

(a) Gelombang Tali

- ▶ Gelombang transversal yang memerlukan medium (tali) untuk menjalar
- ▶ Dengan analisis gaya didapatkan persamaan diferensial tali

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

- ▶ Sehingga Laju gelombang tali

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \text{ dimana } \mu = \frac{m}{L} \text{ dan } F = T = \text{tegangannya tali}$$

- ▶ Laju bergantung pada sifat dari medium yang dilewati gangguan

Energi dan daya yang ditransmisikan oleh gelombang tali harmonik

- Energi total massa yang berosilasi adalah $\frac{1}{2}kA^2$ dengan $k=m\omega^2$ sehingga untuk segmen tali bermassa $\Delta m = \mu \Delta x$

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\Delta m)\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \Delta x$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v \Delta t \quad \text{karena} \quad \Delta x = v \Delta t$$

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$$

Daya yang ditransmisikan oleh gelombang tali harmonik

$$P = v^2 p_x$$

$$p_x = \frac{1}{2} \frac{\mu\omega^2 A^2}{v}$$

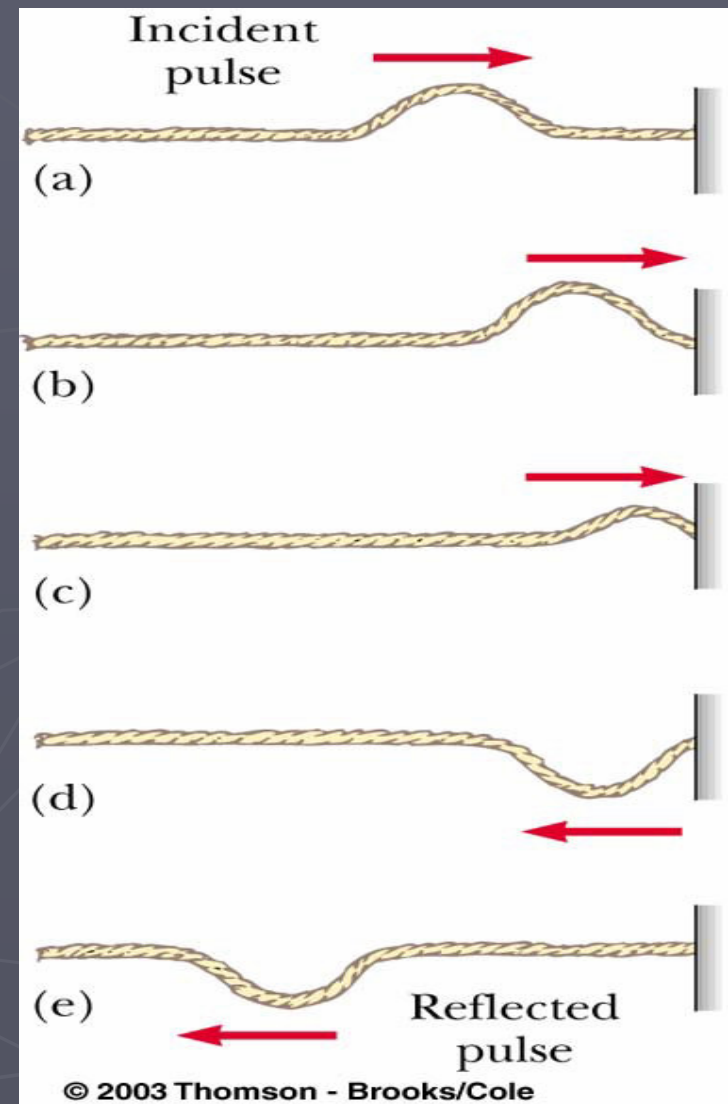
Rapat momentum gelombang tali

Refleksi dan Refraksi

- ▶ Bila suatu gelombang datang pada suatu permukaan batas yang memisahkan dua daerah dengan laju gelombang yang berbeda, maka sebagian gelombang akan dipantulkan (refleksi) dan sebagian lain akan ditransmisikan
- ▶ Berkas yang terpantul membentuk sudut dengan garis normal permukaan yang besarnya sama dengan sudut berkas datang → **berlaku untuk semua gelombang**
- ▶ Berkas yang ditransmisikan akan dibelokkan mendekati atau menjauh dari garis normal-bergantung pada apakah laju gelombang pada medium kedua lebih kecil atau lebih besar daripada laju gelombang dalam medium datang. Pembelokan berkas yang ditransmisikan disebut refraksi (pembiasan) → **berlaku untuk semua gelombang**

