

**Materi Kuliah  
Fisika Mekanika**

# Gelombang Bunyi

**Dosen :**  
**Tri Surawan M.Si**

**Fakultas Teknik  
Universitas Jayabaya**

# Pokok Bahasan

1. Gelombang bunyi
2. Kecepatan gelombang bunyi
3. Intensitas bunyi
4. Gelombang bunyi berdiri dan modus normal
5. Resonansi pada bunyi
6. Interferensi gelombang
7. Layangan
8. Efek Doppler
9. Gelombang kejut

# Gelombang Bunyi

- Gelombang bunyi merupakan gelombang longitudinal yang terjadi karena perapatan dan perenggangan dalam medium gas, cair, atau padat.
- Gelombang bunyi dihasilkan ketika sebuah benda, seperti garpu tala atau senar biola yang digetarkan dan menyebabkan gangguan kerapatan medium.
- Gangguan dijalarkan di dalam medium melalui interaksi molekul-molekulnya yang bergetar sepanjang arah penjalaran gelombang.
- Di dalam gas, kerapatan dan tekanan terkait erat. Oleh karena itu, gelombang bunyi dalam gas, dapat dipandang sebagai gelombang kerapatan atau gelombang tekanan.
- Fungsi gelombang untuk gelombang bunyi adalah simpangan longitudinal molekul-molekul gas dari posisi kesetimbangannya  $s(x \pm vt)$  atau fungsi yang berkaitan perubahan tekanan gas  $p(x \pm vt)$ .

# Cepat Rambat Gelombang Bunyi

- Laju gelombang bunyi bergantung pada sifat medium.
- Untuk gelombang bunyi **dalam fluida** seperti udara atau air, laju gelombang  $v$  dinyatakan :

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

- $\rho$  adalah rapat kesetimbangan medium
- $B$  adalah modulus Bulk.
- Laju gelombang bunyi **dalam gas** juga bisa dinyatakan :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

- T merupakan temperatur mutlak yang diukur dalam Kelvin (K)
- Konstanta R adalah konstanta gas universal, yang mempunyai nilai  
 $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$
- Konstanta M adalah massa molar gas (yaitu, massa 1 mol gas).  
Untuk udara dianggap bernilai :

$$M = 29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

- Laju gelombang bunyi **pada benda padat** dinyatakan :

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

- Y adalah modulus Young

# Contoh soal

- Dalam cairan dengan kerapatan  $1300 \text{ kg/m}^3$ , gelombang bunyi dengan frekuensi 400 Hz ditemukan memiliki panjang gelombang 8,00 m. Hitung modulus bulk cairan.
- Sebuah batang logam dengan panjang 1,50 m memiliki kerapatan  $6400 \text{ kg/m}^3$ . Gelombang suara memerlukan waktu selama  $3,90 \times 10^{-4} \text{ s}$  untuk berjalan dari satu ujung batang ke ujung yang lain. Berapa modulus Young logam ini?

## Penyelesaian :

(a) Gunakan persamaan modulus bulk dengan  $v = \lambda \cdot f$  :

$$\begin{aligned}B &= v^2 \rho = (\lambda f)^2 \rho \\&= [(8 \text{ m})(400 \text{ Hz})]^2 (1300 \text{ kg/m}^3) \\&= 1.33 \times 10^{10} \text{ Pa}\end{aligned}$$

(b) Gunakan persamaan modulus Young dengan  $v = L/t$  :

$$\begin{aligned}Y &= v^2 \rho \\&= (L/t)^2 \rho \\&= [(1.50 \text{ m})/(3.90 \times 10^{-4} \text{ s})]^2 (6400 \text{ kg/m}^3) \\&= 9.47 \times 10^{10} \text{ Pa}\end{aligned}$$

# Contoh soal

Hitunglah laju bunyi di udara pada

- (a) 0°C
- (b) 20°C

## Penyelesaian :

(a) Temperatur mutlak yang bersesuaian dengan temperatur 0°C adalah

$$T = t_C + 273 = 0 + 273 = 273 \text{ K}$$

Dengan demikian, laju bunyi pada 0°C adalah

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{(1,4)(8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(273 \text{ K})}{29,0 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}} = 331 \text{ m/s}$$

(b) Untuk mendapatkan laju pada 20°C = 293 K, kita perhatikan bahwa laju bunyi sebanding dengan akar kuadrat temperatur mutlak.

$$\frac{v_{293}}{v_{273}} = \frac{\sqrt{293}}{\sqrt{273}}$$

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{293}{273}} (331 \text{ m/s}) \\ &= 343 \text{ m/s} \end{aligned}$$

