹¹

Tabel 2. 5 Nilai ambang batas pendengaran menurut Permenaker RI

Waktu Paparan Per Hari		Intensitas kebisingan (dB)
8	Jam	85
4		88
2		91
1		94
30	Menit	97
15		100
7,5		103
3,75		106
1,88	Detik	109
0,94		112
28,12		115
14,06		118
7,03		121
3,52		124
1,76		127
0,88		130
0,44		133
0,22		136
0,12		139

Dikutip dari: Permenaker RI tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesejahteraan Kerja Lingkungan Kerja. 2018.¹¹

2.4.2 Faktor-Faktor Kerentanan Individu Terhadap Bising

Kerentanan seseorang terhadap bising dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor kerentanan secara genetik dikatakan menjadi faktor yang dipertimbangkan, meskipun sudah dibuktikan dengan percobaan pada binatang, namun pada manusia masih sulit dipahami. Seseorang dengan riwayat keluarga gangguan pendengaran sebelum usia 50 tahun lebih berisiko mengalami gangguan dengar. Kejadian gangguan pendengaran meningkat seiring dengan penambahan usia. Pada usia lebih dari 50 tahun terjadi peningkatan ambang batas akibat proses degenerasi koklea.¹²

Kerentanan seseorang terhadap bising juga dikatakan meningkat akibat merokok, diabetes, dan penyakit kardiovaskular.¹² Nikotin yang terkandung dalam rokok dilaporkan bersifat ototoksik. Reaksi toksisitas akibat rokok dapat memicu terjadinya disfungsi endothelial dan iskemia koklea

dengan mekanisme produksi karboksihemoglobin, vasospasme, peningkatan viskositas darah yang ada kaitannya dengan arteriosklerosis.⁴⁴ Menurut penelitian Ningsih dkk. (2018) seseorang dengan konsumsi rokok lebih dari sama dengan 10 batang per hari lebih berisiko mengalami gangguan dengar dibandingkan seseorang dengan konsumsi rokok kurang dari 10 batang per hari.⁴⁵

Hipertensi dapat menyebabkan kerusakan endotel pembuluh darah arteri atau disebut dengan arteriosklerosis. Tekanan darah yang tinggi pada kondisi arteriosklerosis dapat menyebabkan terganggunya perfusi darah kaya oksigen yang masuk ke koklea, perubahan ion potensial, menyebabkan perdarahan telinga dalam yang dapat mengakibatkan gangguan pendengaran progresif dan mendadak. Menurut penelitian di Rumah Sakit Bhayangkara Medan (2020) risiko gangguan pendengaran pada penderita hipertensi 6 kali lebih besar daripada orang tanpa hipertensi.⁴⁶

Risiko gangguan pendengaran 3 kali lebih besar pada laki-laki dibandingkan perempuan. Hal ini berhubungan dengan kebiasaan tiap individu seperti hobi menembak, balapan, menggunakan *personal listening devices* (PLDs) seperti *headset* atau *earphone* dengan waktu lama dan volume yang keras.⁴⁷

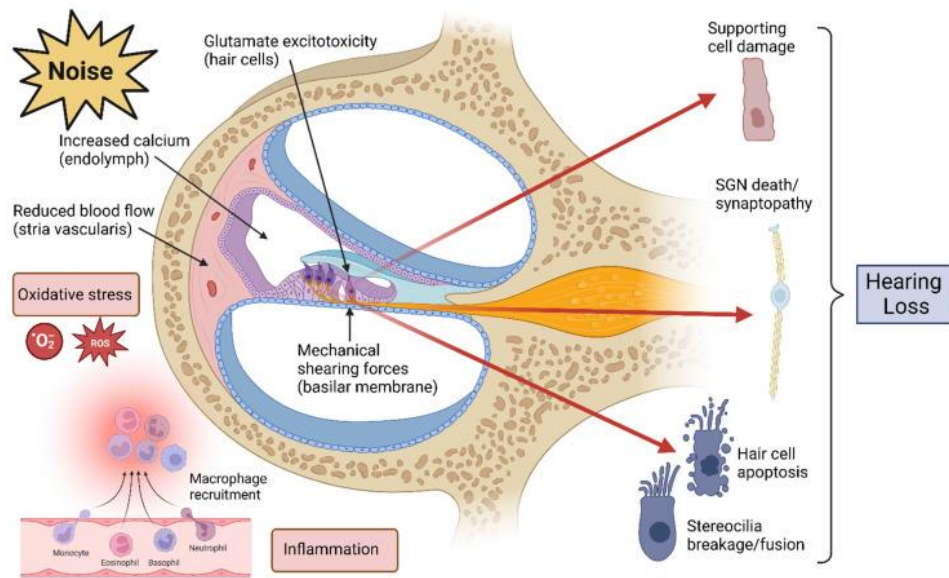
PLDs merupakan alat seperti *headset* dan *earphone* yang digunakan untuk mendengarkan suara misalnya musik yang biasanya dihubungkan *dari handphone, ipod, MP3 player, atau laptop*.⁴⁸ Penggunaan PLDs yang aman adalah penggunaan maksimal 60 menit per hari dengan volume maksimal 60%, atau bisa disebut *60-60 rule*.²⁹

Obat ototoksik meningkatkan risiko gangguan dengar akibat bising karena bekerja mendegenerasi seluler koklea dan atau jaringan vestibular. Obat ototoksik dapat menyebabkan reaksi toksisitas terhadap telinga dalam, sehingga dapat timbul berbagai keluhan seperti gangguan pendengaran, tinnitus, disekulibrium maupun *dizziness*. Beberapa obat yang bersifat

ototoksik seperti golongan aminoglikosida (streptomisin, kanamisin, garamisin), Obat anti inflamasi nonsteroid (OAINS) seperti Aspirin, Ibuprofen, Asam Mefenamat, golongan quinolone, dan obat antitumor seperti Cisplatin dan Oxaloplatin.¹²

2.5 Patofisiologi Gangguan Dengar Akibat Bising

Mekanisme yang menyebabkan gangguan pendengaran akibat bising meliputi kerusakan mekanik pada struktur koklea, penurunan aliran darah, reaksi inflamasi, dan stres oksidatif serta eksitotoksisitas akibat stimulasi berlebihan pada sel rambut dan saraf (Gambar 2.7). Hilangnya sel-sel rambut melalui apoptosis menyebabkan gangguan pendengaran permanen. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa bising keras akan menyebabkan perubahan dramatis dalam aliran darah koklea, termasuk peningkatan permeabilitas pembuluh darah, vasokonstriksi kapiler, dan stagnasi darah dalam kapiler stria vaskularis. Hal ini membuat sel-sel rambut jadi relatif anoksik dan dengan demikian mengalami kerusakan sekunder. Paparan bising juga diikuti oleh aktivitas metabolik intens, karena stimulasi berlebihan. Kebisingan pada frekuensi tertentu dapat menyebabkan kerusakan sel rambut pada area tertentu yang bermanifestasi sebagai defisit pendengaran yang spesifik terhadap frekuensi tertentu. Pada frekuensi rendah (2 kHz ke bawah), refleks otot telinga tengah dapat berkontraksi saat terpapar bising dan memberikan tingkat perlindungan terhadap gaya geser mekanis.^{2,6}



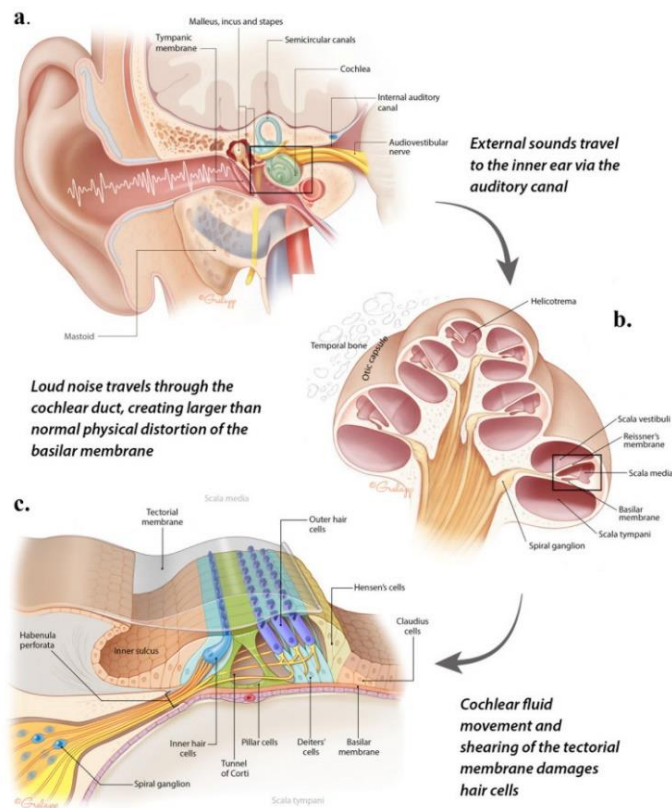
Gambar 2.7 Mekanisme kerusakan akibat bising.