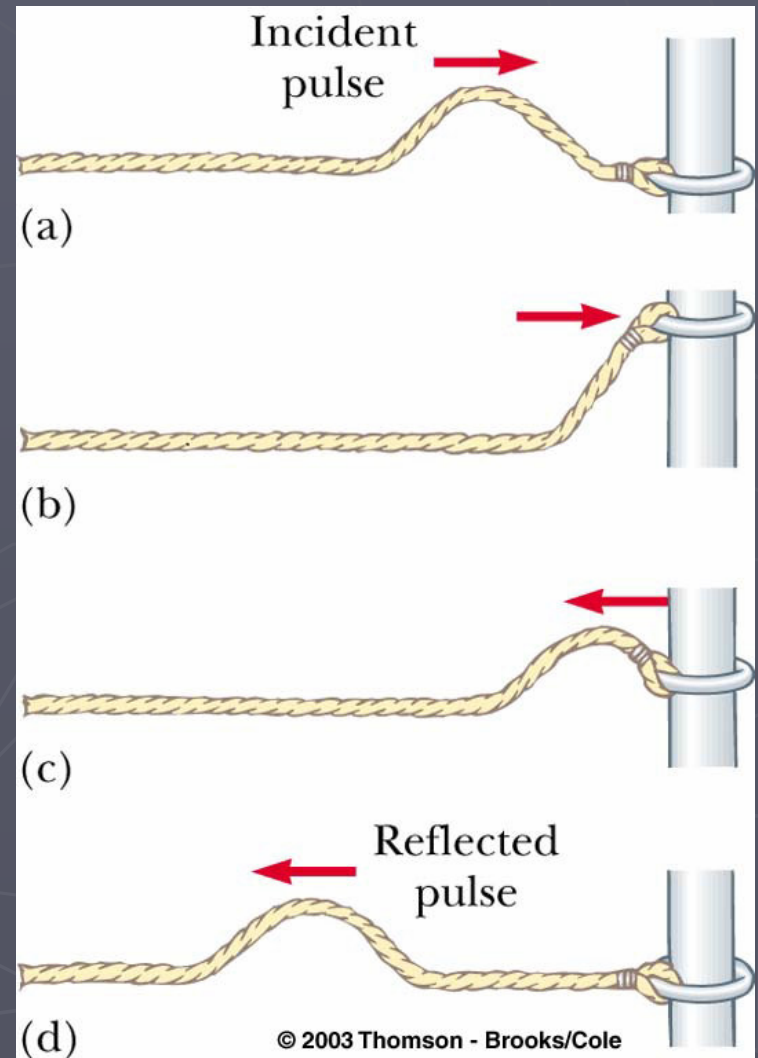
Refleksi Gelombang Tali – Ujung Terikat

- ▶ Ketika gelombang berjalan mencapai ujung, beberapa atau semua gelombang dipantulkan
- ▶ Ketika gelombang dipantulkan dari ujung terikat, pulsa gelombang akan dibalikkan (ada pembalikan fase)



Refleksi Gelombang Tali – Ujung Bebas

- ▶ Ketika gelombang berjalan mencapai ujung, beberapa atau semua pulsa gelombang dipantulkan
- ▶ Ketika gelombang dipantulkan dari ujung bebas, pulsa gelombang tidak dibalikkan (tidak ada pembalikan fase)



Superposisi Gelombang

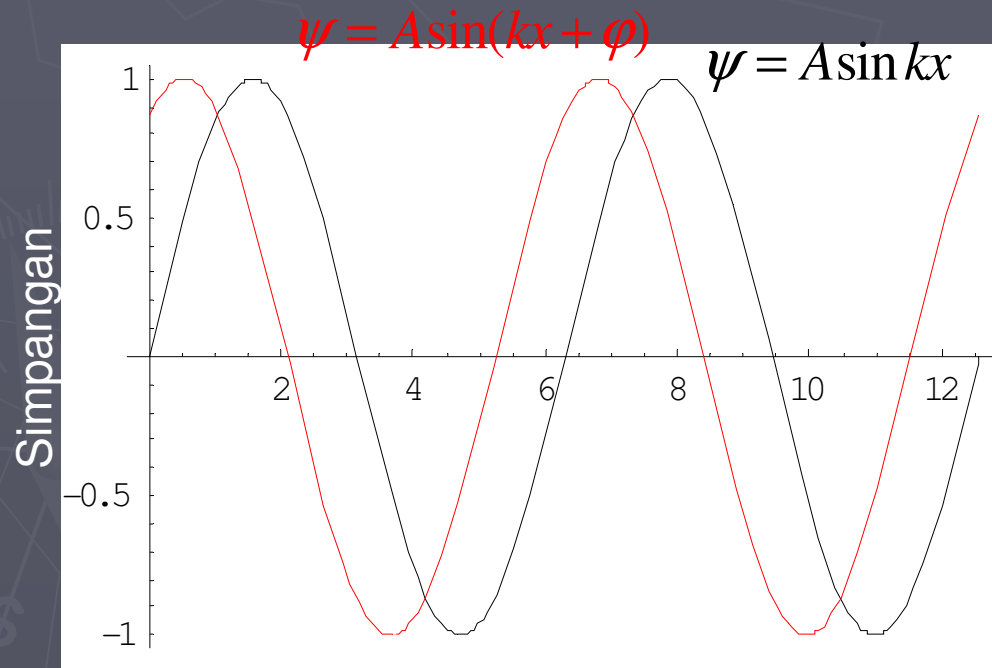
- ▶ Dua gelombang yang berjalan dapat bertemu dan saling melewati satu sama lain tanpa menjadi rusak atau berubah
- ▶ Gelombang memenuhi **Prinsip Superposisi**
 - Jika dua gelombang atau lebih yang merambat bergerak melewati medium, gelombang yang dihasilkan adalah penjumlahan masing-masing perpindahan dari tiap gelombang pada setiap titik
 - Sebenarnya hanya berlaku untuk gelombang dengan amplitudo yang kecil