# Intensitas Bunyi

- **Intensitas** adalah daya rata-rata per satuan luas yang datang tegak lurus terhadap arah penjalaran.

$$I = \frac{P_{\text{rata-rata}}}{A}$$

- Jika sumber titik memancarkan gelombang secara seragam ke semua arah, energi pada jarak  $r$  dari sumber akan terdistribusi secara seragam pada kulit bola berjari-jari  $r$  dan luas  $4\pi r^2$ .
- Jadi intensitas adalah :  $I = \frac{P_{\text{rata-rata}}}{4\pi r^2}$
- **Satuan intensitas** adalah **watt per meter kuadrat (W/m<sup>2</sup>)**.
- Sumber energi berada di pusat bola yang merupakan asal radiasi gelombang. Laju pertambahan energi adalah daya yang lewat kulit bola.
- Maka, daya rata-rata adalah :  $P_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \eta A v$
- Jadi, intesitas gelombang adalah :

$$I = \frac{P_{\text{rata-rata}}}{A} = \eta v$$

–  $\eta$  adalah energi rata-rata per satuan volume pada kulit bola

# Tingkat Intensitas Bunyi

- Tingkat Intensitas ( $\beta$ ) yang diukur dalam desibel (dB) didefinisikan oleh:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- $I$  adalah intensitas bunyi dan
  - $I_0$  adalah intensitas acuan, yang disebut ambang pendengaran :

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

- Tingkat intensitas ambang pendengaran dalam dB adalah :

$$\beta = 10 \log \frac{I_0}{I_0} = 0 \text{ dB}$$

- Tingkat intensitas ambang sakit dalam dB adalah :

$$\beta = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 10 \log 10^{12} = 120 \text{ dB}$$

- Jadi,

- rentang intensitas bunyi dari  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  hingga  $1 \text{ W/m}^2$  bersesuaian dengan rentang tingkat intensitas dari 0 dB hingga 120 dB.

# Contoh soal

Seekor anjing yang menggonggong melepas daya sekitar 1 mW.

- Jika daya ini terdistribusi secara seragam ke semua arah, berapa tingkat intensitas bunyi pada jarak 5 m?
- Berapa tingkat intensitas dari dua anjing yang menggonggong secara bersamaan jika masing-masing melepas daya 1 mW?

## Penyelesaian :

- (a) Intensitas pada jarak 5 m adalah

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{10^{-3} \text{ W}}{4\pi(5 \text{ m})^2}$$
$$= 3,18 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

Tingkat intensitas pada jarak 5 m adalah :

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{3,18 \times 10^{-6}}{10^{-12}}$$
$$= 10 \log (3,18 \times 10^6)$$
$$= 10 (\log 3,18 + \log 10^6)$$
$$= 10 (0,50 + 6) = 65,0 \text{ dB}$$

- (b) Jika ada dua anjing menggonggong pada saat bersamaan, intensitas akan menjadi dua kali lebih besar, maka :

$$I = 2 \times (3,18 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2)$$
$$= 6,36 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

Maka, tingkat intensitas dari dua anjing adalah :

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$
$$= 10 \log (6,36 \times 10^6)$$
$$= 68,0 \text{ dB}$$

# Interferensi

- Superposisi dua gelombang harmonik yang beramplitudo sama menghasilkan suatu gelombang harmonik ketiga yang mempunyai amplitudo yang bergantung pada beda fase antara gelombang-gelombang penyusun.
  - Jika dua gelombang sefase, interferensi bersifat konstruktif dan amplitudo gelombang resultan dua kali amplitudo gelombang penyusun.
  - Jika dua gelombang berbeda fase  $180^\circ$ , interferensi bersifat destruktif dan gelombang saling menghilangkan.
- Jika ada 2 fungsi gelombang :

$$p_1 = p_0 \sin(kx_1 - \omega t) \quad \text{dan} \quad p_2 = p_0 \sin(kx_2 - \omega t)$$

- Resultan tekanan gelombang dengan beda fase  $\delta$  adalah :

$$p_1 + p_2 = 2p_0 \cos\left(\frac{1}{2}\delta\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{1}{2}\delta\right)$$

- Beda fase dua fungsi gelombang ini adalah :

$$\delta = (kx_2 - \omega t) - (kx_1 - \omega t) = k(x_2 - x_1) = k \Delta x$$

- Dengan menggunakan  $k = 2\pi/\lambda$ , diperoleh :

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = (360^\circ) \frac{\Delta x}{\lambda}$$

# Contoh soal

Dua sumber bunyi berosilasi sefase. Pada suatu titik 5,00 m dari sumber yang satu dan 5,17 m dari yang lain, amplitudo bunyi dari masing-masing sumber adalah  $p_0$ . Hitunglah amplitudo gelombang resultan jika frekuensi gelombang bunyi masing-masing adalah :

- (a) 1000 Hz, (b) 2000 Hz. dan (c) 500 Hz. (Gunakan 340 m/s untuk laju bunyi).