Dikutip dari: Natarajan R et al. 2023¹⁶

Variabel yang mempengaruhi tingkat keparahan kerusakan termasuk faktor-faktor yang disebabkan oleh stimulus suara (intensitas, frekuensi, dan durasi) dan karakteristik fisik, mekanis, dan kimiawi dari telinga luar, tengah, dan dalam. Kerusakan yang disebabkan oleh kebisingan dapat menyebabkan kerusakan sementara atau permanen dan gangguan pendengaran. Durasi paparan yang terlalu lama pada intensitas kebisingan berbahaya atau paparan satu kali pada bising dengan intensitas sangat tinggi dapat menyebabkan *permanent threshold shift* (PTS). PTS terjadi ketika ambang dengar naik secara menetap karena kerusakan pada sel rambut koklea, bundel rambut mekanosensorik, atau serabut saraf. Gangguan pendengaran yang bertahan selama 14 hari setelah paparan bising, merupakan indikasi PTS. Pelemahan pendengaran sementara dengan pemulihan dalam waktu 24-48 jam disebut *temporary threshold shift* (TTS).¹⁶

2.5.1 Kerusakan Mekanik Akibat Ledakan

Kerusakan koklea yang disebabkan oleh energi akustik pasca ledakan akibat proses mekanis dan metabolik. Paparan ledakan memicu pergerakan cairan yang berlebihan di dalam koklea, menyebabkan lepasnya sel-sel rambut, rusaknya elektron basilar, dan kebocoran elektron hidrolimfatik, serta menyebabkan bercampurnya cairan perilimfe dan endolimfe. Sel-sel rambut luar adalah sel-sel yang paling rentan terhadap suatu pajanan ledakan, akibatnya akan terjadi kelayuan (*floppy*) sel-sel serabut sensoris (stereosilia). Dimulai dengan defleksi stereosilia yang berkepanjangan, menyebabkan akumulasi kalsium di mitokondria, dan hipoksia koklea. Gangguan homeostasis kalsium dan hipoksia koklea, memicu peningkatan radikal bebas dan memicu elektron oksidatif. Apabila pajanan ledakan berlangsung lebih hebat akan menyebabkan kerusakan dan hilangnya stereosilia tersebut. Paparan suara ledakan yang terus menerus dapat menyebabkan kerusakan koklea akibat proses metabolik.^{2,16,49} Ilustrasinya bisa dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Struktur anatomi telinga dalam akibat paparan bising. (a) anatomi telinga luar, tengah, dalam. (b) potongan koklea (c) anatomi seluler organ korti. Dikutip dari: Natarajan R et al. (2023)¹⁶

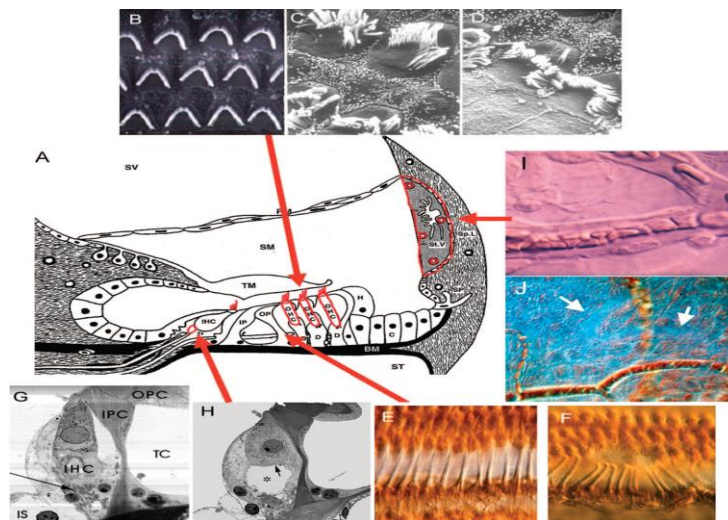
Hilangnya hubungan ujung stereosilia karena kekuatan yang berlebihan, melepaskan saluran transduksi mekanoelektrik (MET), dan menghalangi mekanotransduksi oleh sel rambut. Namun, *tip link* stereosilia memiliki beberapa kapasitas untuk diperbaiki melalui penggantian protein PCDH15 dan CDH23.⁵⁰

Pada mamalia, ujung stereosilia yang rusak secara in vitro telah diamati untuk diperbaiki dalam waktu 24 jam, diikuti dengan pemulihan mekanotransduksi, meskipun arus MET tetap terganggu selama 36 jam. Fenomena ini yang dianggap mendasari terjadinya TTS setelah paparan kebisingan, meskipun PTS dapat terjadi jika *tip link* stereosilia rusak terlalu luas untuk diperbaiki. Selain itu, kebisingan dapat merusak inti F-aktin dari

stereosilia itu sendiri. Stimulasi mekanis yang berlebihan dapat mengurangi kekakuan inti, stereosilia menjadi “floppy” yang diakibatkan dari depolimerisasi aktin, hilangnya ikatan silang aktin, atau fusi dengan stereosilia lain. Kemampuan stereosilia untuk memperbaiki aktin, menyebabkan TTS atau PTS tergantung pada kerusakan pada inti stereosilia.^{16,42}

Defleksi sel pendukung, terutama sel pilar, telah terbukti mengakibatkan terlepasnya stereosilia OHC dari membran tektorial pada model NIHL chinchilla. Hal ini mengurangi stimulasi sel rambut dan menghasilkan TTS. Paparan kebisingan sedang juga dapat mengakibatkan perubahan mikrokimia, mengurangi kekakuan pilar.¹⁶

Dengan menggunakan mikroskop elektron akan tampak kerusakan yang paling parah adalah stereosilia sel rambut luar dan sel penyangga di telinga dalam akibat pajanan bising yang terlihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.^{16,18}



Gambar 2.9 Skematik dan *scanning elektron micrograph* dari sel-sel rambut luar Chinchilla normal dan patologis yang disebabkan oleh pajanan bising.