Interferensi

Interferensi = Superposisi gelombang harmonik

Tinjau: Dua gelombang harmonik dengan frekuensi, panjang gelombang dan amplitudo yang sama (A) dan sama-sama bergerak ke kanan berbeda fase. Pilih saat $t = 0$

Interferensi bergantung pada beda fase gelombang (ϕ)



Jika beda fase:

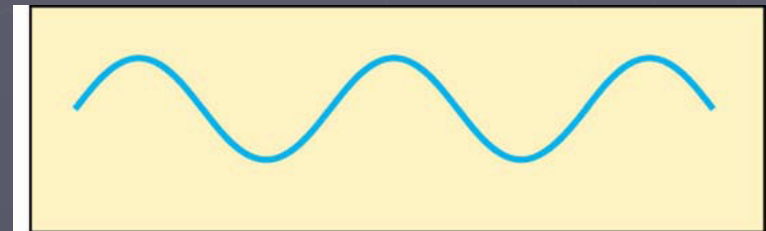
$\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2\pi n$ (sefase),
beda lintasan = $n\lambda \rightarrow$
Interferensi konstruktif \rightarrow
 $A_{\text{gel gabang}} = 2A$

$\phi = \pi, 3\pi, 5\pi \dots (2n-1)\pi$,
beda lintasan = $(n + \frac{1}{2})\lambda \rightarrow$
Interferensi destruktif \rightarrow
 $A_{\text{gel gabang}} = 0$

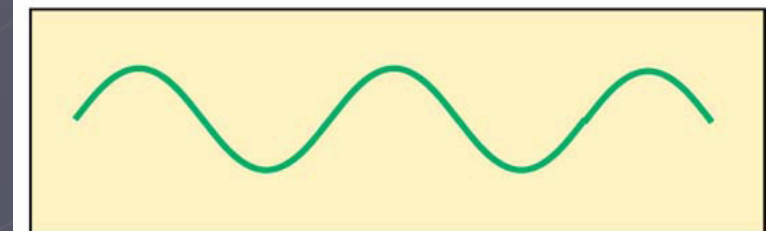
Sembarang $\phi \rightarrow$
 $A_{\text{gel gab}} = 2A \cos \phi/2$

Interferensi Konstruktif

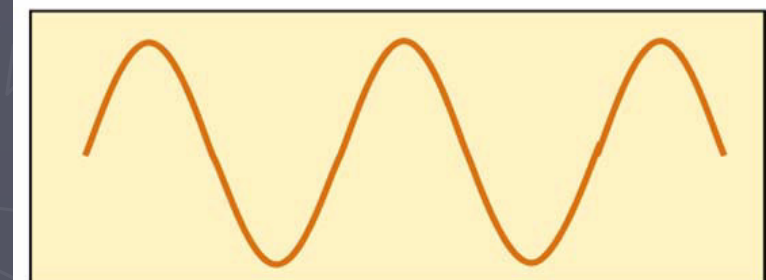
- ▶ Dua gelombang, a dan b, mempunyai frekuensi, panjang gelombang, amplitudo yang sama dan berada dalam **satu fase** ($\phi=0$)
- ▶ Gabungan gelombang (c) memiliki amplitudo dua kali amplitudo semula



(a)



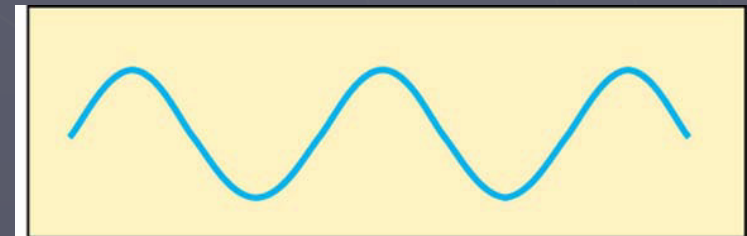
(b)



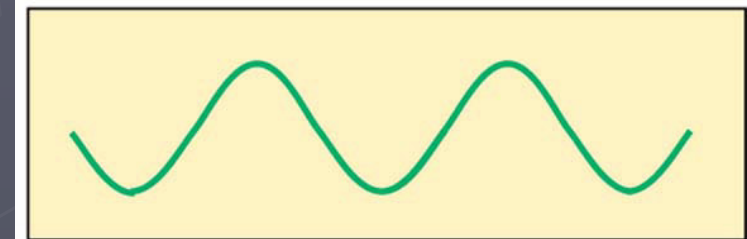
(c)

Interferensi Destruktif

- ▶ Dua gelombang, a and b, mempunyai frekuensi, panjang gelombang dan amplitudo yang sama, **beda fase $\phi = 180^\circ$**
- ▶ Ketika bergabung, bentuk gelombangnya hilang



(a)



(b)



(c)

Gelombang Berdiri

- ▶ Bila gelombang terbatas pada ruang, ketika gelombang menjalar akan ada pantulan gelombang pada kedua ujungnya, shg akan menciptakan gelombang berjalan dalam dua arah
- ▶ Gelombang dan pantulannya **berinterferensi** sesuai dengan prinsip superposisi
- ▶ Dengan frekuensi yang tepat, gelombang akan terlihat seperti berdiri
 - Gelombang ini disebut ***gelombang berdiri/gelombang stasioner***
 - *Frekuensi-frekuensi yang menghasilkan pola-pola tersebut disebut **frekuensi resonansi***

Sifat-sifat gelombang berdiri

► **Simpul** : titik-titik yang selalu diam.

