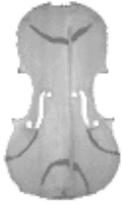


**GELOMBANG : BUNYI**

M. Ishaq

**SEKILAS SEJARAH MUSIK dan SUARA**

Dalam bahasan terdahulu kita telah membahas apa dan bagaimana itu gelombang. Kali ini kita akan memfokuskan pembahasan pada gelombang suara atau bunyi (sound).

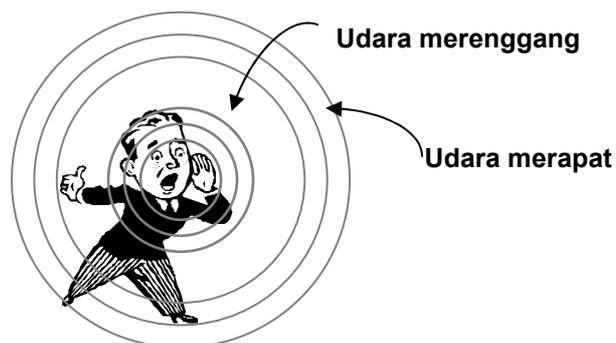
Musik adalah salah satu ilmu yang tertua. Mulai dirintis sejak masa Phytagoras dan kemudian dikembangkan secara lebih terstruktur oleh al-Farabi dan al-Kindi.

Sebuah kenyataan yang cukup unik bahwa pada awalnya, musik, yaitu sebuah disiplin yang mempelajari suara dan bunyi-bunyian, oleh al-Farabi digolongkan ke dalam ilmu hitung (Matematika) dan bukan ilmu seni. Hal ini karena musik sesungguhnya sebuah keteraturan logika dan hitungan dan bukan semata-mata keindahan. Ketika anda mendengarkan sebuah lagu atau musik, anda merasa mendapatkan sebuah keindahan seni, namun tanpa disadari, sebenarnya anda juga sedang disuguhi sebuah keteraturan matematis. Menarik bukan ?

**Al-Farabi****BUNYI**

Gelombang bunyi merupakan gelombang longitudinal yang terjadi karena energi membuat (partikel) udara merapat dan merenggang, dengan cara ini pula energi dirambatkan ke seluruh ruang. Jika partikel udara tidak ada atau anda berada dalam ruang vakum seperti di luar angkasa, suara anda tidak akan menjalar dan tidak terdengar rekan astronot lain, maka untuk komunikasi di luar angkasa mereka menggunakan gelombang radio/EM.

Jika anda berbicara maka getaran dari energi getaran dari pita suara anda diteruskan ke udara dan menyebabkan molekul udara merapat dan merenggang secara bergantian ke segala arah, membentuk muka gelombang berbentuk bola.



Namun, kadang karena kesulitan dalam menggambar bentuk gelombang ini, dalam kebanyakan kasus gelombang suara dilukiskan sebagai gelombang transversal, yang maksudnya hanya menunjukkan amplitudonya saja. Anda tidak perlu bingung dengan hal ini.

### LAJU GELOMBANG BUNYI

Seperti yang telah saya cantumkan dalam tabel berbagai jenis gelombang pada bab terdahulu, bahwa laju gelombang bunyi dalam medium fluida seperti air dan udara bisa dihitung melalui persamaan :

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1)$$

Silakan anda buka kembali diktat kuliah saya elastisitas. Perhatikan persamaan (8) :

$$K = -\frac{V}{\Delta V} \bar{\sigma}$$

atau kita tuliskan dalam bentuk diferensial :

$$\begin{aligned} K &= -\frac{V}{dV} dP \\ dP &= -K \frac{dV}{V} \end{aligned} \quad (2)$$

untuk udara, pada umumnya berlaku sifat adiabatik (yaitu sebuah keadaan dimana tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem yang ditinjau) sehingga berlaku persamaan :

$$PV^\gamma = \text{konstan} \quad (3)$$

$\gamma$  adalah sebuah konstanta, yang untuk udara nilainya 1,4.