## Penyelesaian :

Pada kasus di atas, beda lintasannya adalah :

$$\Delta x = (5,17 - 5,00) \text{ m} = 0,17 \text{ m} = 17 \text{ cm.}$$

a) Jika frekuensinya 1000 Hz, panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{1000 \text{ Hz}} = 0,34 \text{ m} = 34 \text{ cm} = 2 \Delta x$$

Karena beda lintasannya setengah panjang gelombang, beda fasenya  $\phi$  dan amplitudo resultannya akan menjadi 0.

Untuk  $\delta = \pi/2$ , amplitudo resultannya adalah :  $2p_0 \cos \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) = 2p_0 \cos \left( \frac{\pi}{4} \right) = 1,41 p_0$

(b) Ketika frekuensi 2000 Hz. panjang gelombangnya adalah :

$$\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{2000 \text{ Hz}} = 17 \text{ cm} = \Delta x$$

Dalam kasus ini, beda lintasan adalah satu panjang gelombang dan resultan amplitudonya  $2p_0$ .

(c) Untuk  $f = 500 \text{ Hz}$ , maka panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{500 \text{ Hz}} = 68 \text{ cm} = 4 \Delta x$$

Beda fasenya adalah

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta x}{4 \Delta x} = \frac{\pi}{2}$$

# Interferensi



Pola interferensi dua sumber titik yang berosilasi sefase dalam tangki riak

Gelombang berinterferensi secara konstruktif pada titik-titik perpotongan. Titik-titik ini terjadi di mana saja ketika lintasan dari dua sumber berbeda sebesar kelipatan genap panjang gelombang.

Grafik intensitas relatif terhadap beda lintasan untuk dua sumber yang sefase.

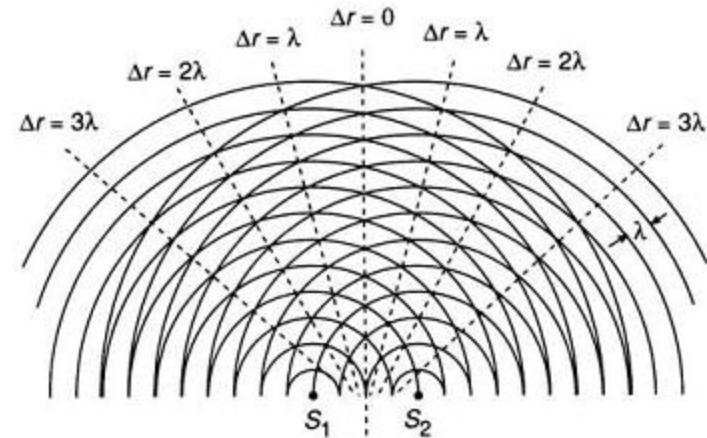
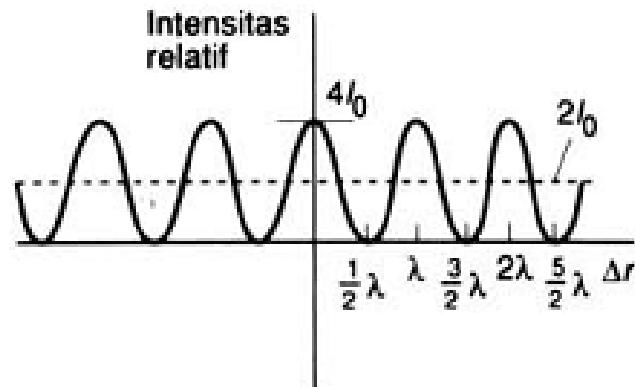
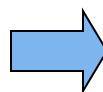


Diagram geometri pola interferensi



# Layangan

- Interferensi dua gelombang dengan frekuensi berbeda namun hampir sama menghasilkan fenomena yang dikenal sebagai **Layangan**.
  - Layangan bisa dihasilkan oleh gelombang bunyi dari dua senar gitar yang berfrekuensi hampir sama namun tidak identik.
  - Yang terdengar adalah suatu nada yang mempunyai intensitas berubah-ubah secara bergantian antara keras dan lemah.
- Frekuensi perubahan intensitas ini disebut **frekuensi layangan**.