Simpul terjadi ketika dua buah gelombang berjalan memiliki besar perpindahan yang sama, tetapi perpindahannya dalam arah yang berlawanan

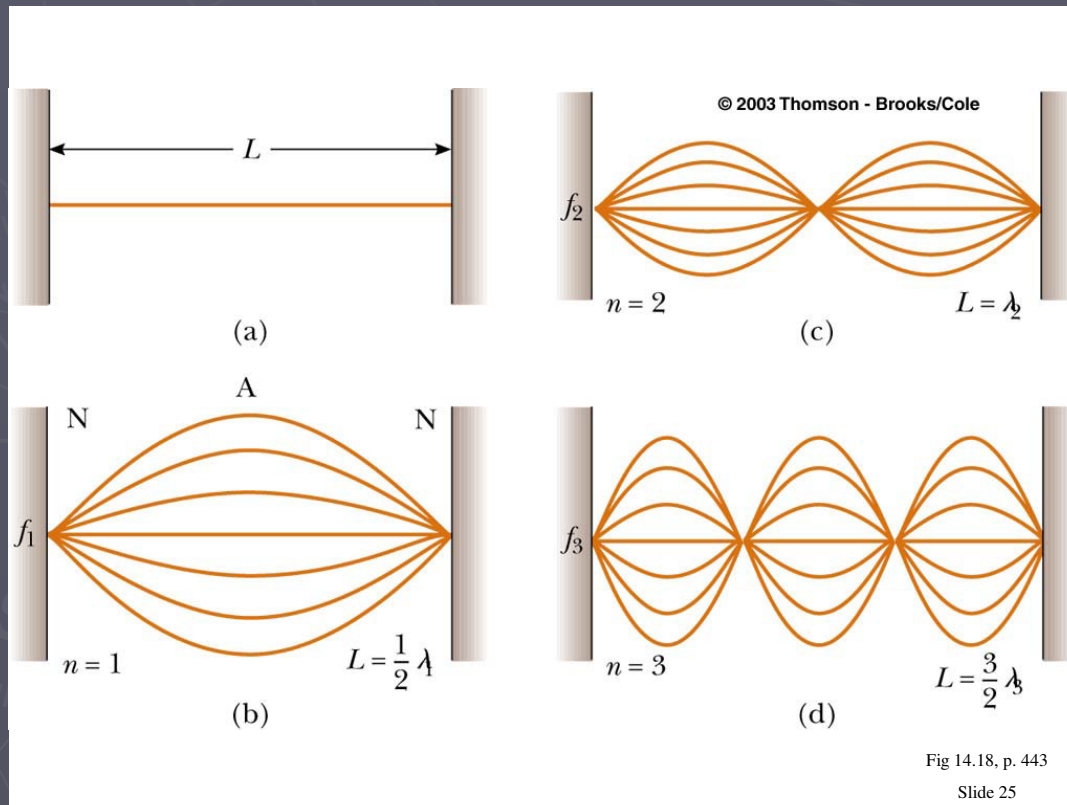
- Perpindahan neto adalah nol pada setiap titik
- Jarak antara dua simpul adalah $\frac{1}{2}\lambda$

► **Perut** : titik-titik yang **dapat** mencapai simpangan maksimum

Perut terjadi ketika gelombang berdiri bergetar dengan amplitudo maksimum

Gelombang Berdiri pada Tali (terikat pada kedua ujung)

- Frekuensi getaran terendah dinamakan *frekuensi fundamental / frekuensi nada dasar (f_1)*.



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

Syarat gelombang berdiri untuk kedua ujung terikat

$$f_n = n f_1 = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Frekuensi resonansi, kedua ujung terikat

Gelombang Berdiri pada Tali (terikat pada satu ujung dan bebas pada ujung lain)

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

Syarat gelombang berdiri untuk kedua ujung terikat

$$f_n = n f_1 = \frac{nv}{4L} = \frac{n}{4L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$n = 1, 3, 5 \dots$$

