

## BAB 3

# GELOMBANG BUNYI

Bunyi merupakan sesuatu yang sangat penting dalam kehidupan kita. Dengan suara kita dapat berkomunikasi. Kita bisa merasakan kesenangan dan kepuasan pada saat mendengarkan musik. Bunyi juga memberikan banyak manfaat bagi sebagian besar hewan. Sejumlah hewan berkomunikasi juga dengan menggunakan bunyi – ikan paus dapat berkomunikasi dengan menggunakan suara pada jarak ratusan kilometer. Kelelawar menggunakan gelombang bunyi sebagai sarana navigasi pada saat mereka terbang. Manusia juga menggunakan gelombang bunyi untuk berbagai keperluan lain, seperti pendeteksian kedalaman laut (dengan menggunakan sonar) dan diagnosis medis.

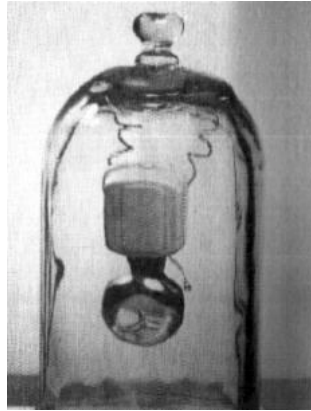
### 3.1 Karakteristik Bunyi

Bunyi berhubungan dengan indera pendengaran kita, yang berarti berhubungan juga dengan fisiologi telinga dan fisiologi otak kita, yang berfungsi untuk menginterpretasikan bunyi yang mencapai telinga kita. Istilah *bunyi* juga berhubungan dengan gejala fisika yang menstimulir telinga kita, yaitu gelombang longitudinal.

Secara umum, terdapat tiga aspek yang berhubungan dengan bunyi. *Pertama*, bunyi harus memiliki sumber, sebagaimana halnya gelombang-gelombang yang lain. Sumber bunyi adalah getaran benda. *Ke dua*, terjadi peristiwa transfer energi dari sumber dalam bentuk *gelombang longitudinal*. Dan *ke tiga*, bunyi tersebut dideteksi oleh telinga atau alat penerima (mis. *microphone*). Dalam bab 2 kita telah melihat bagaimana membran suatu drum menghasilkan bunyi di udara dan kita telah terbiasa menganggap bahwa gelombang bunyi senantiasa merambat di udara, karena gendang telinga kita hampir selalu memiliki kontak langsung dengan udara. Namun sebenarnya bunyi juga dapat merambat di air. Bunyi dua buah batu yang saling beradu di dalam kolam dapat didengar oleh perenang yang menyelam di kolam tersebut. Jika anda menempelkan telinga anda ke tanah atau jalan, anda dapat mendengar bunyi kereta atau truk yang akan datang. Meskipun di dalam kondisi terakhir ini gendang telinga tidak kontak langsung dengan tanah atau jalan, namun ini tetap membuktikan bahwa gelombang longitudinal dapat merambat melalui tanah.

Gelombang longitudinal, yang pada pembahasan selanjutnya akan diwakili oleh gelombang suara, memerlukan medium dalam perambatannya. Dengan demikian, suara

tidak bisa merambat, jika tidak terdapat medium. Hal ini pertama kali dibuktikan oleh Robert Boyle, dimana dalam eksperimennya ia memperlihatkan bel yang dideringkan di dalam tabung hampa udara tidak akan terdengar dari luar (lihat gambar 3.1).



Gambar 3.1

*Suara tidak dapat merambat dalam ruang hampa  
(Lester V, Bergman & Assoc.Inc)*

### 3.2 Cepat Rambat Bunyi

Cepat rambat bunyi berbeda-beda untuk setiap material, yang menjadi medium perambatan gelombang. Di udara yang bersuhu  $0^{\circ}\text{C}$  dan bertekanan 1 atm, bunyi merambat dengan kecepatan 331 m/detik. Pada persamaan 2.7, kita lihat bahwa cepat rambat bunyi tergantung pada modulus elastisitas dan keapatan material. Dengan demikian pada helium, yang kerapatannya jauh lebih kecil dari udara tapi modulus elastisitasnya tidak jauh berbeda, bunyi akan merambat tiga kali lebih cepat dibandingkan dengan udara. Di dalam zat cair dan zat padat, yang tingkat kompresibilitasnya lebih kecil sehingga modulus elastisitasnya jauh lebih besar, bunyi merambat dengan kecepatan yang cukup tinggi. Kecepatan bunyi dalam beberapa material dapat dilihat pada tabel 3.1.

*Tabel 3.1 – Cepat rambat bunyi dalam beberapa material*

| Material                          | Cepat rambat bunyi (m/detik) |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Udara ( $0^{\circ}\text{C}$ )     | 331                          |
| Helium ( $20^{\circ}\text{C}$ )   | 1005                         |
| Hidrogen ( $20^{\circ}\text{C}$ ) | 1300                         |
| Air                               | 1440                         |
| Air laut                          | 1560                         |
| Besi dan Baja                     | sekitar 5000                 |
| Kaca                              | sekitar 4500                 |
| Alumunium                         | sekitar 5100                 |
| Kayu keras                        | sekitar 4000                 |

Pada gas, cepat rambat bunyi sangat bergantung pada temperatur. Sebagai contoh, cepat rambat bunyi di udara meningkat sebesar 0.60 m/detik untuk setiap derajat celsius kenaikan suhu.

$$v = 331 + 0.60 T \text{ (m/detik)} \quad (3.1)$$

dimana T adalah temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ). Sebagai contoh, pada temperatur  $20^{\circ}\text{C}$  bunyi akan merambat di udara dengan kecepatan :  $v = [331 + (0.60).(20)]\text{m/detik} = 343 \text{ m/detik}$ .

### 3.3 Tinggi Bunyi

Terdapat dua hal mengenai bunyi yang dapat dirasakan langsung oleh pendengar, yaitu *keras bunyi (loudness)* dan *tinggi nada (pitch)*. Kedua besaran tersebut dapat diukur secara fisis. Keras bunyi berhubungan dengan energi yang terkandung di dalam gelombang bunyi. Tinggi bunyi berhubungan dengan nilai frekwensi gelombang bunyi tersebut. Sebagai contoh umum, kita dapat mengatakan bahwa suara biola atau seruling itu *tinggi*, sementara suara bass itu *rendah*.

Telinga manusia dapat menangkap gelombang bunyi berfrekuensi antara 20 Hz dan 20,000 Hz. Interval ini dinamakan *daerah audibel*. Bunyi berfrekwensi di atas 20,000 Hz dinamakan *ultrasonik* (berbeda dengan istilah *supersonik*, yang artinya adalah kecepatan yang melebihi kecepatan suara). Beberapa hewan dapat mendengar gelombang ultrasonik, misalnya anjing dapat mendengar bunyi hingga 30,000 Hz dan kelelawar dapat mendeteksi bunyi berfrekwensi 100,000 Hz. Ultrasonik memiliki sejumlah manfaat, misalnya di bidang kedokteran.