# Layangan

- Misalkan dua gelombang bunyi dengan frekuensi sudut  $\omega_1$  dan  $\omega_2$  yang mempunyai amplitudo tekanan  $p_0$  yang sama.

$$p_1 = p_0 \sin \omega_1 t \quad \text{dan} \quad p_2 = p_0 \sin \omega_2 t$$

- Untuk menjumlahkan dua fungsi sinus, digunakan fungsi trigonometri :

$$\sin \theta_1 + \sin \theta_2 = 2 \cos \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2) \sin \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2)$$

- Persamaan resultan gelombang untuk 2 gelombang di atas adalah :

$$\begin{aligned} p &= p_0 \sin \omega_1 t + p_0 \sin \omega_2 t \\ &= 2p_0 \cos \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t \sin \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t \end{aligned}$$

- Jika  $\omega_r = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$  sebagai frekuensi sudut rata-rata dan  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$  sebagai beda frekuensi sudut, maka Fungsi gelombang resultan menjadi :

$$\begin{aligned} p &= 2p_0 \cos \left( \frac{1}{2} \Delta\omega t \right) \sin \omega_r t \\ &= 2p_0 \cos (2\pi \frac{1}{2} \Delta f t) \sin 2\pi f_r t \end{aligned}$$

- dengan  $\Delta f = \Delta\omega/2\pi$  adalah beda frekuensi dan  $f_r = \omega_r / 2\pi$  adalah frekuensi rata-rata.

# Layangan

- Telinga mendengar frekuensi rata-rata

$$f_r = \frac{1}{2} (f_1 + f_2)$$

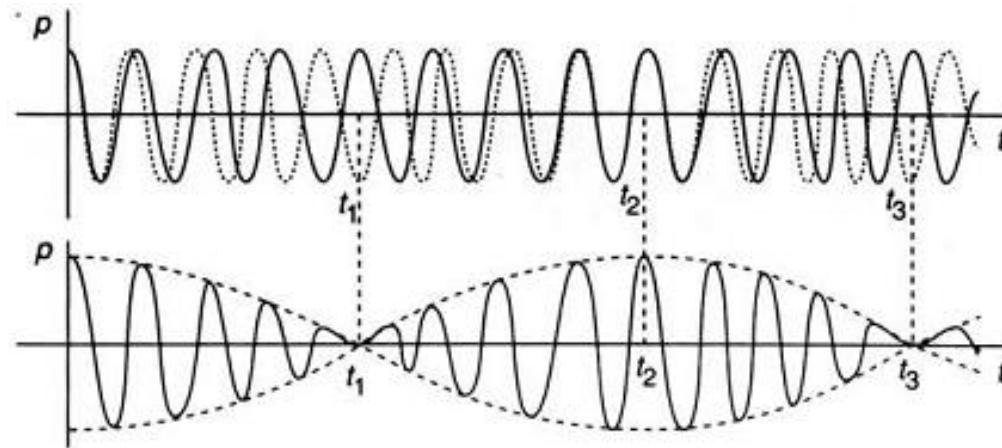
- dengan amplitudo :

$$2p_0 \cos (2\pi \frac{1}{2} \Delta f t)$$

- Jadi, amplitudo berosilasi dengan frekuensi  $\frac{1}{2} \Delta f$ .
- Karena amplitudo maksimum terjadi dengan frekuensi  $\frac{1}{2} \Delta f$ , maka frekuensi amplitudo maksimum dan minimum tepat dua kali nilai  $\Delta f$ .
- Jadi, frekuensi layangan sama dengan beda frekuensi masing-masing gelombang.

$$f_{\text{layangan}} = \Delta f$$

# Layangan



Layangan dua gelombang berfrekuensi beda namun hampir sama yang sefase pada  $t_0 = 0$  dan berbeda fase  $180^\circ$  pada waktu  $t_1$ . Pada waktu  $t_2$  kedua gelombang kembali sefase

Amplitudo bernilai maksimum pada waktu  $t_0$  dan  $t_2$

Amplitudo bernilai minimum pada waktu  $t_1$  dan  $t_3$

Misalnya, jika dua garpu tala digetarkan secara bersamaan, dan mempunyai frekuensi 241 Hz dan 243 Hz, maka kita akan mendengar suatu nada berdenyut dengan frekuensi rata-rata 242 Hz yang mempunyai intensitas maksimum 2 kali per sekon; artinya, frekuensi layangan akan menjadi 2 Hz.