Frekuensi resonansi, kedua ujung terikat

Animasi 11.20

Animasi 11.21

PR Gelombang Tali

Buku Tipler Jilid I

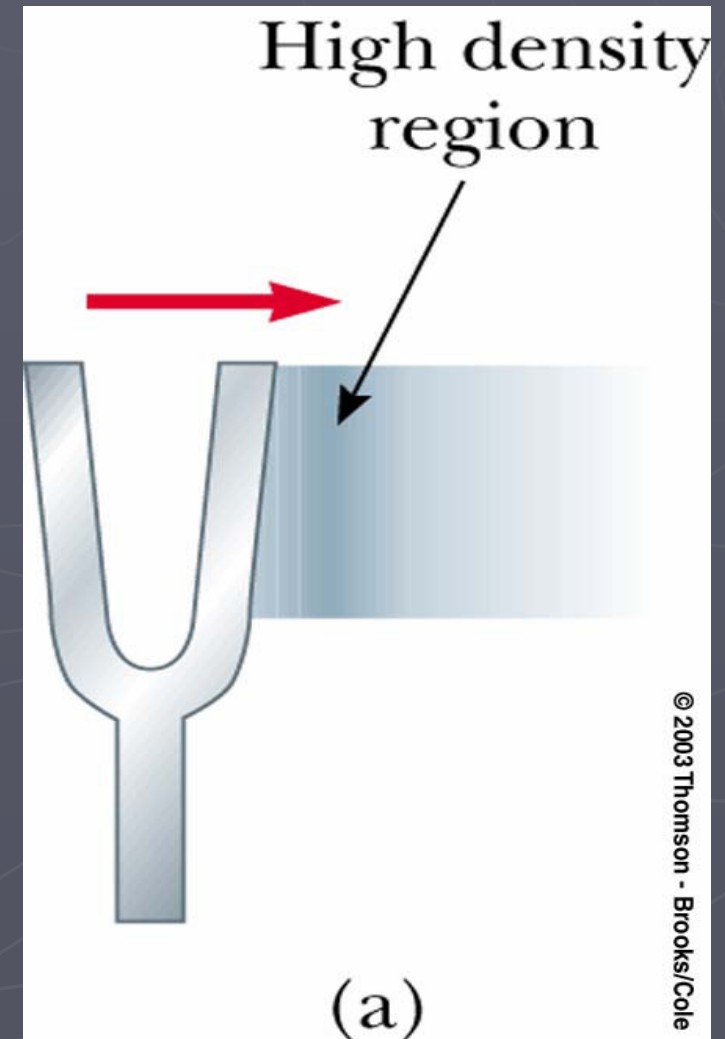
Hal 502-504 no. 45, 48, 56, 62 & 64

Gelombang bunyi

- ▶ Gelombang longitudinal yang memerlukan medium dalam perambatannya (zat padat, cair dan gas)
- ▶ Sumber bunyi: garputala, audio generator, dll

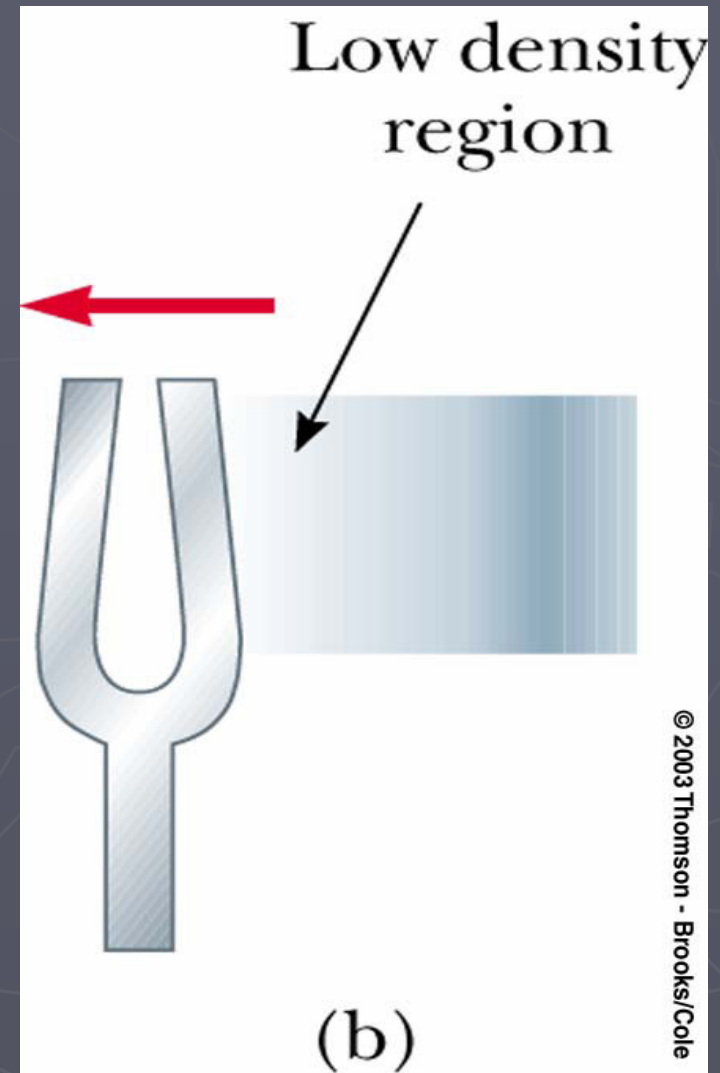
Garpu Tala sebagai penghasil Bunyi

- ▶ **Garpu tala** akan menghasilkan sebuah nada yang murni
- ▶ Ketika garpu bergetar, getarannya akan mengganggu udara disekitarnya
- ▶ Ketika garpu di tarik ke kanan, akan memaksa molekul udara disekitarnya saling berdekatan
- ▶ Hal ini menghasilkan daerah dengan kerapatan yang tinggi pada udara
 - Daerah ini adalah **mampatan** (*compression*)