Dikutip dari: Henderson D (2006); Natarajan R et al. (2023)^{16,18}

Pajanan bising dengan frekuensi tinggi akan mengakibatkan rusaknya sel-sel rambut bagian basal, sedangkan pajanan bising dengan frekuensi rendah akan mengakibatkan rusaknya sel-sel rambut bagian apeks.⁵¹

2.5.2 Stres Oksidatif dan Berkurangnya Aliran Darah

Terlepas dari fungsinya dalam siklus Krebs, mitokondria memainkan peran penting dalam apoptosis dan stres oksidatif. Setelah infeksi, trauma, dan dalam konteks ini, trauma yang disebabkan oleh kebisingan, kerusakan sel atau degradasi koneksi sel dapat menyebabkan aktivasi jalur apoptosis oleh sel rambut.⁵² Bising dapat mengakibatkan kerusakan mekanik pada struktur-struktur organ korti terutama sel rambut luar serta kerusakan metabolik yang mengakibatkan kerusakan sistem enzim, protein, lipid, dan struktur DNA.⁵³

Mekanisme kerusakan ireversibel sel rambut dalam organ korti disebabkan oleh ROS dan penurunan enzim antioksidan akibat stres oksidatif, akibatnya akan terjadi apoptosis. Paparan bising atau pemberian obat ototoksik menghasilkan ROS, yang pada gilirannya mengaktifkan JNK dan p38MAPK.⁵³

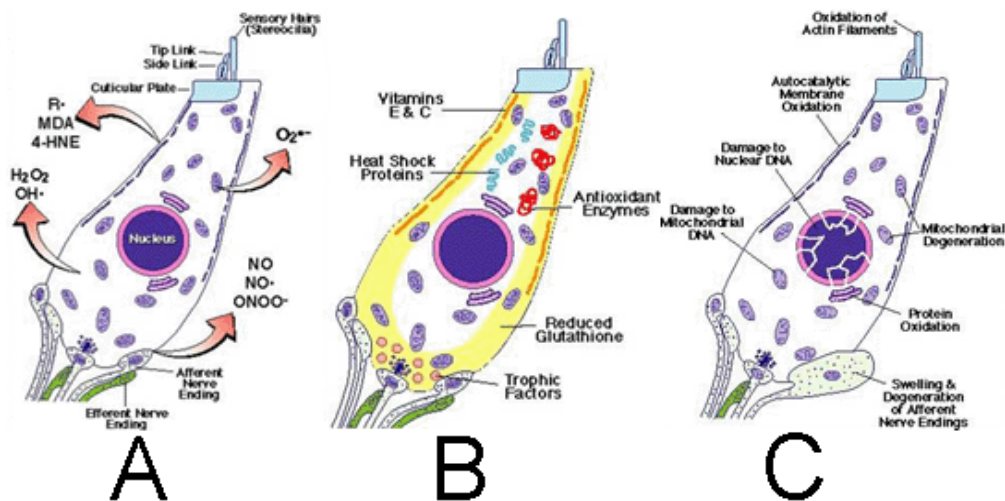
JNKs adalah efektor apoptosis ampuh stres oksidatif sel-sel yang rusak di telinga setelah trauma. Fosforilasi c-Jun, sebuah komponen dari faktor transkripsi AP-1, adalah reaksi sentral dalam apoptosis JNK-termediasi dari stress sel-sel rambut pendengaran dan neuron oksidatif yang rusak. Penghambatan JNK mencegah kematian sel rambut koklea akibat neomisin secara in vitro. Selain itu, penghambatan JNK melindungi terhadap kematian sel rambut pada marmut akibat induksi aminoglikosida. Penghambatan JNK juga telah ditunjukkan dapat melindungi fungsi pendengaran akibat bising, akan tetapi tidak melindungi fungsi pendengaran akibat induksi cisplatin.⁵³

Jalur p38 MAPK juga diaktifkan setelah gangguan ototoksik, dan

karena itu merupakan target yang menjanjikan. Blokade p38MAPK mencegah hilangnya sel rambut karena induksi gentasimin in vitro dan bising yang disebabkan gangguan pendengaran secara in vivo. Akumulasi ROS akan memulai kaskade proses biokimia yang kompleks yang mencakup aktivasi JNK dan p38MAPK, pelepasan sitokrom C dari mitokondria dan aktivasi prokaspase-8, -9 dan -3 (jalur apoptosis intrinsik). Sebuah jalur bebas kaspase yang melibatkan translokasi endonuklease G ke inti setelah trauma bising juga telah dilaporkan.⁵³

Selain itu, dalam model trauma mekanis in vitro menunjukkan peningkatan kadar Ca^{2+} intraseluler. Penyebaran gelombang kalsium dapat memicu pelepasan glutamat berlebihan dalam jalur eferen koklea, yang mengarah ke eksitotoksitas.⁵³

Ilustrasi tentang terjadinya apoptosis akibat stres oksidatif ditunjukkan pada Gambar 2.10. berikut ini.



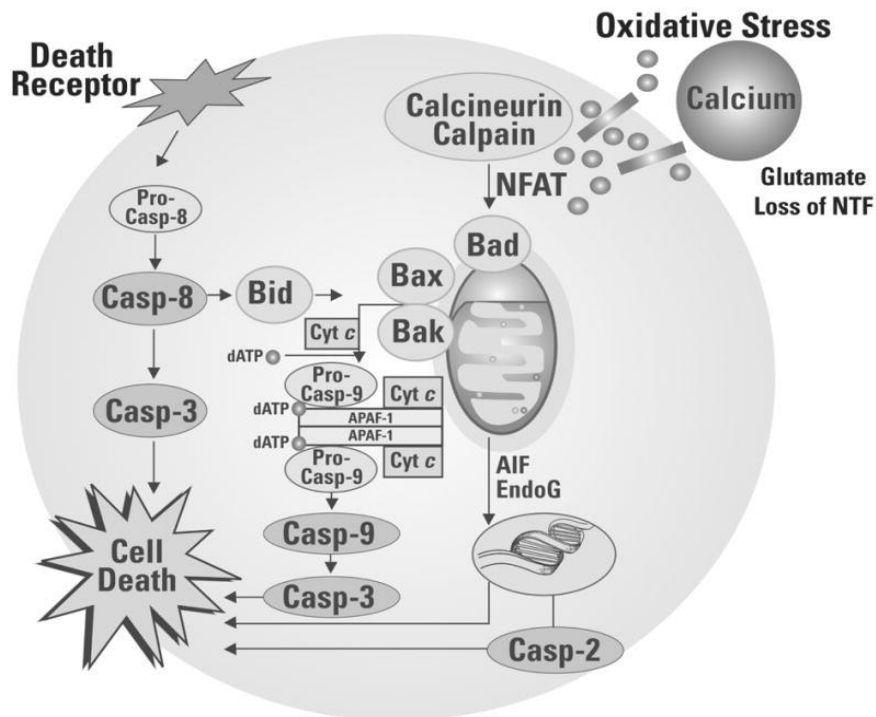
Gambar 2.10 Ilustrasi terjadinya apoptosis akibat stres oksidatif

Dikutip dari: Kil J. (2010)

Gambar A menunjukkan produk radikal bebas ROS, seperti O_2^- (*superoxide anion*) dan OH^- (*hydroxyl radical*), Gambar B menunjukkan mekanisme penurunan enzim antioksidan endogen akibat ROS, dan Gambar C menunjukkan kerusakan sel ireversibel akibatnya terjadi apoptosis.⁵⁴

ROS membuat kerusakan pada *actin filament*, *hair bundles*, dan *ion channels*. Kerusakan filamen aktin akan menyebabkan terbatasnya gerakan sel rambut, sedangkan kerusakan pada saluran ion akan menyebabkan permeabilitasnya berkurang. Stimulasi energi akustik juga menyebabkan meningkatnya neurotransmitter glutamat pada sambungan (*junctional*) sel rambut dalam dengan neuron aferen pada sistem auditori perifer, akibatnya terjadi influks Ca^{++} (depolarisasi) serta air ke dalam intrasel akibatnya sel pecah dan mati (nekrosis), juga akan mengaktifkan jalur *c-Jun N-terminal kinase* (JNKs) atau *mitogen activated protein kinase* (MAPKs) dan akan mengakibatkan apoptosis.⁵⁵

Kadar Ca^{++} intrasel yang tinggi juga menyebabkan produksi endotelin-1 (ET-1) yang bersifat vasokonstriktor, akibatnya juga menyebabkan produksi ROS meningkat. Influks ion Ca^{++} ke intrasel juga akan mengaktifkan reseptor apoptosis ekstrinsik melalui jalur kaspase-8 (*upstream/initiator*), kaspase-3 (*downstream/efector*) dan reseptor apoptosis intrinsik (dalam mitokondria) melalui jalur kaspase-9.⁵⁶ Jalur apoptosis yang lain diaktivasi oleh DNA melalui jalur kaspase-2. Secara umum bagan apoptosis akibat stres oksidatif ditunjukkan pada Gambar 2.11 di bawah ini.