# Contoh soal

Dua garpu tala dipukul secara simultan, dan terdengar 4 layangan per sekon. Frekuensi salah satu garpu tala 500 Hz. Berapakah nilai-nilai yang mungkin untuk frekuensi garpu tala lain?

## Penyelesaian :

Nilai-nilai frekuensi garpu tala yang mungkin adalah :

$$\begin{aligned}f_2 &= f_1 \pm \Delta f \\&= 500 \text{ Hz} \pm 4 \text{ Hz} \\&= 504 \text{ Hz} \quad \text{atau} \quad 496 \text{ Hz}\end{aligned}$$

# Contoh soal

Dua dawai biola ditala pada frekuensi yang sama sebesar 294 Hz. Tegangan pada dawai yang satu berkurang sebesar 2,0%. Berapa frekuensi layangan terdengar bila dua dawai dimainkan bersamaan?

## Penyelesaian :

Frekuensi dasar dawai biola adalah :

$$f = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_T}{m/L}} = 294 \text{ Hz}$$

Perubahan tegangan menghasilkan frekuensi baru :

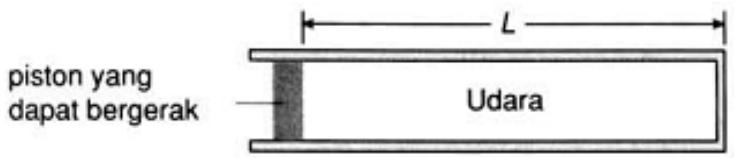
$$f' = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{(0.98)F_T}{m/L}} = \sqrt{0.98} \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_T}{m/L}} = \sqrt{0.98} f$$

Frekuensi layangan yang terjadi adalah :

$$\begin{aligned}\Delta f &= f - f' \\&= f \left( 1 - \sqrt{0.98} \right) \\&= (294 \text{ Hz}) \left( 1 - \sqrt{0.98} \right) \\&= 3.0 \text{ Hz}\end{aligned}$$

# Gelombang Bunyi Berdiri

## (tabung kedua ujung tertutup)



Udara yang terkungkung pada tabung yang kedua ujungnya tertutup. Ada simpul simpangan pada tiap-tiap ujung jika amplitudo osilasi piston kecil.

Syarat gelombang berdiri untuk sistem ini sama seperti untuk tali yang terikat pada kedua ujungnya, dan semua persamaan berlaku.

Panjang tabung  $L$  harus merupakan suatu bilangan bulat kali setengah panjang gelombang.

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

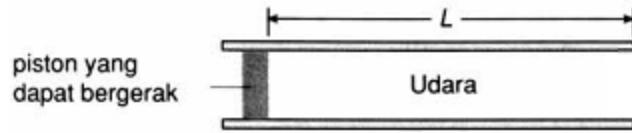
Frekuensi yang diperbolehkan adalah

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{(2L/n)} \quad \text{atau} \quad f_n = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

dengan  $f_1 = \frac{v}{2L}$  sebagai frekuensi nada dasar.

# Gelombang Bunyi Berdiri

## (salah satu ujung tabung terbuka)



Jika ujung tabung pada bagian kanan tidak tertutup namun terbuka ke atmosfer, ujung terbuka itu merupakan perut simpangan.

Syarat gelombang berdiri untuk sistem ini sama seperti untuk tali dengan salah satu ujung tetap dan ujung lain bebas.

Panjang tabung harus sama dengan bilangan bulat ganjil kali  $\lambda/4$ .