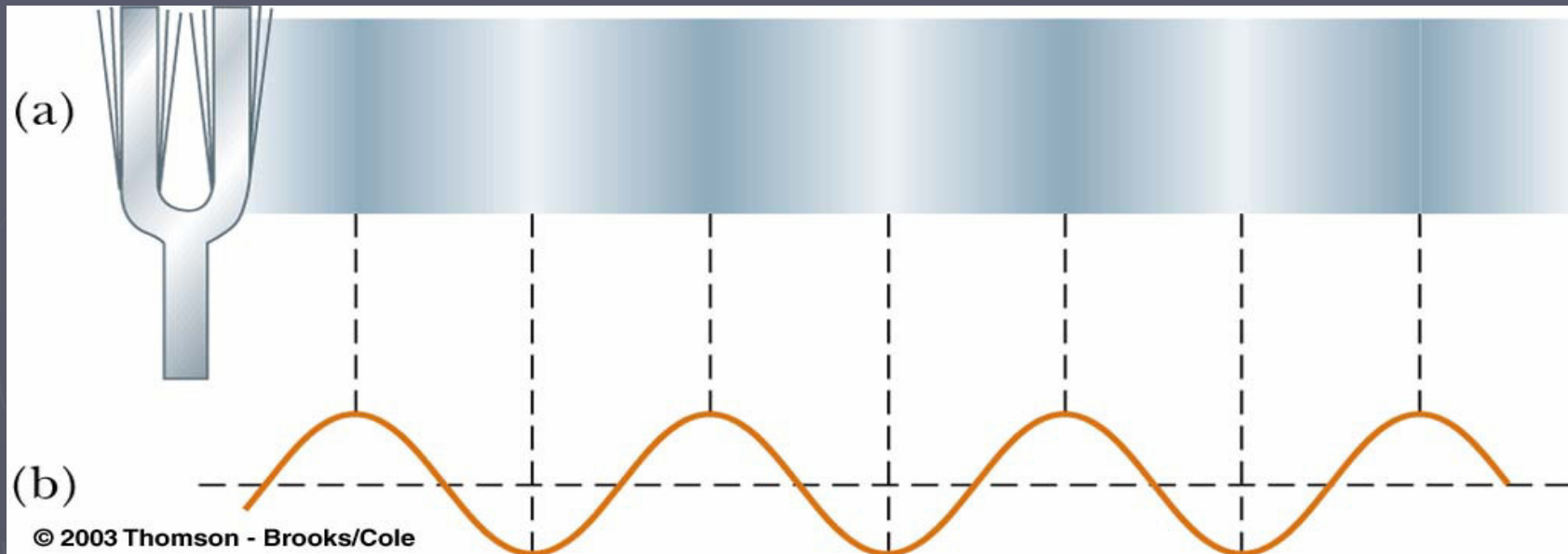


Penggunaan Garpu Tala (lanjutan)

- ▶ Ketika garpu di tekan ke kiri (saling berdekatan), molekul-molekul udara di sebelah kanan garpu akan saling merenggang
- ▶ Menghasilkan daerah dengan kerapatan yang rendah
 - Daerah ini disebut **regangan** (*rarefaction*)



Penggunaan Garpu Tala (lanjutan)



- ▶ Ketika garpu tala terus bergetar, serangkaian **mampatan (compression)** dan **regangan (rarefaction)** menjalar dari garpu
- ▶ Kurva sinusoidal dapat digunakan untuk menggambarkan gelombang longitudinal
 - Puncak sesuai dengan mampatan dan lembah sesuai dengan regangan

Laju gelombang bunyi

Laju gelombang bunyi

- Udara/air dengan B = modulus limbak, ρ = rapat massa medium

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

- Batang padat dan panjang dengan Y = modulus young

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

- Gas dengan T = temperatur mutlak dalam kelvin, $R=8,314$ J/mol, K =konstanta gas universal dan M =massa molar gas/massa 1 mol gas dan γ =konstanta yang bergantung jenis gas (untuk udara $M=29.10^{-3}$ kg/mol dan $\gamma=1.4$)

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

Laju Gelombang Bunyi di Udara

$$v = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{T}{273 K}}$$

- ▶ 331 m/s adalah laju gelombang bunyi pada 0° C
- ▶ T adalah **suhu mutlak** ($T = t_c + 273$) K

Energi Gelombang Bunyi

- ▶ Energi gelombang bunyi di udara adalah energi osilasi molekul udara yang bervibrasi dengan gerak harmonik sederhana sepanjang arah penjalaran gelombang. Analogi dengan energi gelombang pada tali (1D) tetapi untuk bunyi penjalaran 3D $\Delta m = \rho \Delta V$

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\Delta m)\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \Delta x$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v \Delta t$$

Perubahan energi pada tali (1D)

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\Delta m)\omega^2 s_o^2 = \frac{1}{2}\rho\omega^2 s_o^2 \Delta V$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}\rho\omega^2 s_o^2 Av \Delta t \quad \text{karena} \quad \Delta V = Av \Delta t$$

Perubahan energi gelombang bunyi menjalar ke semua arah (3D) dengan s_o adalah amplitudo gelombang bunyi

Daya dan Intensitas bunyi

- ▶ 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 $4\pi r^2$. Jika P adalah daya yang dipancarkan sumber yaitu energi per satuan waktu maka

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_o^2 A v$$

- ▶ Dan intensitas (= daya per satuan luas yang datang tegak lurus terhadap arah penjalaran)