Gambar 2.11 Bagan apoptosis akibat stres oksidatif

Dikutip dari: Colleen G (2007)⁵⁷

Radikal oksigen spesies (ROS) dapat beraksi dengan semua makromolekul seperti lemak, protein, asam nukleat, dan karbohidrat. Marker yang merupakan produk hasil reaksi ROS dengan lipid, protein, karbohidrat, DNA, dan molekul lain dapat diukur karena waktu paruhnya lebih lama dibandingkan dengan ROS. Peningkatan ROS menyebabkan penurunan jumlah ATP dan nikotinamid dinukleatida, kerusakan membran melalui peroksidasi lipid, dan pelepasan sitokin proinflamasi.¹⁸

Peroksinitrit (ONOO⁻), spesies nitrogen yang sangat reaktif (*reactive nitrogen species/RNS*) yang berasal dari NO dan superoksida, adalah salah satu radikal bebas yang paling berbahaya bagi sel rambut. Generasi RNS dan ROS yang diinduksi oleh kebisingan terus berlanjut sebagai proses biokimiawi aktif dan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur rumah

siput. Enzim antioksidan seperti superoksida dismutase memainkan peran penting dalam melawan radikal bebas dengan mengkatalisis dismutasi superoksida menjadi hidrogen peroksida. Enzim lain seperti glutathione, glutathione peroksida, dan katalase kemudian menyeimbangkan dengan Sod1 untuk memberikan pertahanan seluler, dan hilangnya Sod1 pada tikus KO meningkatkan kerentanan terhadap PTS yang diinduksi oleh suara bising.⁵⁸

Stria vaskularis membentuk dinding lateral saluran koklea dan terdiri dari tiga lapisan sel: marginal, intermediet, dan basal. Stria vaskularis bertanggung jawab untuk menjaga patensi endokohlear dan memiliki suplai darah yang kaya.⁵⁹ Paparan bising yang berbahaya dapat menyebabkan kerusakan, terutama pada sel perantara, yang menyebabkan perubahan sementara atau permanen pada potensi endoklea dan gangguan mekanotransduksi sel rambut.⁶⁰ Selain itu, gangguan aliran darah dapat menyebabkan hipoksia sel atau perubahan keseimbangan ion di telinga bagian dalam. Peningkatan kadar K⁺ dalam endolimf dan kadar Na⁺ dalam perilimfe menyebabkan edema seluler dan kerusakan struktural.⁶¹ Selain itu, pembentukan radikal bebas sebagai respons terhadap bising berintensitas tinggi dapat menyebabkan vasokonstriksi dan reperfusi sel di koklea, yang kemudian menyebabkan kematian sel.⁵⁸

2.5.2.1 Malondialdehid (MDA)

Malondialdehid (MDA) adalah salah satu hasil akhir dari peroksidasi lipid. Kadar MDA digunakan sebagai indikator adanya kerusakan akibat radikal bebas. Makin tinggi kadar MDA menunjukkan makin besarnya aktivitas radikal bebas, sebaliknya kadar MDA yang makin rendah menunjukkan penekanan radikal bebas, di antaranya dengan adanya antioksidan yang makin tinggi.¹⁸

Peroksidasi lipid merupakan salah satu petanda yang paling unggul dalam menilai kadar *radical oxygen species* (ROS) yang menyebabkan kerusakan jaringan sistemik. Kadar ROS tidak mungkin untuk diukur karena sifatnya yang sangat tidak stabil.¹⁸

Peroksidasi lipid merupakan serangkaian reaksi oksidatif dari asam lemak rantai panjang tidak jenuh membran fosfolipid yang menghasilkan degradasi fosfolipid, kerusakan membran, pembentukan hidrokarbon jenuh (etana, pentana), malondialdehid (MDA), dan lainnya. Lipid merupakan senyawa yang paling mudah teroksidasi dan menjadi target utama ROS melalui proses peroksidasi lipid.¹⁸

Kadar MDA plasma rata-rata manusia bervariasi antara 0,12 sampai dengan 1,71 $\mu\text{mol/L}$ serta bervariasi sesuai usia dan jenis kelamin. Kadar MDA pada laki-laki cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan wanita seusianya. Kadar MDA semakin meningkat sesuai dengan peningkatan usia. Kadar MDA pada individu yang memiliki diabetes melitus, stroke atau penyakit kronik lainnya dapat mencapai 3,7 $\mu\text{mol/L}$. Pengambilan sampel darah dari vena perifer untuk mengukur kadar MDA mencerminkan stres oksidatif seluruh tubuh. Pengukuran kadar MDA darah (plasma) menggunakan metoda TBARS (*thiobarbiturate acid reactive substance*).¹⁸

Penelitian di Cimahi (2015) menunjukkan terjadi peningkatan kadar MDA plasma pada trauma akustik.⁷ Penelitian lain di Surabaya (2020) menunjukkan terdapat hubungan yang signifikan antara kadar MDA plasma dengan ambang dengar pada frekuensi 4000 Hertz (Hz) setelah paparan tembakan senjata pada Siswa Sekolah Polisi Negara (SPN).²⁰

2.5.2.2 Glutation Peroksidase

Glutation peroksidase merupakan enzim antioksidan penting yang dapat mendetoksifikasi hidrogen peroksida dan lemak peroksida dengan

menggunakan GSH sebagai agen reduksi, untuk kemudian dapat melindungi sel dari kerusakan oksidatif.⁶² Pada faktanya, metabolisme glutathione merupakan salah satu mekanisme pertahanan antioksidan terpenting, karena mempunyai sistem eliminasi radikal yang paling efektif. GSH dan antioksidan yang berkaitan serta reaksi detoksifikasi merupakan sistem perlindungan intraselular yang paling penting pada stria vaskularis dan organ korti di mana terdapat aktivitas SOD, CAT, dan GPx yang tinggi. Sel-sel rambut luar tampaknya paling rentan terhadap kerusakan radikal bebas di dasar koklea, sementara sel-sel pendukung memiliki kapasitas bertahan yang melebihi sel-sel rambut. Ini dapat dijelaskan karena pola yang berbeda dari ekspresi protein antara jenis sel koklea. Telah ditunjukkan bahwa kadar glutathione lebih tinggi di apikal sel-sel rambut luar daripada di dasarnya.⁶³

Di dalam darah, secara umum terdapat dua tipe GPx yang dapat diidentifikasi, yaitu GPx1 dalam eritrosit (eGPx) dan GPx3 dalam plasma (pGPx). Pengukuran kadar GPx darah (eritrosit) menggunakan metoda *colorimetric assay* dari *Oxford Biomedical Research* FR 17. Prinsip kerjanya adalah pemeriksaan secara tidak langsung dari aktivitas c-GPx dan GSSG. Kadar normal aktivitas enzim GPx1 rata-rata pada dewasa sehat adalah $13,8 \pm 7,3$ mg/L.⁶⁴ Penelitian di Cimahi (2015) menunjukkan terjadi penurunan kadar GPx eritrosit pada trauma akustik.⁷