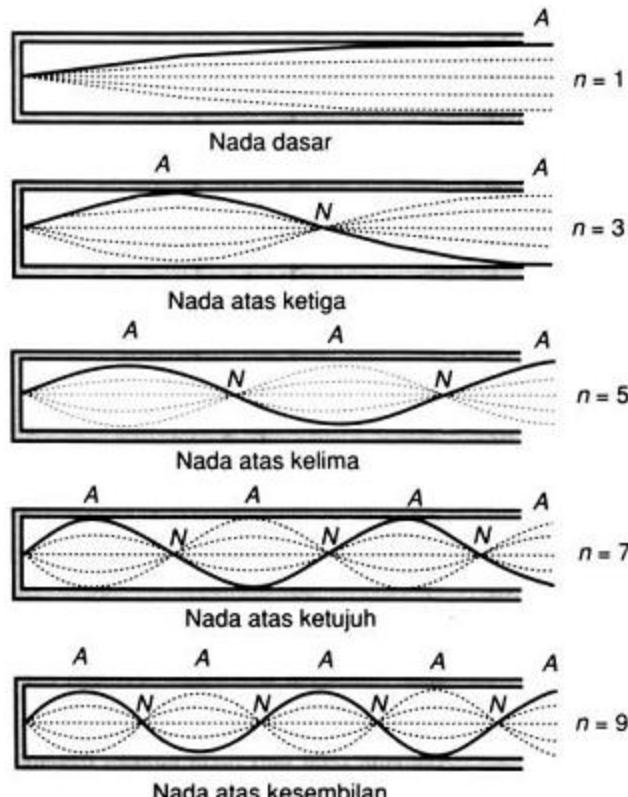
$$L = n \frac{\lambda}{4} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Frekuensi yang diperbolehkan adalah

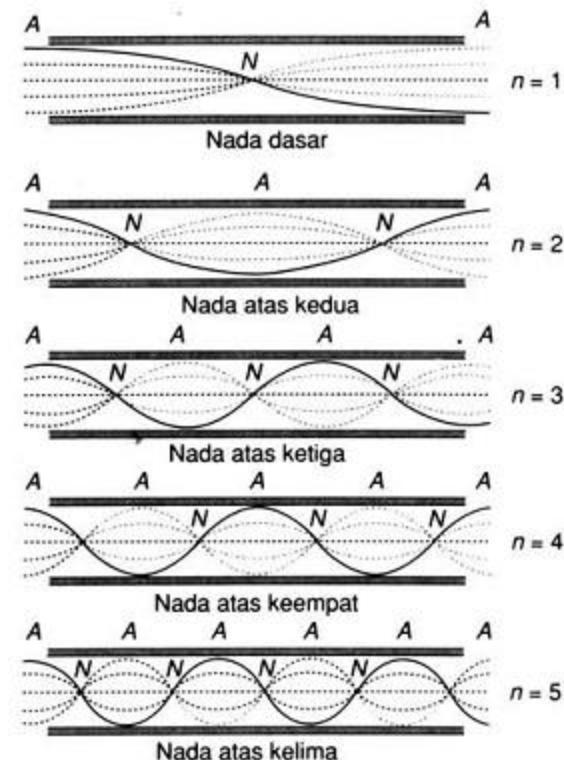
$$f_n = n \frac{v}{4L} = nf_1 \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

dengan  $f_1 = \frac{v}{4L}$  sebagai frekuensi nada dasar.

# Gelombang Berdiri dalam kolom udara Pipa organa



Pola gelombang berdiri pada pipa yang kedua ujungnya terbuka. Simpangan mempunyai perut pada masing-masing ujung.



Pola-pola gelombang berdiri pada pipa yang satu ujungnya terbuka dan ujung yang lainnya tertutup. Simpangan mempunyai simpul pada ujung tertutup dan perut pada ujung terbuka.

# Efek Doppler

- Bilamana suatu sumber gelombang dan penerima bergerak relatif satu sama lain. frekuensi yang teramatii oleh penerima tidak sama dengan frekuensi sumber.
- Ketika keduanya bergerak saling mendekat, frekuensi yang teramatii lebih besar daripada frekuensi sumber. Ini disebut **efek doppler**.
- Perubahan frekuensi gelombang bunyi sedikit berbeda bergantung pada apakah sumber atau penerima yang sedang bergerak relatif terhadap medium.
- Bilamana sumber bergerak, panjang gelombang akan berubah, dan suatu frekuensi baru  $f'$  akan ditemukan dengan pertama kali mencari panjang gelombang baru  $\lambda'$  dan kemudian menghitung

$$f' = v/\lambda.$$

# Efek Doppler

## Sumber bergerak, pendengar diam

Sumber mendekat  $f' = \frac{f_0}{1 - u_s/v}$

Sumber menjauh  $f' = \frac{f_0}{1 + u_s/v}$

Bila digabungkan menjadi :

$$f' = \frac{(1 \pm u_r/v)}{(1 \pm u_s/v)} f_0$$

Secara umum frekuensi teramati  $f'$  dapat ditulis sebagai

$$f' = \frac{v'}{\lambda}$$

dengan  $v'$  adalah laju gelombang relatif terhadap pengamat, dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang dalam medium,

## Sumber diam, pendengar bergerak

Pendengar mendekat  $f' = f_0 \left(1 + \frac{u_r}{v}\right)$

Pendengar menjauh  $f' = f_0 \left(1 - \frac{u_r}{v}\right)$

Dimana :

$f'$  = frekuensi yang diterima pendengar

$f_0$  = frekuensi sumber

$u_r$  = kecepatan pendengar

$u_s$  = kecepatan sumber

$v$  = kecepatan gelombang di medium

Jika medium bergerak dengan laju  $u_w$ , maka laju gelombang menjadi :

$$v' = v + u_w$$

# Contoh soal

Frekuensi sebuah klakson mobil adalah 400 Hz.