Jika kita lakukan diferensiasi parsial pada persamaan (3) :

$$dP \cdot (V^\gamma) + P \cdot (\gamma \cdot V^{\gamma-1}) dV = 0$$

$$dP = -P \cdot \gamma \cdot \frac{dV}{V}$$

jika persamaan (2) disubstitusikan maka kita dapatkan bahwa :

$$K = P \cdot \gamma \quad (4)$$

Pada umumnya udara dapat dipandang sebagai gas ideal dimana berlaku persamaan keadaan  $PV=nRT$ , atau bisa dituliskan  $P=(\rho RT)/M$ , dengan M adalah masa molar, sehingga persamaan (4) menjadi :

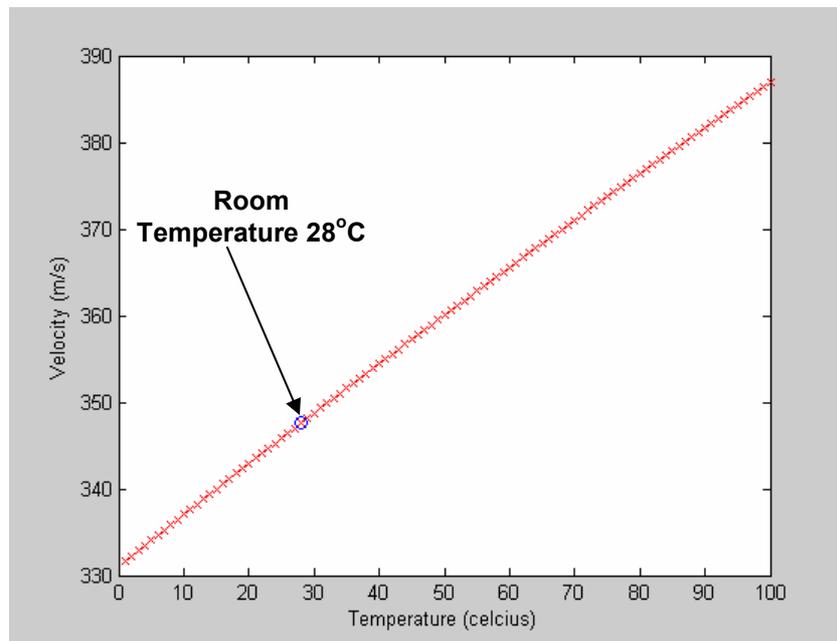
$$K = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M} \gamma \quad (5)$$

jika persamaan (5) ke persamaan 1 menghasilkan kecepatan untuk gelombang suara:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad (6)$$

Kita perhatikan persamaan (6), ternyata kecepatan suara dipengaruhi juga oleh temperatur udara. Jika udara dingin maka kecepatan suara menjadi lambat, begitu juga sebaliknya, jika udara relatif panas maka kecepatan (atau tepatnya laju) suara menjadi lebih besar.

Namun pada umumnya kita anggap temperatur udara konstan sehingga kecepatan suara diudara juga dianggap tetap sekitar 345 m/s hingga 350 m/s. Anda bisa memperoleh angka ini, dengan memasukan konstanta  $\gamma = 1,4$ .  $M = 29 \times 10^{-3}$  kg/mol,  $R = 8,314$  J/mol K dan T udara pada temperatur ruangan dalam Kelvin, ke persamaan (6)

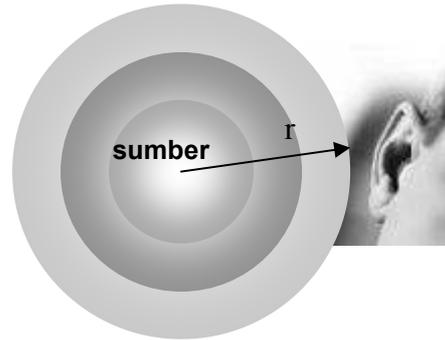


Nilai M bergantung pada jenis partikel udara, suatu kenyataan bahwa partikel udara yang kita hirup terdiri dari nitrogen dan oksigen, yang menghasilkan nilai  $M = 29 \times 10^{-3}$  kg/mol. Seandainya udara kita dipenuhi oleh helium (meskipun kita tidak akan bisa bertahan hidup), maka M akan lebih kecil dan kecepatan gelombang suara menjadi lebih besar. Hasilnya dari persamaan (11) frekuensi suara kita menjadi lebih tinggi. Sehingga bahkan akan mendengar suara yang terdengar aneh. Fenomena ini bisa anda coba dengan mencoba menghirup helium dari balon helium dan cobalah bicara, suara anda terdengar seperti donald bebek

]

## INTENSITAS BUNYI

Sekarang, kita pandang gelombang suara sebagai mana adanya, yaitu sebuah gelombang dengan muka gelombang berbentuk bola. Jika sumber suara memancarkan gelombang suara maka energi secara merata akan disebarkan ke seluruh arah membentuk sebuah bola yang bergerak makin menjauhi sumber suara dengan jari-jari yang makin membesar.