2.6 Skrining Trauma Akustik

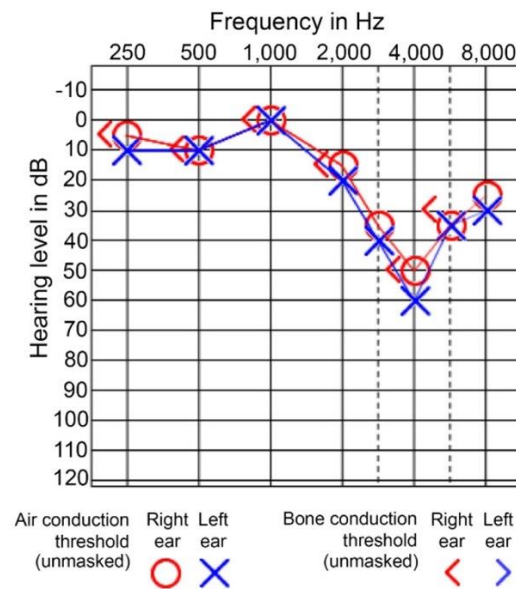
Skrining trauma akustik dapat dilakukan melalui anamnesis dan pemeriksaan audiometri nada murni. Ditanyakan mengenai riwayat paparan bising (meliputi: jenis bising dan lama paparan) dan keluhan yang dirasakan setelah terpapar bising. Keluhan dapat berupa gangguan dengar dan tinitus. Audiogram dapat membedakan antara gangguan dengar konduktif, sensorineural, dan campuran. Pemeriksaan lain yang dapat dilakukan untuk mendiagnosis trauma akustik adalah pemeriksaan emisi

otoakustik/*otoacoustic emission* (OAE), tes diskriminasi, dan *brainstem evoked response audiometry* (BERA). Penelitian Kapoor N et al (2019) menunjukkan bahwa pemeriksaan OAE lebih unggul untuk skrining NIHL di lingkungan militer karena pemeriksaannya cepat dan mudah, namun tetap mampu mendeteksi kerusakan koklea akibat bising.⁶⁵

2.6.1 Audiogram

Audiometri nada murni memeriksa intensitas terendah yang dapat didengar seseorang pada beberapa frekuensi bunyi (ambang dengar). Pemeriksaan ini merupakan pemeriksaan dasar untuk gangguan dengar. Hantaran udara dan hantaran tulang akan diperiksa pada frekuensi 125 Hz sampai 8000 Hz. Frekuensi tinggi mempunyai lokasi di basal koklea dan frekuensi rendah di apeks koklea. Kerusakan akibat frekuensi nada tinggi akan mengenai daerah di dekat foramen ovale dan frekuensi nada rendah di daerah apeks.¹⁶

Gambaran khas trauma akustik pada audiogram yaitu adanya penurunan pada frekuensi 3000-6000 Hz, terutama di 4000 Hz sebagai akibat dari hilangnya atau rusaknya sel rambut luar koklea dan degenerasi ganglion spiralis yang dikenal sebagai *Boilermaker's notch* atau C₅-dip yang dapat terlihat pada Gambar 2.12 di bawah ini.⁶⁶ Paparan bising yang berlangsung terus menerus, menyebabkan *notch* tersebut akan lebih dalam dan lebar mengenai frekuensi tinggi dan rendah lainnya, akibatnya membentuk *temporal plateau*.¹⁶



Gambar 2.12 Gambaran audiogram khas akibat bising.

Dikutip dari: Natarajan R et al. (2023)¹⁶

OSHA menentukan gangguan dengar akibat pekerjaan apabila terjadi penurunan ambang dengar 10 dB pada frekuensi 2000, 3000, dan 4000 Hz. Meskipun tidak ada gangguan dengar, tapi gambaran audiogram ini sebagai penanda adanya PTS.⁶ Penelitian Sasongko menunjukkan 23,5% prajurit yang tidak menggunakan APP saat latihan menembak meriam memberikan gambaran audiogram trauma akustik.⁷ Penelitian lainnya di Surabaya (2020) pada Siswa Sekolah Polisi Negara yang melakukan latihan menembak senapan menunjukkan gambaran audiogram berupa penurunan ambang dengar pada frekuensi 4000 Hz sebesar 56%.²⁰

2.6.2 *Otoacoustic Emission*

Otoacoustic emission (OAE) adalah suatu prosedur yang cepat noninvasif, sensitif dan objektif untuk mendeteksi gangguan dengar yang diakibatkan oleh gangguan fungsi pendengaran pada telinga tengah dan

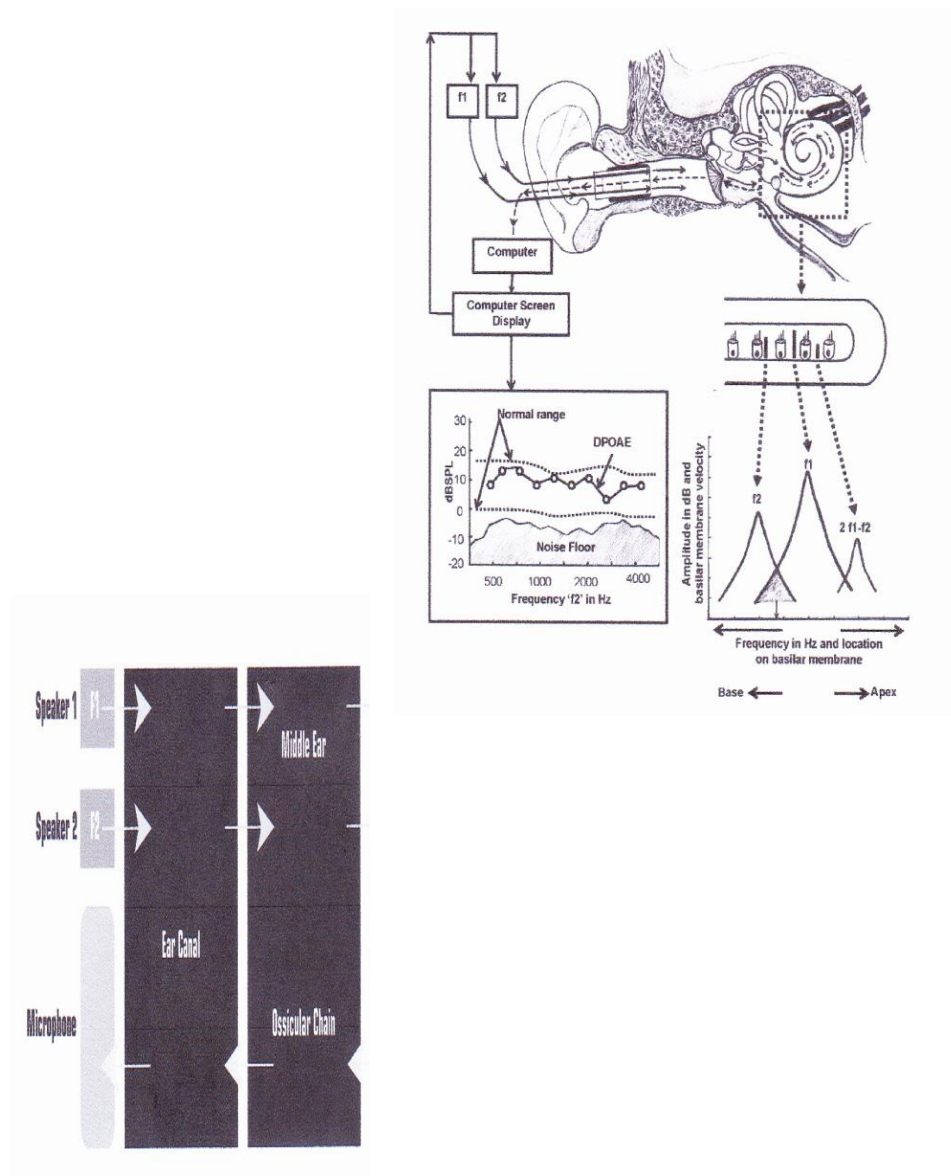
telinga dalam (koklear). Dengan kata lain, OAE adalah teknik yang mudah dan telah terbukti untuk mengidentifikasi seseorang yang memiliki risiko gangguan pendengaran. Dengan kombinasi bersama timpanometri untuk mengukur telinga tengah, OAE juga berperan penting untuk menyingkirkan atau memastikan gangguan fungsi sel rambut luar.⁶⁷ Keberadaan OAE merupakan penanda fungsi koklea yang normal/sehat bukan sebagai tes pendengaran.⁶⁸