Gelombang bunyi berfrekuensi di bawah 20 Hz, dinamakan *infrasonik*. Sumber-sumber gelombang infrasonik antara lain gempa bumi, guntur (gledek), gunung berapi, dan gelombang-gelombang yang dihasilkan mesin-mesin berat. Gelombang yang terakhir ini dapat menimbulkan gangguan pada pekerja, meskipun tidak terdengar namun dapat merusak tubuh. Gelombang berfrekuensi rendah ini menimbulkan resonansi pada organ-organ tubuh, sehingga terjadi iritasi atau gerakan-gerakan yang tak biasa pada organ-organ tersebut.

### 3.4 Intensitas Bunyi

*Intensitas* didefinisikan sebagai jumlah energi yang dipindahkan gelombang per-satuan luas dalam satu satuan waktu. Karena *energi per-waktu* itu adalah *daya*, maka intensitas memiliki satuan daya per-satuan luas, atau watt/meter<sup>2</sup> ( $\text{W/m}^2$ ). Intensitas

tergantung pada amplitudo gelombang (tepatnya berbanding lurus dengan kwadrat amplitudo, lihat subbab 2.4).

Telinga manusia dapat mendeteksi bunyi dengan intensitas serendah  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  dan setinggi  $1 \text{ W/m}^2$  (sebenarnya bisa lebih tinggi, namun menyakitkan). Dengan demikian berarti pendengaran manusia memiliki rentangan (interval) kepekaan sebesar  $10^{12}$ , dari yang terendah hingga yang tertinggi. Suatu interval yang sangat besar. Diperkirakan, karena interval intensitas yang bisa diterima telinga manusia sangat besar, maka kekerasan bunyi yang dideteksi telinga tidak berbanding lurus terhadap intensitas bunyi. Memang benar bahwa kita mendengar suara yang lebih keras jika intensitasnya lebih besar, namun untuk mendapatkan suara yang dua kali lebih keras, diperlukan intensitas sepuluh kali lipat dari sumber bunyi. Jadi, bunyi berintensitas  $10^{-9} \text{ W/m}^2$  terdengar dua kali lebih keras dari bunyi berintensitas  $10^{-10} \text{ W/m}^2$  dan bunyi berintensitas  $10^{-2} \text{ W/m}^2$  terdengar dua kali lebih keras dari bunyi berintensitas  $10^{-3} \text{ W/m}^2$ .

Berdasarkan hubungan antara penilaian subyektif dan hasil pengukuran fisis inilah dibuat suatu besaran yang dinamakan *tingkat intensitas*,  $\beta$ , dengan menggunakan skala logaritmis. Satuan pada skala ini adalah *bel*, atau yang lebih umum adalah *decibel* (dB), dimana  $0.1 \text{ bel} = 1 \text{ dB}$ . Hubungan antara besaran *tingkat intensitas* ( $\beta$ ) dan *intensitas* (I) adalah sebagai berikut :

$$\beta \text{ (dalam dB)} = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (3.2)$$

dimana  $I_0$  adalah intensitas referensi dan logaritma menggunakan basis 10. Untuk  $I_0$  biasanya digunakan intensitas audibel minimum untuk rata-rata manusia, yaitu intensitas terkecil yang bisa didengar rata-rata manusia, sebesar  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Dengan demikian, gelombang bunyi berintensitas  $I = 1 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$  memiliki tingkat intensitas :

$$\begin{aligned} \beta &= 10 \log \frac{10^{-10}}{10^{-12}} \\ &= 10 \log 100 \\ &= 20 \text{ dB} \end{aligned}$$

Jika perhatikan persamaan 3.2 dan contoh perhitungan di atas, penguatan intensitas sebesar 10 kali lipat akan menaikkan tingkat intensitas sebesar 10 dB dan penguatan intensitas sebesar 100 kali akan menaikkan tingkat intensitas sebesar 20 dB (karena

$\log 100 = 2$ ). Perhatikan juga bahwa intensitas bunyi yang terkecil yang dapat didengar rata-rata manusia ( $10^{-12}$  dB) akan menghasilkan tingkat intensitas senilai 0 dB.

Tabel 3.2 – Intensitas dan tingkat intensitas beberapa bunyi

| Sumber bunyi                | Tingkat Intensitas (dB) | Intensitas ( $\text{W/m}^2$ ) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Pesawat jet pada jarak 30 m | 140                     | 100                           |
| Batas bunyi menyakitkan     | 120                     | 1                             |
| Konser rock dalam ruang     | 120                     | 1                             |
| Sirine pada jarak 30 m      | 100                     | $1 \times 10^{-2}$            |
| Lalu lintas padat           | 70                      | $1 \times 10^{-5}$            |
| Pembicaraan normal          | 65                      | $3 \times 10^{-6}$            |
| Radio kecil                 | 40                      | $1 \times 10^{-8}$            |
| Bisikan                     | 20                      | $1 \times 10^{-10}$           |
| Desir angin di daun         | 10                      | $1 \times 10^{-11}$           |
| Ambang pendengaran          | 0                       | $1 \times 10^{-12}$           |

### Contoh 3.1 :

Sebuah *loudspeaker* berkualitas tinggi dinyatakan dapat mereproduksi bunyi dengan frekwensi antara 30 Hz hingga 18,000 Hz, dengan fluktuasi tingkat intensitas  $\pm 3$  dB pada kekuatan (volume) penuh. Artinya, bunyi dalam interval frekwensi ini hanya akan berubah maksimal 3 dB dari tingkat intensitas rata-rata. Berapa besarnya perubahan intensitas untuk perubahan tingkat intensitas maksimum sebesar 3 dB ?

### Jawab :

Kita namakan intensitas rata-rata  $I_1$  dan tingkat intensitas rata-rata  $\beta_1$ . Pada intensitas maksimum, akan diperoleh tingkat intensitas sebesar  $\beta_2 = \beta_1 + 3$ . Jadi

$$\begin{aligned}\beta_2 - \beta_1 &= 10 \log \frac{I_2}{I_0} - 10 \log \frac{I_1}{I_0} \\ 3 \text{ dB} &= 10 \left( \log \frac{I_2}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0} \right) \\ &= 10 \log \frac{I_2}{I_1}\end{aligned}$$

karena  $(\log a - \log b) = \log a/b$ , maka  $\log(I_2/I_1) = 0.30$ .

Dengan menggunakan daftar logaritma atau kalkulator kita dapatkan bahwa  $I_2/I_1 = 2$ , yang berarti  $I_2$  dua kali lipat  $I_1$ .