Kemudian oleh yang menerima gelombang suara (pendengar), energi persatuan waktu (atau daya) tersebut diterima. Tapi tentu tidak seluruhnya, namun daya persatuan luas. Atau disebut intensitas bunyi  $I$  (energi persatuan waktu persatuan luas) :

$$I = \frac{P_{\text{rata-rata}}}{\text{Luas Bola}}$$

$$= \frac{P_{\text{rata-rata}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

## TINGKAT INTESITAS BUNYI

Bagaimana suatu suara diukur ? Kenyaringan suatu suara diukur melalui tingkat intensitas suara  $\beta$ , di mana :

$$\beta = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (7)$$

$I_0$  adalah intensitas acuan (atau patokan) yang diambil sebagai ambang pendengaran manusia yaitu  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Satuan dari tingkat intensitas adalah dB (desibel).

Dalam skala desibel, batas terendah pendengaran kita adalah :

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I_0}{I_0} = 10 \cdot \log(1) = 0 \text{ db}$$

sedangkan menurut satuan frekuensi batas terendah pendengaran kita adalah 20 Hz.

Sedangkan batas tertinggi pendengaran kita adalah 20 kHz, atau menurut skala desibel :

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I_{\text{maks}}}{I_0} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{10^{-12}}\right) = 120 \text{ db}$$

di atas batas atas tersebut, gendang telinga kita mulai terasa sakit.

**PELAYANGAN SUARA (Beats)**

Jika anda seorang yang cukup intens terhadap alat musik, peristiwa pelayangan sesungguhnya tidak asing lagi. Peristiwa ini sering dialami seorang yang sedang melakukan “penyeteman” alat musik. Ada suatu saat ketika kita hendak menyesuaikan (menala) sebuah nada (frekuensi) tertentu, ketika nada hampir sesuai dengan nada acuan (standar), terjadi bunyi keras-lemah secara bergantian. Ini adalah peristiwa pelayangan suara (dalam bahas aslinya disebut *beats*). Saya sangat menganjurkan anda untuk mencoba dengan gitar anda di rumah.

Pelayangan suara terjadi karena dua nada yang dibunyikan frekuensinya sedikit berbeda. Mengapa hal ini menimbulkan pelayangan ? akan kita segera kita bahas.

Andaikan dua bunyi ini memiliki fungsi gelombang sinusoidal seperti berikut :

$$y_1 = A \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$$

$$y_2 = A \cdot \sin(\omega_2 \cdot t)$$

sengaja kita buang faktor spatial ( $kx$ ) nya supaya lebih sederhana. Anggaplah perbedaan  $\omega_1$  dan  $\omega_2$  tidak terlalu jauh, supaya efek pelayangan ini terlihat. Jika kita superposisikan kedua gelombang ini :

$$\begin{aligned} y_1 + y_2 &= A \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + A \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \\ &= A(\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)) \\ &= 2A \cdot \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{aligned}$$

dengan  $\omega$  adalah  $(\omega_1 + \omega_2)/2$

Kita pandang hasil superposisi ini sebagai sebuah gelombang baru :

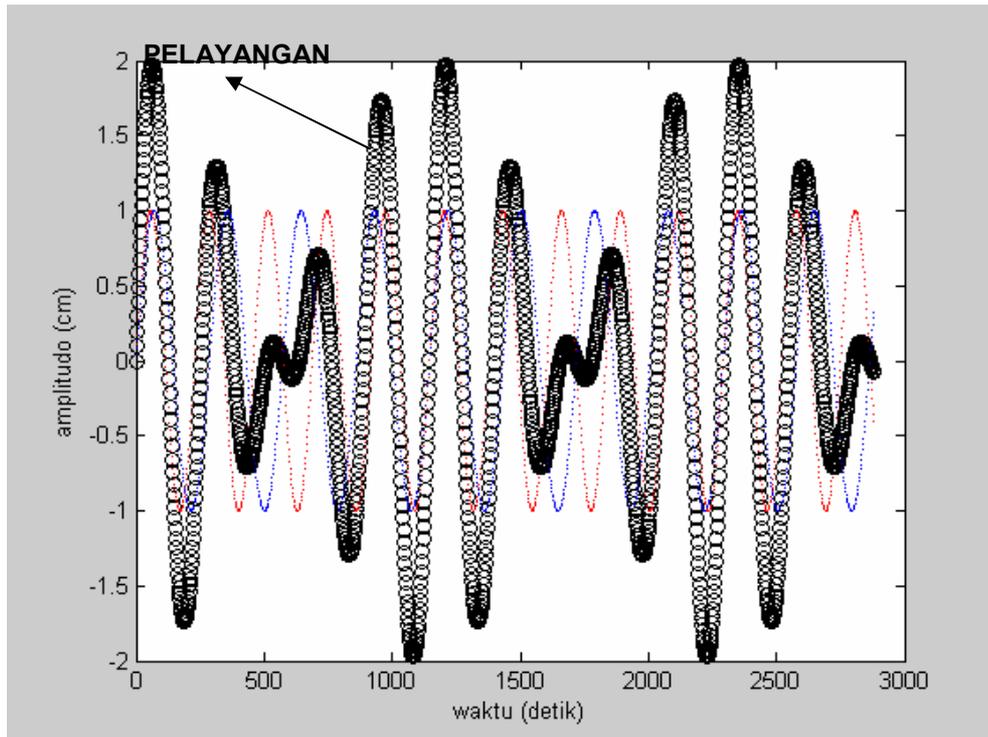
$$Y = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