Emisi otoakustik merupakan suara dengan intensitas rendah yang diproduksi oleh koklea baik secara spontan ataupun menggunakan stimulus, yang disebabkan oleh gerakan sel-sel rambut luar telinga dalam.⁶⁹ Sel rambut luar memperkuat intensitas dan mempertajam puncak gelombang suara yang merambat ke koklea. Distorsi elektromekanis nonlinier yang dihasilkan gelombang suara oleh motilitas sel rambut luar dapat diukur oleh *distortion product otoacoustic emission* (DPOAE). Emisi otoakustik juga merupakan pantulan yang disebabkan oleh hamburan acak dari gelombang berjalan yang masuk.⁶⁸

Bunyi *click* dengan intensitas sedang atau kombinasi yang sesuai dari dua *tone* dapat mencetuskan pergerakan sel rambut luar, kemudian terjadi biomekanik dari membran basilaris sehingga menghasilkan amplifikasi energi mekanis dalam koklea yang diperbanyak, keluar melalui sistem telinga tengah dan membran timpani menuju liang telinga. Getaran dari membran timpani menghasilkan sinyal bunyi (emisi otoakustik), yang dapat diukur dengan mikrofon.⁶⁹

DPOAE ditimbulkan melalui *probe* yang ditempatkan di meatus akustikus eksternus yang memancarkan dua suara pada tingkat intensitas yang ditentukan yaitu L1 dan L2 dan dua frekuensi (f_1 dan f_2). Mikrofon dapat mendeteksi emisi otoakustik. Stimulasi koklea dengan dua nada murni, f_1 dan f_2 , menghasilkan serangkaian produk distorsi.⁶⁸

Gambar 2.13 berikut menggambarkan skema/pathway dari sinyal suara dengan dua speaker yang dipancarkan dan yang diterima oleh alat DPOAEs.⁶⁷

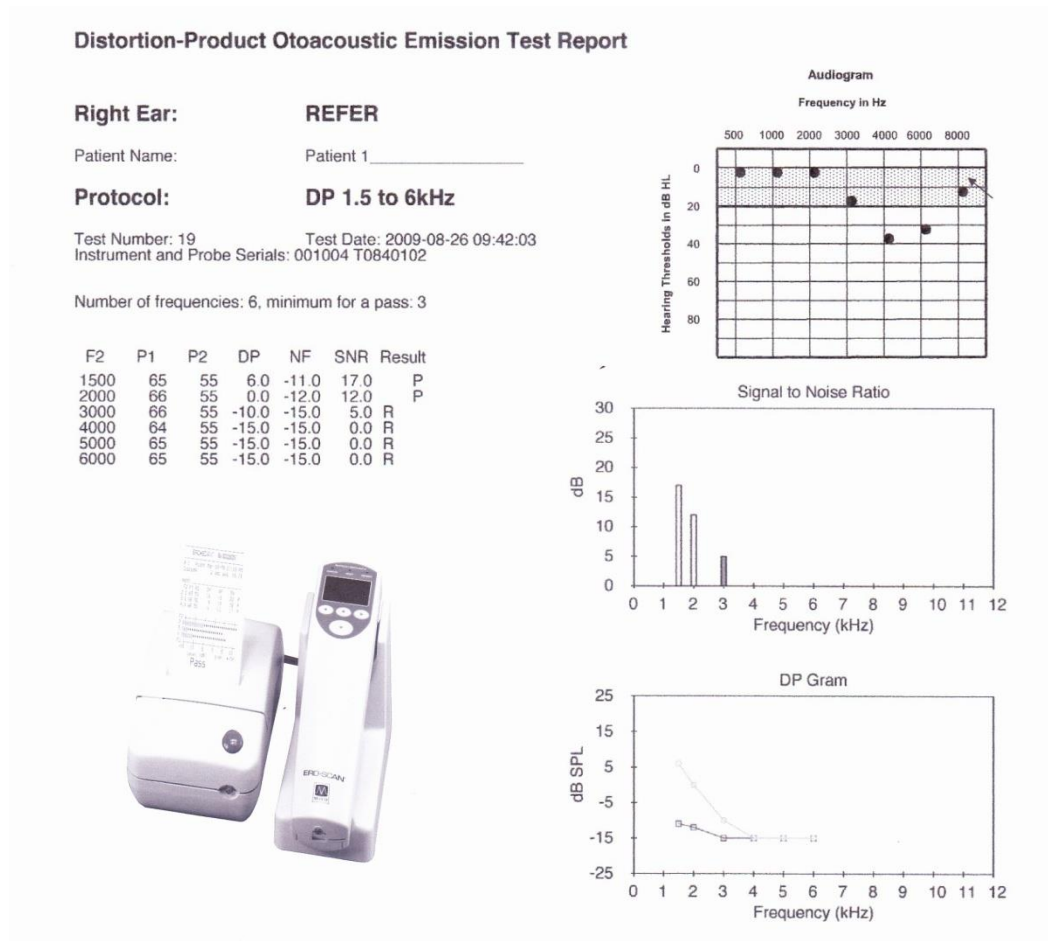


Gambar 2.13 Pathway sinyal yang dipancarkan dan diterima oleh DPOAEs.

Dikutip dari: Dhar S & Hall JW III (2010)⁶⁷

DPOAEs dapat memperoleh frekuensi yang spesifik dan dapat digunakan untuk merekam frekuensi yang lebih tinggi daripada TEOAEs. DPOAEs dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan koklea akibat akibat bising, obat-obat ototoksik, dan skrining pendengaran baru lahir.⁶⁸

Gambar 2.14 menunjukkan alat serta hasil/nilai pengukuran DPOAEs pada tiap frekuensi. Batas PASS pada DPOAEs, yakni apabila *signal to noise ratio* (SNR) lebih dari 6 pada tiap frekuensi.⁶⁷



Gambar 2.14 Hasil/nilai pengukuran pada DPOAEs.

Dikutip dari: Dhar S & Hall JW III (2010)⁶⁷

Penelitian di Cimahi (2015) menunjukkan 47,1% prajurit yang tidak menggunakan APP saat latihan menembak meriam Howitzer 105 memberikan gambaran DPOAE *refer.*⁷

2.7 Program Konservasi Pendengaran

Konservasi pendengaran adalah program yang bertujuan untuk mencegah atau mengurangi kerusakan atau kehilangan pendengaran tenaga kerja akibat kebisingan di tempat kerja.²⁴

Peraturan Perundangan terkait Program Konservasi Pendengaran (PKP) terdiri atas beberapa Undang-Undang, Peraturan Pemerintah, Kepres dan peraturan tingkat menteri. Sebagai contoh adalah Undang-Undang (UU) No. 1 tahun 1970 tentang keselamatan kerja, kemudian UU no 13 tahun 2003 tentang tenaga kerja, yang mewajibkan perusahaan memiliki sistem manajemen K3 (SM-K3) terkait dengan sistem manajemen perusahaan.²⁴ Program Konservasi Pendengaran (PKP) merupakan program yang diterapkan di lingkungan tempat kerja untuk mencegah gangguan pendengaran akibat terpajan kebisingan pada pekerja.²⁴

Program tersebut terdiri atas tujuh komponen yaitu:²⁴

1. Identifikasi dan analisis sumber bising
2. Kontrol kebisingan dan kontrol administrasi
3. Tes audiometri berkala
4. Alat pelindung diri
5. Motivasi dan edukasi pekerja
6. Pencatatan dan pelaporan data
7. Evaluasi program

Identifikasi dan analisis sumber bising biasanya dilakukan dengan alat *sound level meter* (SLM) yang dapat mengukur kebisingan secara sederhana. *Octave band analyzer* mengukur kebisingan secara lebih rinci pada tiap frekuensi, sehingga dapat dibuat peta kebisingan di setiap tempat kerja yang dicurigai terpajan bising. Tujuan survey kebisingan adalah untuk

mengetahui adanya sumber bising yang melebihi nilai ambang batas (NAB) yang diperkenankan dan mengetahui apakah bising mengganggu komunikasi pekerja, atau perlu mengikuti PKP. Selain hal tersebut juga untuk menentukan apakah daerah tersebut memerlukan alat perlindungan pendengaran, menilai kualitas bising untuk pengendalian serta menilai apakah program pengendalian bising telah berjalan baik. Survei kebisingan meliputi survey area dan survei dosis pajanan harian dan engineering survey.²⁴