- (a) Berapakah frekuensi yang teramati jika mobil bergerak dengan laju 34 m/s melalui udara tenang menuju penerima diam?
- (b) Berapakah frekuensi yang teramati oleh penerima bergerak dengan laju 34 m/s yang bergerak melalui udara tenang menuju mobil yang diam?

## Penyelesaian :

- (a) Frekuensi yang teramati jika mobil bergerak dengan laju 34 m/s melalui udara tenang menuju penerima diam

$$\begin{aligned}f' &= \frac{f_0}{1 - u_s/v} \\&= \frac{400}{1 - 34/340} = 444 \text{ Hz}\end{aligned}$$

- (b) Frekuensi yang teramati oleh penerima dengan laju 34 m/s yang bergerak melalui udara tenang menuju mobil yang diam

$$\begin{aligned}f' &= f_0 \left(1 + \frac{u_r}{v}\right) = (400 \text{ Hz}) \left(1 + \frac{34}{340}\right) \\&= (400 \text{ Hz}) (1,10) = 440 \text{ Hz}\end{aligned}$$

# Contoh soal

Sebuah peluit berfrekuensi 500 Hz bergerak dengan lintasan lingkaran berjari-jari 1 m dengan laju 3 putaran/s. Berapakah frekuensi maksimum dan minimum yang terdengar oleh pendengar diam yang berada 5 m jauhnya dari pusat lingkaran?

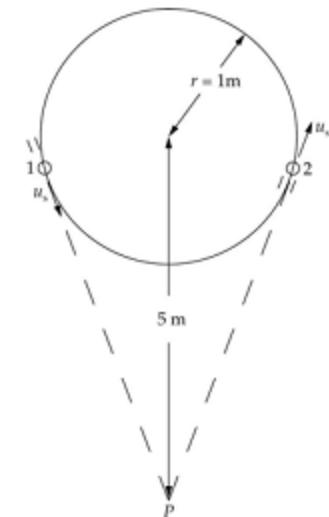
## Penyelesaian :

Hubungan antara kecepatan translasi dan kecepatan rotasi adalah :

$$u_s = r\omega = (1 \text{ m}) \left( 3 \frac{\text{rev}}{\text{s}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{rev}} \right)$$
$$= 18.85 \text{ m/s}$$

Frequensi pada titik P ketika peluit mendekat :

$$f_{\max} = \frac{1}{1 - u_s/v} f_s$$
$$= \frac{1}{1 - \frac{18.85 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} (500 \text{ Hz})$$
$$= \boxed{529 \text{ Hz}}$$



Frekuensi pada titik P ketika peluit menjauh :

$$f_{\min} = \frac{1}{1 + u_s/v} f_s$$
$$= \frac{1}{1 + \frac{18.85 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} (500 \text{ Hz})$$
$$= \boxed{474 \text{ Hz}}$$

# Pergeseran Doppler

Frekuensi  $f'$  yang teramati untuk sumber yang bergerak dengan laju  $u$  menuju penerima yang diam adalah :

$$f' = \frac{f_0}{1 - u/v} = f_0 \left(1 - \frac{u}{v}\right)^{-1}$$

dengan menggunakan ekspansi binomial:

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2} x^2 + \dots$$

Untuk  $x = -u/v$  dan  $n = -1$ , diperoleh :

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{u}{v}\right)^{-1} &= 1 + (-1) \left(-\frac{u}{v}\right) + \frac{(-1)(-2)}{2} \left(-\frac{u}{v}\right)^2 + \dots \\ &\approx 1 + \frac{u}{v} + \frac{u^2}{v^2} \end{aligned}$$