dengan :

$$A = 2A \cdot \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$$

kita perhatikan bahwa amplitudo gelombang Y tidak konstan, namun juga berosilasi secara periodik. Jika kita sketsa bagaimanakah bentuk gelombang Y, maka akan kita peroleh hasil interferensi yang unik, di mana gabungan dua gelombang bunyi menghasilkan gelombang baru yang amplitudonya membesar dan mengecil secara teratur.

Berikut ini sebuah contoh penggabungan dua gelombang bunyi dengan amplitudo 1 cm dengan frekuensi masing-masing 0,2 dan 0,25. Saya menggunakan program MATLAB 6.5.1 untuk menghasilkan pelayangan (beat) berikut :



**Efek Pelayangan Karena Dua Gelombang yang Frekuensinya Sedikit Berbeda**

Telah kita lihat bahwa amplitudo (seperti pada gambar) membesar dan mengecil secara periodik, dan kita tahu bahwa amplitudo sebanding dengan energi gelombang (dan intensitasnya) atau keras-lemah sebuah suara. Dengan demikian secara fisika, sekarang dapat kita fahami mengapa bunyi keras-lemah secara bergantian dalam peristiwa pelayangan suara itu terjadi.

## EFEK DOPPLER



Bayangkanlah situasi ini : anda sedang berkendara dan kemudian anda harus berhenti karena sebuah kereta hendak menyebrang melintasi kendaraan anda. Pada awalnya mungkin anda tidak bisa melihat kereta api itu, karena jaraknya yang masih jauh. Namun tentu anda sudah dapat sedikit mendengar bunyinya yang khas. Semakin lama bunyi itu makin tinggi. Bahkan dengan tanpa melihatpun, dan dengan mendengar suaranya, anda akan tahu bahwa kereta api itu memang mendekat. Kemudian setelah melintasi anda, bunyi kereta api itu makin merendah, dan anda yakin bahwa kereta api itu menjauhi anda.

Saya akan mengajukan sebuah pertanyaan yang mungkin menurut anda konyol : *"Dari mana anda tahu, dengan tanpa melihat, bahwa hanya dengan mendengar suara kereta semakin meninggi atau merendah, anda menyimpulkan bahwa kereta api itu mendekat atau menjauh ?"*



DOPPLER

Pertanyaan ini memang terdengar konyol, namun, jawaban atas pertanyaan inilah (akan kita kenal dengan efek Doppler) yang kemudian menjawab pertanyaan, **"Bagaimana alam semesta tercipta ?"** Menakjubkan bukan ?

Pada awal tahun 1800-an seorang Fisikawan bernama Christian Johann Doppler, menjawab pertanyaan "konyol" ini melalui sebuah formulasi :

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} f_s \quad (8)$$

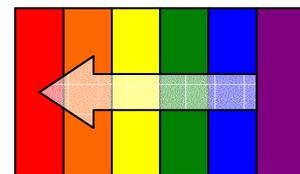
dengan :

- $f_p$  = frekuensi suara yang didengar oleh pendengar
- $f_s$  = adalah frekuensi sebenarnya yang dikeluarkan oleh sumber suara
- $v_s$  =kecepatan sumber suara
- $v_p$  =kecepatan pendengar
- $v$  =kecepatan suara diudara yang nilainya sekitar 340 m/s

dengan :      tanda  $v_s$  (+) jika sumber menjauhi pendengar dan (-) jika mendekati pendengar dan  $v_p$  bertanda (+) jika mendekati sumber, tapi (-) jika menjauhinya

Doppler mengamati, ternyata frekuensi yang dikeluarkan oleh sumber suara belum tentu sama dengan frekuensi yang didengar pendengar. Perbedaan ini bergantung pada arah gerak sumber suara dan pengamat dan kecepatannya.