Pada program pencegahan gangguan pendengaran terdapat tiga hal yang dapat mengontrol gangguan pendengaran yaitu:²⁴

1. Kontrol kebisingan yang meliputi penggantian mesin yang tingkat bisingnya tinggi, melakukan isolasi sumber bising dengan menggunakan *sound box*, *sound enclosure*, pembatasan transmisi sumber bising (*sound barrier: sound proof materials*), atau disain akustik diperbaiki dengan penggunaan *sound absorbent materials*.
2. Kontrol administrasi dengan merotasi tempat kerja, pengaturan produksi dengan cara menghindari bising yang konstan, menggunakan kontrol dan monitor kebisingan, melaksanakan pelatihan dan sosialisasi PKP untuk menjelaskan fungsi pendengaran dan perlindungannya.
3. Penggunaan alat pelindung pendengaran yang dapat mengurangi jumlah energi akustik pada mekanisme pendengaran. Terdapat tiga jenis alat pelindung pendengaran yaitu *earplugs*, *earmuffs*, dan *helmet*.

Untuk mencapai keberhasilan program konservasi pendengaran, diperlukan pengetahuan tentang seluk beluk pemeriksaan audiometri, kemampuan, dan keterampilan pelaksana pemeriksaan audiometri, kondisi audiometer, dan penilaian audiogram. Petugas pelaksana audiometri seharusnya mendapat pelatihan yang memadai dan bersertifikat. Sebaiknya dilakukan pengamatan kepada pelaksana pemeriksaan audiometri. Hasil

audiogram dicatat dan ditindak lanjuti, apabila terdapat perubahan ambang pendengaran harus segera dicari penyebabnya.²⁴

Jajaran militer, merupakan suatu lingkup kerja yang sarat dengan kebisingan, Sebagai contoh bising maupun ledakan dari alat utama sistem persenjataan (alutsista), baik pada saat latihan maupun operasi militer. Di militer Amerika, sudah mempunyai suatu badan maupun standar prosedur operasional baku tentang program konservasi pendengaran bagi para tentaranya, misalnya *US Army Hearing Program* tahun 2018, maupun *Hearing Conservation Program in Department of Defence Instruction (DoDI)* tahun 2018.^{9,28} Markas Besar TNI juga sudah selayaknya memiliki program konservasi pendengaran (PKP) untuk melindungi fungsi pendengaran prajuritnya, agar tidak terjadi kecacatan ketulian akibat bising lingkungan kerja.

2.8 Alat Pelindung Pendengaran

Alat pelindung pendengaran (APP) digunakan untuk mengurangi jumlah paparan dari sumber bising berbahaya. Alat pelindung pendengaran berupa *earplug* dipatenkan pada tahun 1884 dan digunakan pada Perang Dunia I. Mengalami perkembangan sampai kemudian dibuat dalam bentuk *earmuff* untuk personil militer pesawat tempur pada Perang Dunia II. *Foam earplug* mulai diproduksi tahun 1970 dan *earmuff* yang dilengkapi sistem elektronik mulai digunakan pada tahun 1980.²⁶

Efektifitas alat pelindung pendengaran tergantung dari jenis pekerjaan/kegiatan, efek reduksi bising yang diharapkan (NRR: *Noise Reduction Rating* dalam dB), kenyamanan saat digunakan, serta ketepatan insersi alat pelindung pendengaran ke dalam liang telinga.¹ Idealnya alat pelindung pendengaran harus menutupi seluruh bagian dari liang telinga. Daya hambat suara juga tergantung dari material yang menyusunnya. Lueg mempatenkan aplikasi *Active Noise Reduction Technology* untuk menilai efek

reduksi suara dari alat pelindung pendengaran yang masih dipakai sampai saat ini. OSHA mengadopsi *noise reduction rating* (NRR) dalam membuat panduan program konservasi pendengaran dengan tujuan untuk kepatuhan penggunaan APP dan untuk memperkirakan ketepatan atenuasi APP. Penggunaan NRR secara global di seluruh dunia dan ditetapkan dengan memperhitungkan konversi statistik dan faktor koreksi 50%, sehingga didapatkan perhitungan untuk $NRR = (NRR - 7) / 2$.⁶

Sesuai dengan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia nomor 5 tahun 2018, jika pengukuran tempat kerja melebihi dari NAB, maka harus dilakukan pengendalian. Salah satu upaya pengendalian tempat kerja yang terpapar suara bising berupa program pencegahan gangguan dengar dengan cara menggunakan alat pelindung diri yang sesuai.¹¹ Menurut *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) paparan bising lebih dari 90 dB harus menggunakan alat pelindung pendengaran.⁶ Adapun pelindung diri yang disediakan pada saat latihan menembak meriam howitzer 105 berupa *earplugs* dan *earmuff*.⁷ Penggunaan dua APP ini secara bersamaan sangat disarankan untuk bising impulsif di atas 140 dB.⁶ Untuk mengurangi efek bising meriam Howitzer sebesar 148,6 dB maka diperlukan reduksi bising minimal sebesar 63,6 dB untuk 8 jam paparan. Diperlukan alat pelindung pendengaran yang dimodifikasi menjadi alat yang nyaman sehingga prajurit mau memakainya pada saat latihan dengan intensitas bising yang melebihi NAB atau paparan bising yang berisiko trauma akustik.

2.8.1 Earplug

Earplug adalah penyumbat telinga yang dimasukkan ke dalam liang telinga, bentuknya dapat dilihat pada Gambar 2.8. *Earplug* lebih cocok digunakan oleh orang yang menghabiskan waktu lama di lingkungan yang bising. Kelebihan *earplugs* ialah lebih meredam suara daripada *earmuff*.

Earplug dapat menurunkan intensitas kebisingan sebesar 20 – 30 dB. Ada beberapa jenis *earplug* di antaranya: *foam plug*, *pre moulded plug*, *banded earplug*, *detectable earplug*, *musician's earplug*, dan *costum moulded earplug*.²³ *Earplug* yang tersedia di pasaran memiliki satu bentuk dan ukuran yang sama sesuai merek, sehingga penggunaannya mungkin tidak maksimal sebagai pelindung pendengaran dari bising apabila tidak sesuai dengan bentuk dan ukuran liang telinga pemakai. Penelitian di Cina (2021) menyebutkan hanya 70% (N = 503) pekerja yang menggunakan *earplug* mendapatkan proteksi penuh APP sesuai NRR.²⁷



Gambar 2.15 *Earplug*.

Dikutip dari: 3M. 2023.²³

Costum moulded earplug atau *costum earmould* merupakan jenis *earplug* yang disesuaikan dengan bentuk liang telinga masing-masing individu dengan cara dilakukan pencetakan dengan menyuntikan material *compound* ke dalam liang telinga dan mengeras dalam beberapa menit. *Costum earmould* ini terbuat dari bahan silikon lembut yang nyaman digunakan, memiliki ukuran sesuai ukuran liang telinga masing-masing individu, memiliki NRR 30 dB, dan dapat digunakan berulang karena mudah

dibersihkan. Penyedia layanan pembuatan alat bantu dengar juga menyediakan layanan pembuatan *earmould* ini untuk keperluan perlindungan terhadap paparan bising (Gambar 2.16). Fungsi *earmould* pada alat bantu dengar adalah sebagai cetakan tempat saluran *speaker* mentransmisikan suara yang sudah mengalami proses amplifikasi ke liang telinga dan memberikan efek oklusi yang meningkatkan kualitas suara yang didengar.⁷⁰



Gambar 2.16 *Custom earmould*

Dikutip dari: Dokumentasi pribadi

Penelitian yang dilakukan Stufts J et al. (2012) mengemukakan bahwa *custom earplugs* memiliki fungsi reduksi bising yang lebih konsisten daripada *non-custom earplugs*.⁷¹ Penelitian pada pekerja pabrik di Cina ditemukan kepatuhan penggunaan alat pelindung pendengaran jenis *earmould* lebih tinggi dibandingkan jenis *foam earplug*.²⁷