Jadi, Persamaan secara aproksimasi adalah :

$$f' \approx f_0 \left(1 + \frac{u}{v} + \frac{u^2}{v^2}\right)$$

jika penerima bergerak dengan laju  $u$  menuju sumber yang diam, frekuensi teramati adalah :

$$f' = f_0 \left(1 + \frac{u}{v}\right)$$

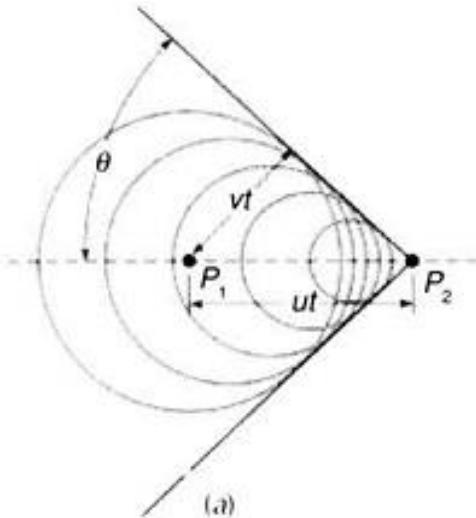
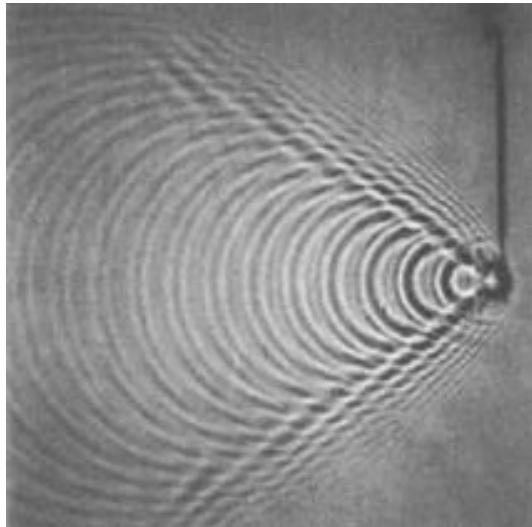
Ternyata selisih pergeseran frekuensi antara sumber yang bergerak dengan laju  $u$  dan penerima dengan laju  $u$  adalah ber-orde  $(u/v)^2$ .

Maka **pergeseran doppler** pada frekuensi dapat ditulis

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \pm \frac{u}{v}$$

dengan  $\Delta f = f' - f_0$ .

# Bilangan Mach



Sebuah sumber yang mula-mula berada di titik  $P_1$  bergerak ke kanan dengan laju  $u$ . Setelah beberapa waktu  $t$ , gelombang yang dipancarkan dari titik  $P_1$  akan bergerak sejauh  $v t$ . Sumber akan bergerak sejauh  $u t$  dan akan berada pada titik  $P_2$ .

Garis dari posisi sumber baru ini ke muka gelombang yang dipancarkan ketika sumber berada pada  $P_1$  membentuk sudut  $\theta$  dengan lintasan sumber

$$\sin \theta = \frac{vt}{ut} = \frac{v}{u}$$

Rasio laju sumber  $u$  terhadap laju gelombang  $v$  disebut **bilangan Mach**

$$\text{Bilangan Mach} = \frac{u}{v}$$

# Contoh soal

Sebuah perahu yang bergerak dengan laju 10 m/s di atas danau tenang membuat suatu gelombang haluan (kerucut) yang membentuk sudut  $20^\circ$  dengan arah geraknya. Berapakah laju gelombang haluan?

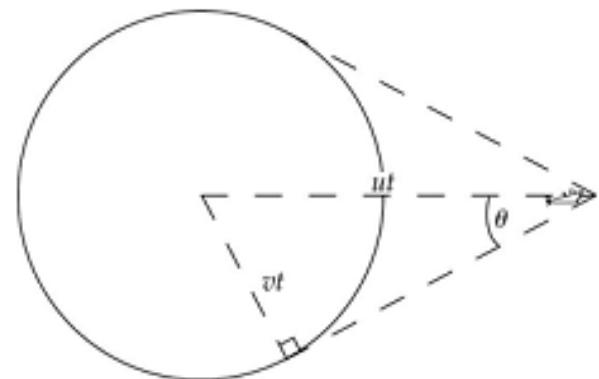
## Penyelesaian :

Dengan melihat diagram disamping, hubungan antara  $u$  dan  $v$  dengan sudut  $\theta$  adalah:

$$\sin \theta = \frac{vt}{ut} = \frac{v}{u}$$

Maka, laju gelombang haluan adalah :

$$\begin{aligned} v &= u \sin \theta \\ &= (10 \text{ m/s}) \sin 20^\circ \\ &= 3.42 \text{ m/s} \end{aligned}$$



**Terima Kasih**