Bagaimana efek Doppler ini bisa menjelaskan bagaimana alam semesta tercipta ternyata sederhana. Pada tahun 19 teleskop canggih Hubble mendeteksi bahwa seluruh galaksi yang diamati di sekitar bima sakti mengalami pergeseran frekuensi ke arah merah, fenomena ini disebut "pergeseran merah" atau "red shift", anda ingat singkatan "me-ji-ku-hi-bi-u" ? singkatan ini menunjukkan



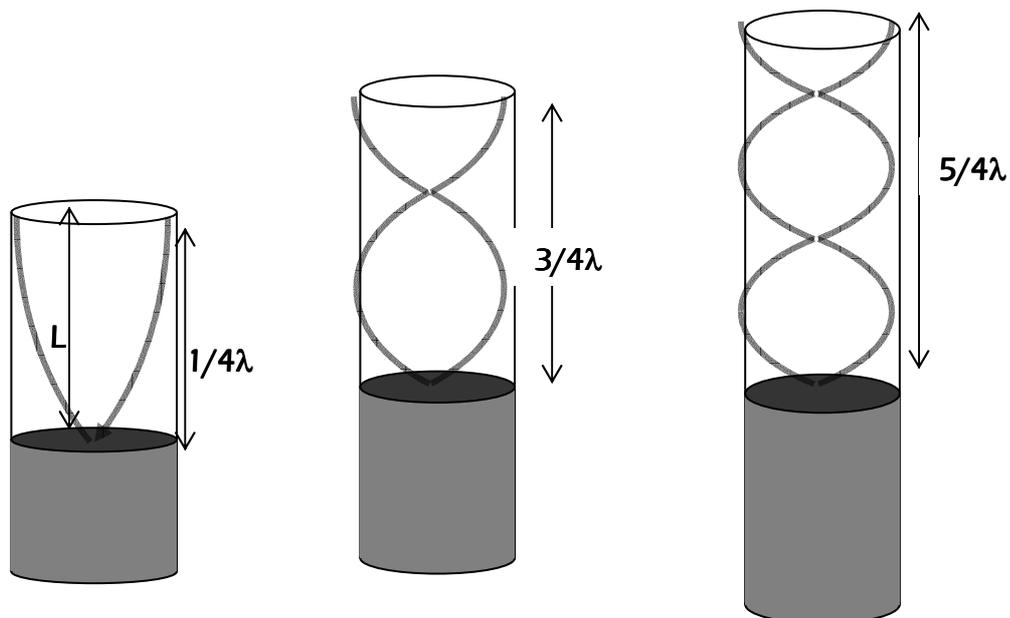
Red shift

urutan warna berdasarkan frekuensinya. Jika semua galaksi **menuju** spektrum warna merah, berarti frekuensi gelombang yang dipancarkan galaksi mengecil. Dari efek Doppler kita ketahui jika frekuensi mengecil maka berarti sumber sedang menjauhi "pengamat". Ini berarti seluruh galaksi saling menjauh satu sama lain. Kesimpulan ini memperkuat teori "Big Bang", di mana alam semesta bermula dari ledakan besar yang kemudian saling menjauh satu sama lain.

## RESONANSI GELOMBANG BUNYI

Resonansi terjadi karena dua gelombang bunyi yang berfrekuensi sama saling berinterferensi konstruktif. Anda telah mempelajari interferensi gelombang pada pembahasan yang lalu. Kita akan mengkhususkan fenomena interferensi konstruktif ini pada kasus gelombang bunyi. Dan memanfaatkannya untuk mengukur frekuensi sebuah gelombang suara.

Anda bisa melakukan percobaan sederhana ini di rumah. Ambil sebuah tabung yang berisi air, di mana ketinggian air dapat di atur dengan cara menaikkan atau menurunkan sumber airnya. Pengamatan fenomena resonansi ini dapat dilakukan dengan sebuah tabung resonator yang panjang kolom udaranya dapat kita atur dengan menaikkan atau menurunkan permukaan air dalam tabung tersebut. Jika sebuah sumber gelombang bunyi dengan frekuensi tertentu dijajarkan dari atas tabung (misalnya sebuah garputala) maka resonansi terjadi pada saat panjang kolom udara  $1/4\lambda$ ,  $3/4\lambda$ ,  $5/4\lambda$  dst, seperti ilustrasi berikut (ingat bahwa bentuk gelombang suara yang sesungguhnya bukanlah seperti ini). Hal ini disebabkan seakan-akan ada dua sumber gelombang berfrekuensi sama berinterferensi. Gelombang pertama berasal dari garputala dan gelombang kedua berasal dari gelombang pantul terhadap permukaan air.