2.8.2 Earmuff

Earmuff adalah pelindung telinga yang penggunaannya dipasangkan di helm atau diikat ke kepala seperti menggunakan *headphone*, bentuk

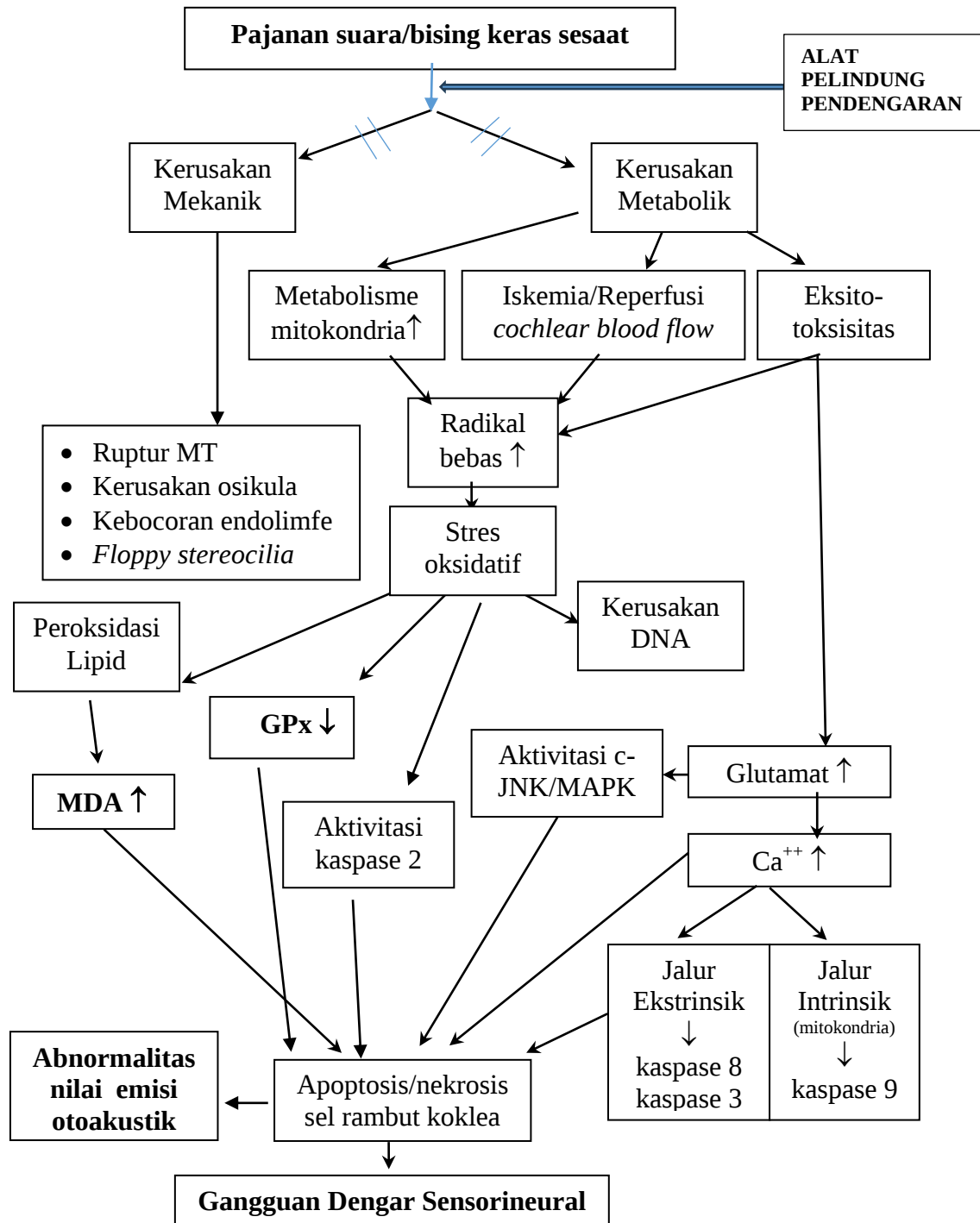
earmuff dapat dilihat pada Gambar 2.7. *Earmuff* dapat dilepas dengan mudah dan cocok untuk penggunaan intermiten seperti dalam situasi ketika orang berjalan masuk dan keluar dari area yang bising. *Earmuff* dapat menurunkan intensitas kebisingan sebesar 25-30 dB. Terdapat beberapa tipe *earmuff*, di antaranya yaitu *passive earmuff*, *helmet mounted earmuff*. *Helmet* selain berfungsi sebagai pelindung kepala, juga dapat berfungsi sebagai alat pelindung telinga yang memproteksi telinga terhadap suara bising. Bagian dari *helmet* yang berfungsi melindungi telinga disebut *ear cups* atau *ear protectors*. *Ear cups* terbuat dari bahan yang lembut dan empuk, seperti busa atau spons, yang membantu meredam suara dan mencegah telinga terpapar suara dengan frekuensi tinggi yang berlebihan atau berbahaya. *Helmet* dapat mengurangi kebisingan 40 sampai 50 dB.⁷²



Gambar 2.17 *Earmuff*

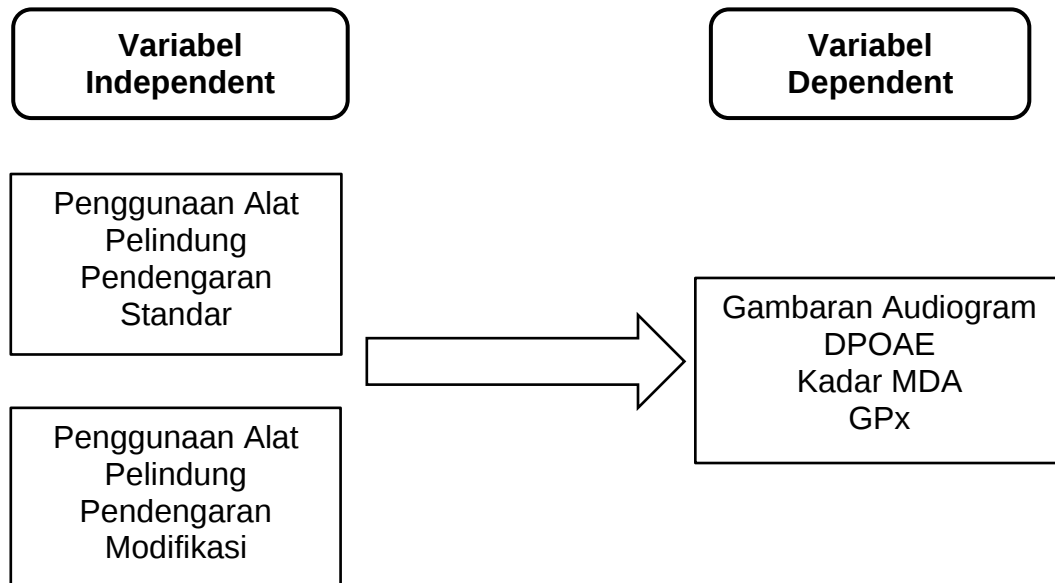
Dikutip dari: 3M. 2023.²³

2.9 Kerangka Teoritis



Gambar 2.18 Kerangka teori

2.10 Kerangka Konsep



2.11 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan pada kerangka pemikiran di atas, dapat dibuat hipotesis yaitu: “Alat pelindung pendengaran modifikasi lebih efektif daripada alat pelindung pendengaran standar terhadap reduksi bising impulsif dengan intensitas sangat tinggi dan kondisi stres oksidatif pada sel rambut luar koklea dengan gambaran audiogram normal, gambaran DPOAE pass, kadar GPx meningkat/tetap, dan kadar MDA menurun/tetap”.