Dari contoh soal di atas, perhatikan bahwa perubahan tingkat-bunyi sebesar 3 dB (identik dengan penggandaan intensitas) hanya menimbulkan perubahan kecil terhadap

keras bunyi yang teramati. Rata-rata manusia dapat mendeteksi perubahan tingkat intensitas minimal sebesar 1 dB.

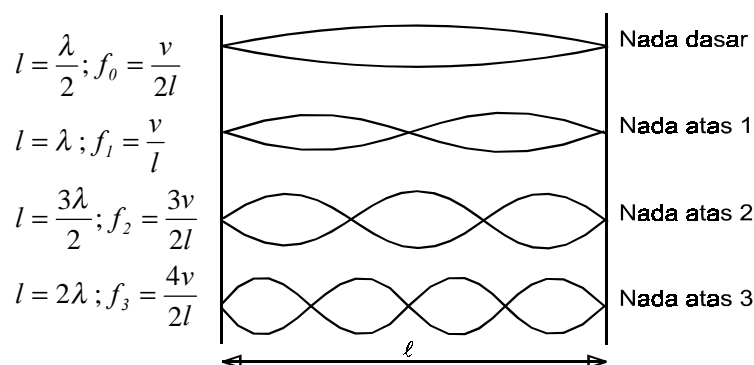
### 3.5 Sumber Bunyi

Sumber dari segala macam bunyi adalah getaran benda. Hampir setiap benda dapat bergetar, yang berarti hampir setiap benda dapat menghasilkan bunyi. Pada bagian berikut ini kita akan membahas beberapa sumber bunyi sederhana. Kemudian kita akan bahas juga bunyi-bunyian non-musikal, yaitu *noise*.

Pada instrumen musik digunakan berbagai macam bentuk getaran untuk menghasilkan bunyi. Suara pada *drum* dihasilkan oleh bentangan membran. Pada *Xylophone* atau *marimba* bunyi dihasilkan dari getaran potongan-potongan metal atau kayu. Banyak instrumen musik yang bunyinya dihasilkan oleh getaran senar atau dawai, seperti biola (*violin*), gitar, dan piano. Banyak juga yang memanfaatkan getaran kolom udara, seperti *flute*, seruling, terompet, dan pipa organa. Bunyi pada instrumen musik dihasilkan dengan jalan memukul, memetik, menggesek, atau meniup, yang semuanya akan menghasilkan gelombang tegak dengan frekwensi setara dengan frekwensi resonansi sumber getar.

#### 3.5.1 Senar

Jika suatu senar digetarkan, maka padanya akan terjadi gelombang tegak. Bentuk-bentuk gelombang tegak yang bisa terjadi pada senar yang bergetar diperlihatkan pada gambar 3.2 berikut. Ini merupakan dasar dari seluruh instrumen senar. Tinggi-nada yang dihasilkan pada umumnya ditentukan oleh frekuensi resonansi yang paling rendah, yaitu **nada dasar**. Nada dasar dihasilkan oleh getaran senar yang hanya memiliki dua simpul, masing-masing pada ujung senar.



Gambar 3.2  
Gelombang tegak pada senar

Pada gambar 3.2 di atas terlihat bahwa panjang gelombang *nada dasar* bernilai dua kali lipat panjang senar,  $\lambda = 2l$ ; sehingga frekwensinya menjadi  $f_0 = v/\lambda = v/2l$ , dimana  $v$  adalah cepat rambat gelombang pada senar. Sementara itu, *nada atas 1* ditimbulkan oleh gelombang pada senar, yang panjang gelombangnya sama dengan panjang senar  $\lambda = l$ , sehingga bunyi yang ditimbulkan *nada atas 1* ini memiliki frekuensi :  $f_1 = v/l$ . Secara umum, frekuensi nada dasar ( $f_0$ ) dan nada-nada atas ( $f_n$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$f_n = \frac{(n+1)v}{2l} \quad n = 0,1,2,3,\dots \quad (3.3)$$

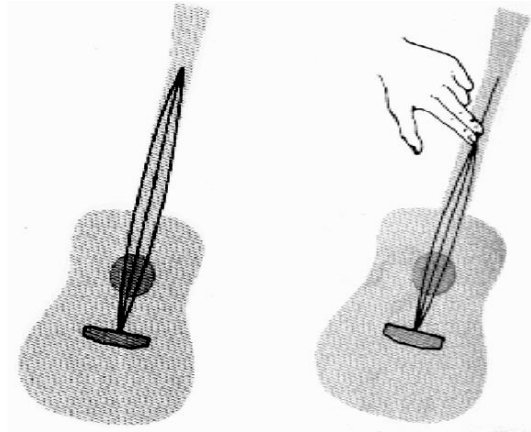
karena pada senar berlaku hubungan  $v = \sqrt{F/\mu}$ , dimana  $\mu = m/l$ , maka

$$f_n = \frac{(n+1)}{2l} \sqrt{\frac{Fl}{m}} \quad n = 0,1,2,3,\dots \quad (3.4)$$

Nilai  $n = 0$  digunakan untuk *nada dasar*,  $n = 1$  untuk *nada atas 1*,  $n = 2$  untuk *nada atas 2*, dan seterusnya.

Pada saat senar dipetik, seluruh komponen nada (nada dasar, nada atas 1, nada atas 2, dst.) cenderung muncul secara bersamaan, namun dengan amplitudo yang berbeda-beda. Hal ini mengakibatkan terjadinya superposisi pada senar. Jika senar suatu gitar dipetik pada posisi yang berbeda, misalnya pada posisi  $l/2$  dan  $l/4$ , akan terdengar perbedaan bunyi. Perbedaan ini timbul karena pemetikan senar pada kedua posisi yang berbeda tersebut akan menimbulkan komposisi-komposisi amplitudo yang berbeda pada nada dasar serta nada-nada atas. Akibatnya, hasil superposisi gelombangnya akan berbeda, yang menyebabkan timbulnya perbedaan *warna bunyi* (akan dibahas kemudian) dan terdeteksi oleh telinga kita sebagai perbedaan bunyi.

Jika senar sebuah instrumen musik (misalnya gitar, gambar 3.3) ditekan di bagian tengah, maka panjang efektif senar akan berkurang. Jika dalam keadaan ini senar di petik, panjang gelombang yang terjadi akan semakin kecil sehingga frekuensi yang dihasilkannya menjadi semakin tinggi. Dalam keadaan bebas (tidak ditekan) seluruh senar pada suatu gitar atau biola memiliki panjang yang sama, namun mereka memiliki tinggi nada yang berbeda yang disebabkan oleh perbedaan rapat massa ( $\mu = m/l$ ) masing-masing senar, yang menimbulkan perbedaan cepat rambat gelombang pada senar (lihat persamaan 2.5)



Gambar 3.3

*Penekanan bagian tengah senar akan memendekkan panjang gelombang, sehingga frekuensi bunyi meningkat*

Dengan demikian, cepat rambat gelombang lebih kecil pada senar yang lebih berat, sehingga frekuensinya lebih rendah pada panjang gelombang yang sama. Berbagai macam nada atau kord bisa diperoleh pada gitar dengan menekan senar-senar pada posisi-posisi tertentu.