Resonansi pada kolom udara tabung resonator

Secara umum dapat kita tuliskan bahwa hubungan panjang kolom resonansi  $L$  dengan panjang gelombang  $\lambda$  adalah :

$$L = \frac{2 \cdot n + 1}{4} \cdot \lambda \quad (9)$$

dengan  $n = 0, 1, 2, \dots, N$

Persamaan 9 ini dapat berlaku dengan cukup baik untuk ukuran diameter tabung bagian dalam  $R$  yang jauh lebih kecil dari panjang gelombang sumber bunyi. Sedangkan untuk  $R$  tabung yang tidak cukup kecil maka rumus 9 di atas haru dikoreksi dengan suatu nilai, sebutlah  $e$  sehingga :

Secara eksperimen, seperti yang anda akan lakukan, nilai koreksi " $e$ " ini ditentukan dari grafik (hasil least square) antara  $L$  dengan  $n$ .

Kita buat persamaan (1) menjadi sebuah persamaan linier :

$$L = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot n + \frac{1}{4} \cdot \lambda - e \quad (10)$$

Dari metoda Least Square, kita dapatkan bahwa kemiringan kurva adalah  $\lambda/2$ , dan titik potong dengan sumbu vertikal adalah  $\lambda/4 - e$ .

Karena :

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (11)$$

Jika  $v$  (kecepatan suara di udara) diketahui (  $v = 340 \text{ m/s}$  ) maka kita bisa mengetahui frekuensi gelombang suara.

## SOAL-SOAL

1. Sebuah ledakan bom terjadi di hotel Marriot. Seorang yang sedang asyik membaca buku Fisika mendengar bunyi ledakan tersebut 2 detik setelah ledakan dari lokasi ledakan. Karena ledakan tersebut rata-rata temperatur udara meningkat menjadi 30 °C. Berapakah jarak lokasi ledakan darinya ?
2. Hitunglah laju perambatan bunyi dalam gas neon pada temperatur 27 °C, jika  $M_{\text{neon}} = 20,18 \text{ kg/kmol}$
3. Sebuah sumber suara intensitasnya  $3 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ . Berapakah tingkat intensitasnya dalam dB
4. Alat pengukur tingkat intensitas suara mencatat nilai 85 dB ketika sebuah suara menyebar dalam ruangan tersebut. Berapakah intensitasnya
5. Sebuah mobil dengan kecepatan 30 m/s mendekati sirine pabrik yang frekuensi suaranya 500 Hz.
  - a. Jika laju suara di udara 340 m/s, berapakah frekuensi yang didengar pendengar dalam mobil
  - b. Bagaimana jika mobil menjauhi pabrik dengan laju yang sama
6. Mobil polisi mengejar sebuah mobil yang dicuri sambil membunyikan sirine berfrekuensi 1200 Hz. Jika mobil polisi berkecepatan 20 m/s dan mobil pencuri 15 m/s dan laju bunyi di udara 340 m/s. Berapakah frekuensi sirine yang didengar si pencuri ?
7. Gunakan program *excel* untuk mensimulasikan secara grafis pelayangan suara, tentukan sendiri kedua amplitudo gelombang dan aturlah kedua frekuensi gelombang sehingga terjadi pelayangan.
8. Gunakan program *excel* untuk menggambarkan kurva ( $V_s$  terhadap  $f_p$ ) perubahan frekuensi gelombang suara yang di dengar oleh pendengar dari suatu sumber suara yang memancarkan frekuensi 440 Hz sambil menjauh dengan percepatan  $1 \text{ m/s}^2$  (ingat percepatan berarti pertambahan kecepatan).
9. Sebuah percobaan resonansi dengan menggetarkan sebuah garputala yang frekuensinya hendak dicari hasilnya ada adalah sebagai berikut :

<b>n</b>	<b><math>L_n</math></b>
1	20
2	54
3	88
4	120
5	151

Jika diketahui kecepatan suara di udara 340 m/s, dengan menggunakan least-square berapakah frekuensi garputala tersebut.