**Contoh :**

Nada tertinggi pada sebuah piano memiliki frekuensi 150 kali lipat nada terrendahnya. Jika senar nada tertinggi memiliki panjang 10 cm dan seluruh senar diasumsikan memiliki rapat massa serta gaya tegang yang sama, berapa panjang senar nada terrendahnya ?

**Jawab :**

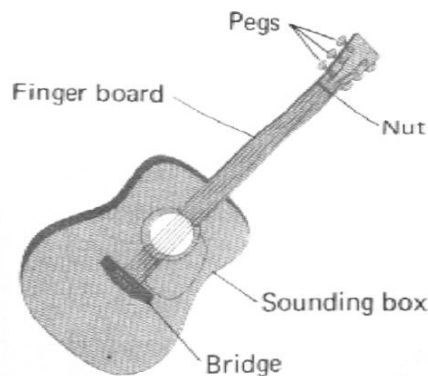
Karena seluruh senar memiliki rapat massa serta gaya tegang yang sama, maka cepat rambat gelombang pada seluruh senar sama. Dengan demikian frekuensi berbanding terbalik terhadap panjang senar ( $f = v/\lambda = v/2l$ ), sehingga

$$\frac{l_r}{l_t} = \frac{f_t}{f_r}$$

dimana indeks r dan t merupakan kependekan dari 'rendah' dan 'tinggi'. Berarti  $l_r = l_t(f_t/f_r) = (10 \text{ cm})(150) = 1500 \text{ cm}$ , atau 15 m. Ini menyebabkan bentuk piano menjadi 'aneh', karena sangat panjang. Oleh sebab itu, untuk nada rendah pada piano digunakan senar yang lebih berat sehingga *grand piano* memiliki panjang tidak lebih dari 3 m.

Bunyi yang dihasilkan senar suatu instrumen musik sebenarnya tidak cukup keras, karena terlalu tipis untuk bisa menimbulkan tekanan yang signifikan pada udara. Oleh karena itu hampir seluruh instrumen bersenar menggunakan perangkat penguat mekanis, yang dinamakan *kotak resonator* (*sounding box*), lihat gambar 3.4. Pada saat senar digetarkan, kotak resonansi juga ikut bergetar. Karena permukaan kontak kotak resonansi relatif jauh lebih luas, maka udara yang tertekan oleh getaran ini juga semakin banyak, sehingga bunyi terdengar lebih keras. Gitar elektrik tidak memerlukan kotak resonator, karena getaran senarnya diperkuat sebagai bunyi oleh penguat elektronik.

Suara yang dihasilkan manusia pada saat berbicara atau bernyanyi dihasilkan oleh getaran dua 'senar' yang ada di tenggorokan, yang disebut *pita suara*. Suara manusia memiliki rentang frekuensi yang cukup lebar, yang diatur oleh otot-otot yang mengendalikan ketebalan dan tegangan kedua pita suara tersebut. Tenggorokan, rongga mulut, dan rongga hidung memegang peranan seperti halnya kotak resonansi pada gitar atau biola.



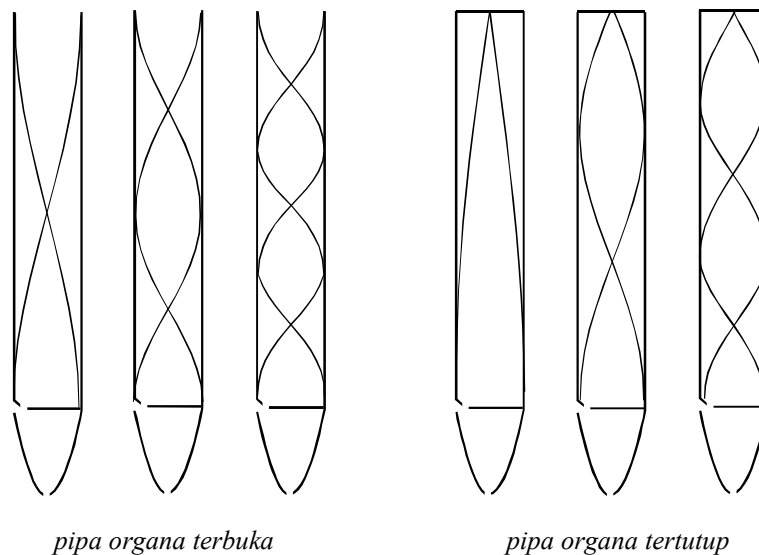
Gambar 3.4  
*Kotak resonansi (sounding box) pada gitar dapat memperkeras bunyi yang dihasilkan oleh getaran senar.*

### 3.5.2 Getaran Kolom Udara

Banyak instrumen yang menghasilkan bunyi melalui getaran kolom udara, dalam bentuk gelombang tegak, misalnya seruling, terompet, dan pipa organa. Proses penguatan mekanik (resonansi) pada instrumen ini terjadi pada rongga-rongga di sekitar mulut (kecuali pada pipa organa) dan rongga (tabung) instrumen itu sendiri. Pada beberapa instrumen jenis ini, getaran kolom udara dibangkitkan oleh keping atau lidah getar, misalnya pada *saxophone* dan terompet. Pada seruling atau pipa organa, getaran dihasilkan melalui pengaturan arah aliran udara, sehingga timbul turbulensi yang membangkitkan getaran di kolom udara. Getaran yang timbul pada kolom udara instrumen ini terdiri atas berbagai macam frekuensi. Namun dari banyak getaran yang

terjadi, hanya beberapa getaran saja yang dapat bertahan (karena interferensi konstruktif) dan membentuk gelombang tegak, sementara getaran-getaran lain menghilang karena interferensi destruktif.

Dalam bab 2 dan subbab 3.5.1 di atas kita telah melihat bahwa gelombang-gelombang tegak yang terjadi pada senar memiliki *simpul* pada kedua ujungnya dan satu atau lebih *perut* di antara kedua ujungnya. Gelombang dengan frekuensi paling rendah pada senar hanya memiliki satu simpul dan bunyi yang dihasilkannya disebut *nada dasar*. Gelombang-gelombang tegak lain yang terjadi pada senar, dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi nada dasar, dinamakan nada atas 1, nada atas 2, dst., yang secara keseluruhan disebut *harmonik*. Hal yang sama juga terjadi pada kolom udara. Namun kita harus ingat bahwa yang bergetar adalah udara. Pada ujung tabung yang tertutup, udara tidak bisa bergerak lagi, sehingga pada bagian ini terjadi *simpul*; sementara pada ujung yang terbuka akan timbul *perut* gelombang, karena udara dapat bebas bergerak di posisi ini (lihat gambar 3.5). Gelombang tegak yang ditimbulkan oleh getaran kolom udara adalah *gelombang longitudinal*. Secara umum, instrumen kolom udara dapat dibagi atas dua jenis, yaitu *terbuka* dan *tertutup*, tergantung pada kondisi ujung tabung.



Gambar 3.5  
Ilustrasi getaran udara di dalam pipa organa terbuka dan tertutup

Dari pola yang terbentuk pada masing-masing jenis pipa organa, dapat ditentukan frekwensi bunyi pipa (nada dasarnya,  $n = 0$ ) tersebut beserta frekwensi nada-nada atasnya ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

### a. Pipa organa terbuka

Pada gambar 3.5 di atas (bagian kiri) terlihat pola gelombang tegak yang terbentuk pada pipa organa terbuka, untuk *nada dasar*, *nada atas 1*, dan *nada atas 2*. Ketika pada pipa organa terbuka terbentuk gelombang tegak dengan frekuensi *nada dasar*, di dalam pipa sepanjang  $\ell$  terdapat gelombang sepanjang  $\lambda/2$ , karena pada kedua ujung pipa tersebut terdapat perut gelombang. Ketika pada pipa organa terbuka terbentuk gelombang tegak dengan frekuensi *nada atas 1*, di dalam pipa sepanjang  $\ell$  terdapat gelombang sepanjang  $\lambda$  atau  $2\lambda/2$ . Begitu juga ketika pada pipa organa terbuka terbentuk gelombang tegak dengan frekuensi *nada atas 2*, di dalam pipa sepanjang  $\ell$  terdapat gelombang sepanjang  $3\lambda/2$ .

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa antara panjang pipa dan panjang gelombang yang terjadi pada pipa terdapat hubungan :

$$n \frac{\lambda}{2} = \ell \quad n = 0,1,2,3,\dots \quad (3.5)$$

dimana  $n = 0$  digunakan untuk *nada dasar*,  $n = 1$  untuk *nada atas 1*,  $n = 2$  untuk *nada atas 2*, dan seterusnya.

Karena  $\lambda = v/f$ , maka frekuensi yang dihasilkan oleh pipa organa terbuka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$f = \frac{(1+n) \cdot v}{2 \cdot \ell}, \text{ dengan } n = 0,1,2,3,\dots \quad (3.6)$$

### b. Pipa organa tertutup

Pada gambar 3.5 di atas (bagian kanan) terlihat pola gelombang tegak yang terbentuk pada pipa organa tertutup, untuk *nada dasar*, *nada atas 1*, dan *nada atas 2*. Ketika pada pipa organa tertutup tersebut terbentuk gelombang tegak dengan frekuensi *nada dasar*, di dalam pipa sepanjang  $\ell$  terdapat gelombang sepanjang  $\lambda/4$ , karena pada ujung terbukanya terdapat perut gelombang dan pada ujung tertutupnya terdapat simpul. Ketika pada pipa organa tertutup ini terbentuk gelombang tegak dengan frekuensi *nada atas 1*, di dalam pipa sepanjang  $\ell$  terdapat gelombang sepanjang  $\lambda$  atau  $3\lambda/4$ . Begitu juga ketika pada pipa organa terbuka terbentuk gelombang tegak dengan frekuensi *nada atas 2*, di dalam pipa sepanjang  $\ell$  terdapat gelombang sepanjang  $5\lambda/4$ .

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa antara panjang pipa dan panjang gelombang yang terjadi pada pipa terdapat hubungan :

$$\frac{(1+2n)\lambda}{4} = \ell \quad n = 0,1,2,3,\dots \quad (3.7)$$

dimana  $n = 0$  digunakan untuk *nada dasar*,  $n = 1$  untuk *nada atas 1*,  $n = 2$  untuk nada atas 2, dan seterusnya.

Karena  $\lambda = v/f$  , maka frekuensi yang dihasilkan oleh pipa organa terbuka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$f = \frac{(1+2n)v}{4\ell}, \text{ dengan } n = 0,1,2,3,\dots \quad (3.8)$$

### 3.6 Resonansi

Resonansi adalah *gejala turut bergetarnya suatu benda jika dilewati oleh gelombang yang berasal dari suatu sumber bunyi*.

Resonansi terjadi apabila frekwensi bunyi benda tersebut *sama* atau *hampir sama*, atau *merupakan fraksi* dari frekwensi bunyi sumber bunyi, namun dengan syarat utama bahwa frekuensi bunyi benda adalah sama atau lebih kecil dari frekuensi sumber bunyi.

#### Resonansi pada senar

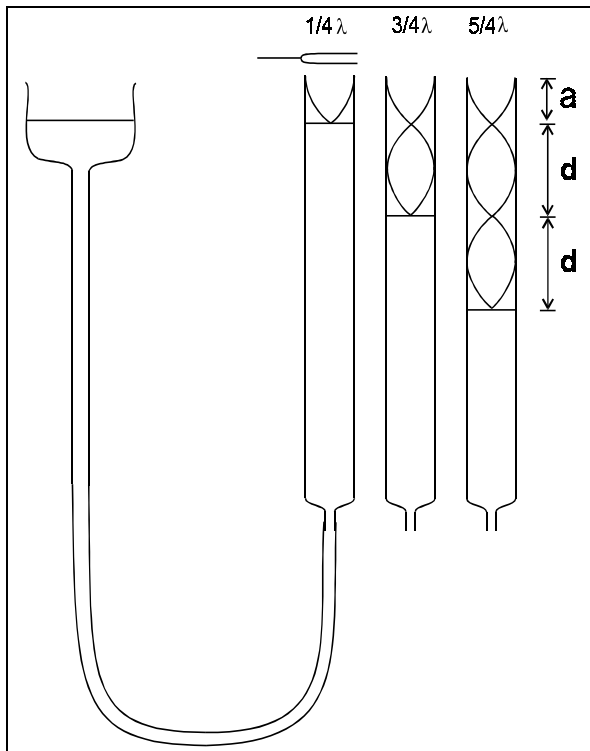
Sebuah senar sepanjang  $\ell$  yang direntangkan dengan gaya tegang  $T$  dapat beresonansi terhadap suatu sumber bunyi ketika pada kedua ujung senar terdapat simpul gelombang tegak. Jarak antara dua simpul gelombang tegak adalah  $n\lambda/2$  (lihat gambar 3.2). Berarti, agar terjadi resonansi, harus dipenuhi syarat :

$$n \frac{\lambda}{2} = \ell$$

Karena  $\lambda = v/f$  dan  $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  , maka senar akan beresonansi jika didekatnya terdapat

bunyi dengan frekwensi :  $f_{\text{resonansi}} = \frac{n}{2\ell} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  , dimana  $n = 1,2,3,\dots$  .

### 3.7 Pengukuran cepat rambat bunyi di udara



Gambar 3.6  
Piranti pengukur cepat rambat bunyi di udara

Cepat rambat bunyi di udara dapat diukur dengan menggunakan gejala resonansi dengan peralatan seperti terlihat pada ilustrasi di sebelah ini.

Peralatan terdiri atas pipa kaca, selang air, penampung air, garpu tala, dan penggaris. Ketinggian permukaan air dalam pipa dapat diatur dengan jalan menaik-turunkan penampung air (ingat hukum bejana berhubungan !).

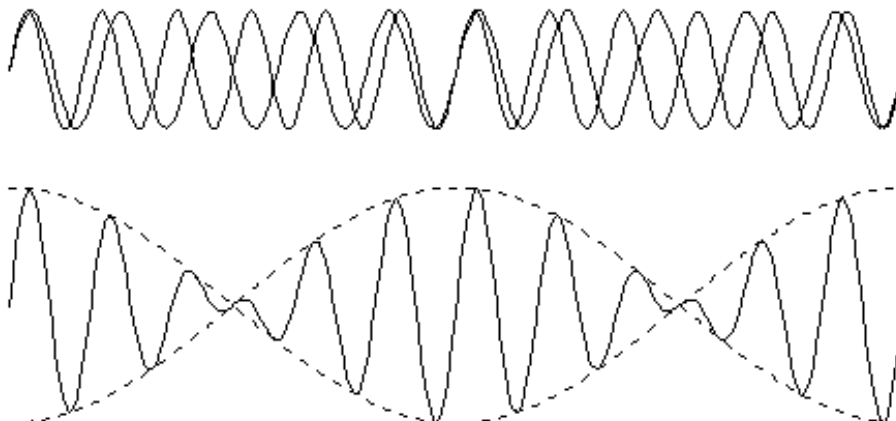
Mula-mula dicari nilai  $a$  dengan jalan menurunkan permukaan air perlahan-lahan dari ujung atas hingga terjadi resonansi yang pertama, yang ditandai dengan mengerasnya suara garpu tala. Selanjutnya dicari nilai  $d$  dengan jalan menurunkan kembali permukaan air dalam pipa hingga diperoleh resonansi kembali. Jika nilai  $d$  sudah diperoleh, maka  $\lambda$  dapat diketahui, karena  $\lambda = 2d$ . Selanjutnya, cepat rambat bunyi dihitung sbb. :

$$v = f / \lambda$$

dimana  $f$  adalah frekwensi garpu tala.

### 3.8 Perlayangan

Perlayangan adalah efek yang ditimbulkan oleh superposisi dua gelombang yang hanya memiliki sedikit perbedaan frekwensi. Pada gelombang suara, perlayangan ditandai dengan terjadinya penguatan dan pelemahan bunyi secara periodis.



*Gambar 3.7*  
*Gejala perlayangan karena superposisi gelombang*

Pada gambar 2.6 diperlihatkan ilustrasi gejala perlayangan yang ditimbulkan oleh peristiwa superposisi. Pada gambar tersebut terlihat bahwa amplitudo gelombang hasil superposisi mengalami perubahan secara periodis. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya penguatan dan pelemahan pada gelombang bunyi.

Jika kita memperhatikan hasil superposisi pada gambar di atas, akan terlihat bahwa hasil superposisi tersebut mengandung dua gelombang, yaitu gelombang hasil superposisi dan gelombang fluktuasi amplitudo. Setiap gelombang tersebut memiliki frekwensi.

*Frekwensi gelombang hasil superposisi sama dengan rata-rata dari frekwensi kedua gelombang asal.*

$$f_{\text{resultan}} = (f_1 + f_2)/2 \quad (2.11)$$

*Frekwensi gelombang fluktuasi amplitudo sama dengan setengah dari selisih frekwensi kedua gelombang asal.*

$$f_{\text{amplitudo}} = |f_1 - f_2|/2 \quad (2.12)$$

Frekwensi perlayangan adalah *jumlah penguatan/pelemahan amplitudo dalam satu satuan waktu*. Karena dalam satu periode gelombang fluktuasi amplitudo terjadi dua kali penguatan/pelemahan, maka  $f_{\text{perlayangan}} = f_{\text{amplitudo}}$  atau :

*Frekwensi perlayangan sama dengan selisih dari frekwensi kedua gelombang asal.*

$$f_{\text{perlayangan}} = |f_1 - f_2| \quad (2.13)$$

**Bukti :**

Terdapat dua buah gelombang dengan frekwensi yang berbeda :

$$y_1 = y_m \sin(k_1 x - \omega_1 t) \quad \text{dan} \quad y_2 = y_m \sin(k_2 x - \omega_2 t)$$

Hasil superposisi kedua gelombang ini adalah:

$$y = y_m \sin(k_1 x - \omega_1 t) + y_m \sin(k_2 x - \omega_2 t) \quad (2.14)$$

atau

$$y = 2.y_m \cos\left(\frac{k_1 - k_2}{2}.x - \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right) \sin\left(\frac{k_1 + k_2}{2}.x - \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right) \quad (2.15)$$

$$k_1 - k_2 = \Delta k \quad (2.16)$$

$$\omega_1 - \omega_2 = \Delta \omega$$

$$\frac{k_1 + k_2}{2} = k \text{ (bilangan gelombang rata - rata)} \quad (2.17)$$

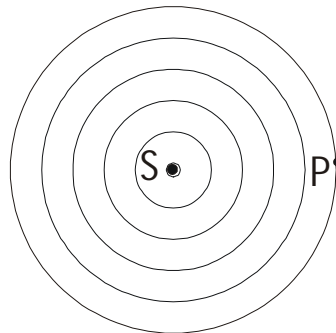
$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega \text{ (kecepatan sudut rata - rata)} \quad (2.18)$$

$$y = 2.y_m \cos\left(\frac{\Delta k}{2}.x - \frac{\Delta \omega}{2}t\right) \sin(k.x - \omega t) \quad (2.19)$$

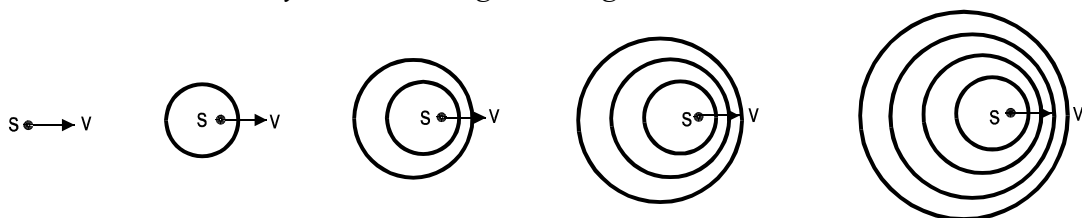
Hasil superposisi adalah berupa gelombang sinus dengan faktor  $2.y_m \cos(\Delta kx/2 - \Delta \omega t/2)$  sebagai amplitudo. Di sini berarti amplitudo tersebut berfluktuasi sesuai dengan fungsi cosinus dengan kecepatan sudut  $\omega_{\text{amplitudo}} = \Delta \omega / 2$  atau  $f_{\text{amplitudo}} = \Delta f / 2$ . Karena dalam satu periode amplitudo terjadi dua kali pengerasan akibat perlayangan, maka frekuensi perlayangan adalah dua kali frekuensi amplitudo atau  $f_{\text{perlayangan}} = 2 f_{\text{amplitudo}}$ , atau dengan kata lain  $f_{\text{perlayangan}} = \Delta f = f_1 - f_2$ .

### 3.9 Efek Doppler

Efek Doppler adalah gejala peninggian atau penurunan frekwensi gelombang akibat adanya gerak relatif antara sumber gelombang dan pengamat.



Gambar 3.8  
Penyebaran muka gelombang dari sumber diam



Gambar 3.9  
Penyebaran muka gelombang dari sumber yang bergerak ke kanan

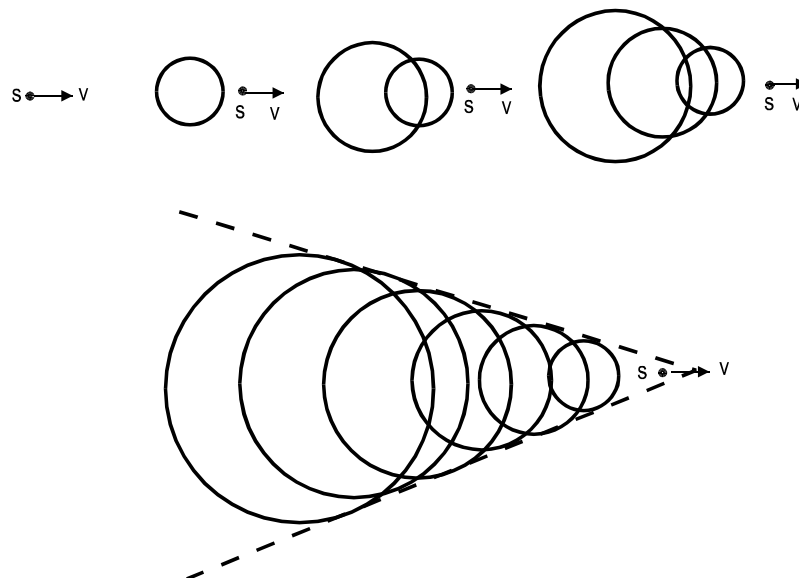
Akibat adanya gerak relatif, gelombang akan mencapai pengamat dengan frekuensi yang berbeda. Frekuensi baru yang teramati :

$$f_p = f_s \left( \frac{v \pm v_p}{v \mp v_s} \right)$$

$f_p$  = frekuensi yang teramati pengamat       $f_s$  = frekuensi sumber  
 $v_p$  = kecepatan pengamat                       $v_s$  = kecepatan sumber  
 $v$  = cepat rambat gelombang

Pada gelombang bunyi, sumber dapat bergerak dengan kecepatan lebih tinggi dari cepat rambat bunyi. Dalam keadaan ini, kecepatan sumber disebut kecepatan supersonik. Kecepatan supersonik ini biasanya dinyatakan dalam satuan Mach (1 Mach = 331 m/s, atau sama dengan cepat rambat bunyi di udara).

Jika suatu sumber bunyi bergerak dengan kecepatan supersonik akan terdengar bunyi ledakan (*boom sonic*), sebagai akibat superposisi gelombang-gelombang yang dihasilkan sumber.

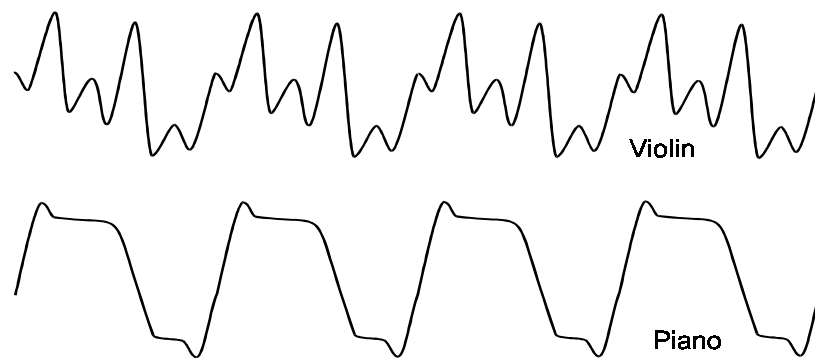


Gambar 3.10  
 Gambaran terjadinya fenomena 'boom-sonic'

### 3.10 Warna Bunyi (Timbre)

Bunyi merupakan gelombang mekanis yang mengandung sejumlah parameter (amplitudo, simpangan, frekuensi, spektrum), yang dapat menyebabkan suara yang satu

berbeda dari suara lain. Bunyi beramplitudo lebih besar dari suara yang lain akan terdengar lebih *keras*. Bunyi dengan frekuensi lebih besar akan terdengar lebih tinggi. Sementara itu bisa juga ditemukan dua bunyi yang beramplitudo dan berfrekuensi sama, misalnya biola dan piano dibunyikan secara bersamaan dengan tingkat kekerasan dan nada yang sama, namun telinga kita masih dapat membedakan mana yang suara piano dan mana yang suara biola. Fenomena yang terakhir ini bisa terjadi karena suara memiliki apa yang dinamakan *warna bunyi (timbre)*. Warna suatu bunyi ditentukan oleh pola dasar dari gelombang bunyi tersebut. Pada gambar 1 di bawah ini dapat dilihat gelombang bunyi biola (*violin*) dan piano, yang masing-masing terdiri atas empat gelombang dasar.



Gambar 1. Perbandingan gelombang bunyi biola (*violin*) dan piano

Perbedaan pola dasar gelombang bunyi biola dan piano (berlaku juga untuk bunyi-bunyi yang berasal dari sumber yang lain) antara lain disebabkan oleh perbedaan faktor resonansi yang timbul pada masing-masing instrumen. Demikian juga pada manusia, resonansi yang terjadi pada rongga mulut (biasanya disertai oleh resonansi rongga hidung dan rongga dada) akan menimbulkan pola dasar gelombang bunyi yang berbeda-beda.

**SOAL**

1. Sebuah kereta api berjalan dengan kecepatan 100 km/jam sambil membunyikan peluitnya yang berfrekuensi 750 Hz. Cepat rambat bunyi pada saat itu 330 m/s. Berapakah frekuensi peluit yang didengar pengamat jika :
  - a. pengamat berada di stasiun dan melihat kereta tersebut berjalan mendekatinya.
  - b. pengamat berada di stasiun dan melihat kereta tersebut meninggalkannya.
  - c. pengamat berada dalam kereta tersebut
  - d. pengamat berada dalam kereta lain yang bergerak dengan kecepatan 60 km/jam berhadapan dengan kereta pertama
  - e. pengamat berada dalam kereta lain yang bergerak dengan kecepatan 60 km/jam bertolak belakang dengan kereta pertama
2. Sebuah sirine mengeluarkan bunyi 1000 Hz sambil bergerak menjauhi pengamat dan mendekati dinding dengan kecepatan 10 m/s. Cepat rambat bunyi di udara 330 m/s. Hitung frekuensi perlayangan yang akan di dengar pengamat dari bunyi sirine tersebut.
3. Seorang pencinta alam menaksir lebar sebuah danau dengan jalan mengamati pantulan bunyi (echo) pada bukit di seberang danau. Jika ia mendengar echo 1 detik setelah ia berteriak, berapakah kira-kira lebar danau tersebut ?
4. Berapakah panjang gelombang suatu gelombang bunyi berfrekuensi 1000 Hz di udara bersuhu 30<sup>0</sup>C ?
5. Sebuah *flute* mengeluarkan nada dengan tepat pada suhu 20<sup>0</sup>C. Berapa persen perubahan frekuensi nada *flute* tersebut jika dibunyikan pada suhu 0<sup>0</sup>C?
6. Berapakah tingkat-intensitas bunyi yang berintensitas 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> ?
7. Sebuah perangkat radio-kaset memiliki rasio sinyal-noise sebesar 55 dB. Berapakah rasio intensitas sinyal dan derau (*noise*) yang dihasilkan radio-kaset tersebut ?

8. Telinga manusia dapat mendeteksi perbedaan keras dua bunyi jika keduanya minimal memiliki perbedaan tingkat intensitas sebesar 1.0 dB. Berapa besar perbedaan intensitas dua bunyi pada kondisi tersebut ?
9. Jika amplitudo suatu gelombang bunyi dijadikan tiga kali lipat, (a) berapa kelipatan intensitas yang baru ?, (b) berapa dB perubahan tingkat-intensitas yang terjadi ?
10. Jika ledakan dua petasan menghasilkan tingkat-intensitas senilai 80 dB, berapa tingkat-intensitas yang dihasilkan oleh ledakan satu petasan saja.
11. Hitung simpangan maksimum molekul udara jika ia dilewati gelombang bunyi berintensitas  $1.0 \text{ W/m}^2$  dengan frekuensi 80 Hz.
12. Seekor nyamuk yang berada 10 m dari seseorang, menimbulkan bunyi yang mendekati ambang pendengaran bunyi manusia (0 dB). Berapa tingkat-intensitas yang terjadi jika pada tempat tersebut terdapat 10.000 ekor nyamuk ?
13. Bunyi berintensitas 90 dB menggetarkan gendang telinga yang luasnya  $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ . Berapa energi yang diserap gendang telinga setiap detiknya ?
14. Sebuah *amplifier* stereo memiliki daya output 30 W pada saat mengeluarkan bunyi 1000 Hz. Pada saat mengeluarkan bunyi 20 Hz, outputnya *drop* sebesar 2 dB. Berapa daya output amplifier untuk bunyi 20 Hz tersebut ?
15. Berapa resultan tingkat-intensitas bunyi (dalam dB) jika sumber bunyi 75 dB dan 80 dB dibunyikan secara bersamaan ?
16. Dua kereta api memiliki frekuensi peluit yang sama, yaitu 380 Hz. Jika satu kereta dalam keadaan diam dan yang lainnya bergerak dengan kecepatan 90 km/jam menjauhi pengamat yang diam dan kedua kereta membunyikan peluit, berapa frekuensi perlayangan yang didengar pengamat ?
17. Sebuah pesawat terbang bergerak dengan kecepatan 1000 m/detik (a) Berapa Mach kecepataannya ? (b) Berapa sudut antara gelombang kejut arah gerakan pesawat ?

18. Sebuah garpu tala dibunyikan di atas pipa resonansi. Jika permukaan air di dalam tabung diturunkan secara perlahan, maka terdengar resonansi pada saat permukaan air berjarak 0,12 m dari ujung tabung dan terjadi lagi pada jarak 0,38 m. Jika cepat rambat di udara dianggap 331 m/detik, berapa frekuensi garpu tala tersebut ?
19. Senar G suatu biola memiliki nada dasar 196 Hz. Bagian senar yang bergetar memiliki panjang 32 cm dan massa 0.50 g. Berapa gaya tegang senar tersebut ?
20. Hitunglah panjang pipa organa tertutup yang menghasilkan nada C-tengah (264 Hz) jika diketahui cepat rambat bunyi di udara 345 m/detik ?
21. Sebuah pipa organa memiliki panjang 80 cm. Hitunglah frekuensi nada dasar dan tiga nada-atas pertama yang dihasilkan pipa tersebut, jika diketahui cepat rambat bunyi di udara 331 m/detik dan (a) pipa tertutup pada salah satu ujungnya (b) pipa terbuka pada kedua ujungnya.
22. Berapa nada atas (dalam frekuensi audio) yang dapat dihasilkan pipa organa sepanjang 100 cm, jika pipa tersebut (a) terbuka, (b) tertutup.
23. Sebuah senar gitar memiliki panjang 80 cm dan massa 1,50 g didekatkan pada sebuah pipa organa tertutup yang panjangnya juga 80 cm. Berapa gaya tegang yang harus diberikan pada senar agar frekuensi nada atas ke-4 nya sama dengan frekuensi nada atas ke-5 dari pipa ?
24. Dua senar biola ditala sehingga keduanya sama-sama menghasilkan bunyi berfrekuensi 440 Hz. Jika salah satu tegangan senar diturunkan sejauh 2%, berapa frekuensi perlayangan yang dihasilkan kedua senar tersebut.
25. Sebuah piranti menggunakan efek Doppler dari gelombang ultrasonik berfrekuensi  $2.0 \times 10^6$  Hz untuk memantau detakan jantung. Frekuensi perlayangan maksimum yang terjadi adalah 600 Hz. Dengan asumsi bahwa bunyi merambat di dalam jaringan tubuh dengan kecepatan  $1.5 \times 10^3$  m/detik, hitung kecepatan gerak maksimum permukaan jantung !