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_o^2 v$$

Intensitas dari Sumber Titik

- ▶ Intensitas berubah sebagai $1/r^2$, ini adalah *hubungan inverse square*
- ▶ Daya rata-rata yang melalui permukaan bola (sumber sebagai pusatnya) adalah sama
- ▶ Untuk membandingkan intensitas dari dua tempat, hubungan inverse square dapat digunakan

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Tingkat intensitas Gelombang Bunyi

- ▶ Kenyaringan suara pada telinga manusia adalah **logaritmik**
- ▶ β adalah **tingkat intensitas** atau **tingkat desibel** dari bunyi

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

- ▶ I_0 adalah ambang pendengaran
 - ▶ Ambang pendengaran adalah 0 dB
 - ▶ Ambang rasa sakit adalah 120 dB
 - ▶ Pesawat jet sekitar 150 dB

Jenis Intensitas Gelombang Bunyi

► Ambang Pendengaran

- Bunyi terendah yang bisa didengar manusia
- Sekitar $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$

► Ambang Rasa Sakit

- Bunyi terkeras yang masih bisa di toleransi manusia
- Sekitar 1 W/m^2

- Telinga adalah detektor yang sensitif terhadap gelombang bunyi

Kategori Gelombang Bunyi

- ▶ **Gelombang yang dapat didengar (audible)**
 - Dalam jangkauan pendengaran telinga manusia
 - Normalnya antara 20 Hz sampai 20.000 Hz
- ▶ **Gelombang Infrasonik**
 - Frekuensinya di bawah 20 Hz
- ▶ **Gelombang Ultrasonik**
 - Frekuensinya di atas 20.000 Hz

Aplikasi dari Gelombang Ultrasonik

- ▶ Dapat digunakan untuk menghasilkan gambar dari benda yang kecil
- ▶ Secara lebih luas digunakan sebagai alat diagnosa dan pengobatan di bidang medis
 - Ultrasonik flow meter untuk mengukur aliran darah
 - Dapat menggunakan alat *piezoelectrik* yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik
 - ▶ Kebalikannya: **mekanik ke listrik**
 - Ultrasound untuk mengamati bayi di dalam kandungan
 - Cavitron Ultrasonic Surgical Aspirator (CUSA) digunakan dalam proses pembedahan untuk mengangkat tumor otak

Efek Doppler

- ▶ Efek Doppler muncul ketika terdapat gerak relatif antara sumber gelombang dan pengamat
 - Ketika sumber dan pengamat saling mendekat, pengamat mendengar frekuensi yang lebih tinggi daripada frekuensi sumber
 - Ketika sumber dan pengamat saling menjauh, pengamat mendengar frekuensi yang lebih rendah daripada frekuensi sumber
- ▶ Meskipun Efek Doppler biasanya terjadi pada gelombang bunyi, fenomena tersebut terjadi juga pada gelombang yang lain

Efek Doppler

- ▶ Secara umum frekuensi yang terdengar:

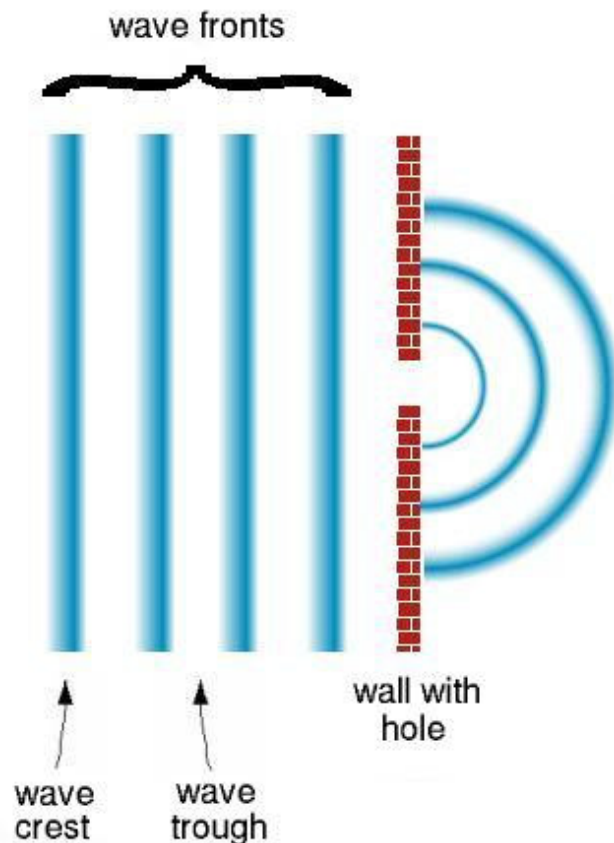
$$f' = f \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right)$$

- ▶ f =frekuensi sumber, v =laju gelombang bunyi, v_o = laju sumber bunyi dan v_s = laju pengamat
- ▶ v_o dan v_s positif jika bergerak saling mendekat
 - Frekuensi yang terdengar lebih tinggi
- ▶ v_o dan v_s negatif jika bergerak saling menjauh
 - Frekuensi yang terdengar lebih rendah

Difraksi

- Difraksi : pembelokan gelombang di sekitar suatu penghalang atau pinggir celah

Suatu gelombang melewati suatu celah:



- Jika lebar celah $< \lambda$ maka akan terjadi difraksi. Saat difraksi terjadi arah penjalaran dan bentuk gelombang dapat berubah. Jika lebar celah sangat kecil maka di sekitar celah seolah-olah ada sumber titik pada celah tersebut sehingga dapat menjadi sumber gelombang baru
- Jika lebar celah atau perintang $> \lambda$ dekat tepi lubang, muka gelombang akan terdistorsi dan gelombang tampak sedikit membelok. Namun sebagian muka gelombang tidak terpengaruh
- Jika lebar celah atau perintang $\gg \lambda$, difraksi/pembelokan muka gelombang tidak akan teramati dan gelombang menjalar dengan garis atau berkas lurus

(c) Superposisi

- Interferensi
- Gelombang berdiri
 - (1) Gelombang berdiri pada tali
 - (2) Gelombang berdiri kolom udara (bunyi)
- Layangan
- Polarisasi

Superposisi

► Bagaimana dengan superposisi dua gelombang yang:

Berbeda **amplitudo**?

Berbeda **frekuensi**?

Berbeda **panjang gelombang**?

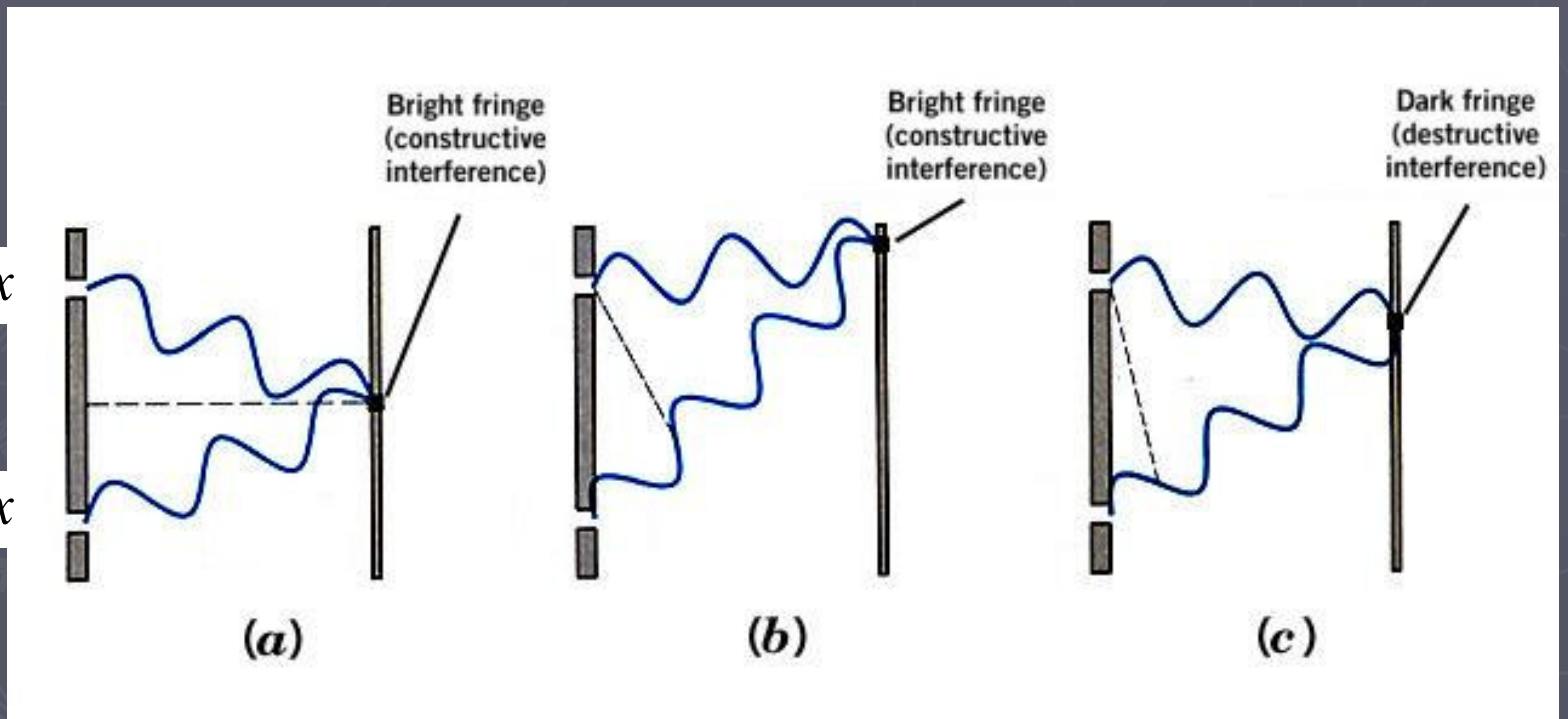
Berbeda **laju gelombang**?

Interferensi

- ▶ **Tinjau:** Dua gelombang harmonik dengan frekuensi, panjang gelombang dan amplitudo yang sama (A) sefase tetapi **sumber gelombang terpisah**
- ▶ Interferensi bergantung pada **beda lintasan**

$$\psi = A \sin kx$$

$$\psi = A \sin kx$$



Beda Lintasan=0

Interferensi
konstruktif

Beda Lintasan= λ

Interferensi
konstruktif

Beda Lintasan= $\lambda/2$

Interferensi
destruktif

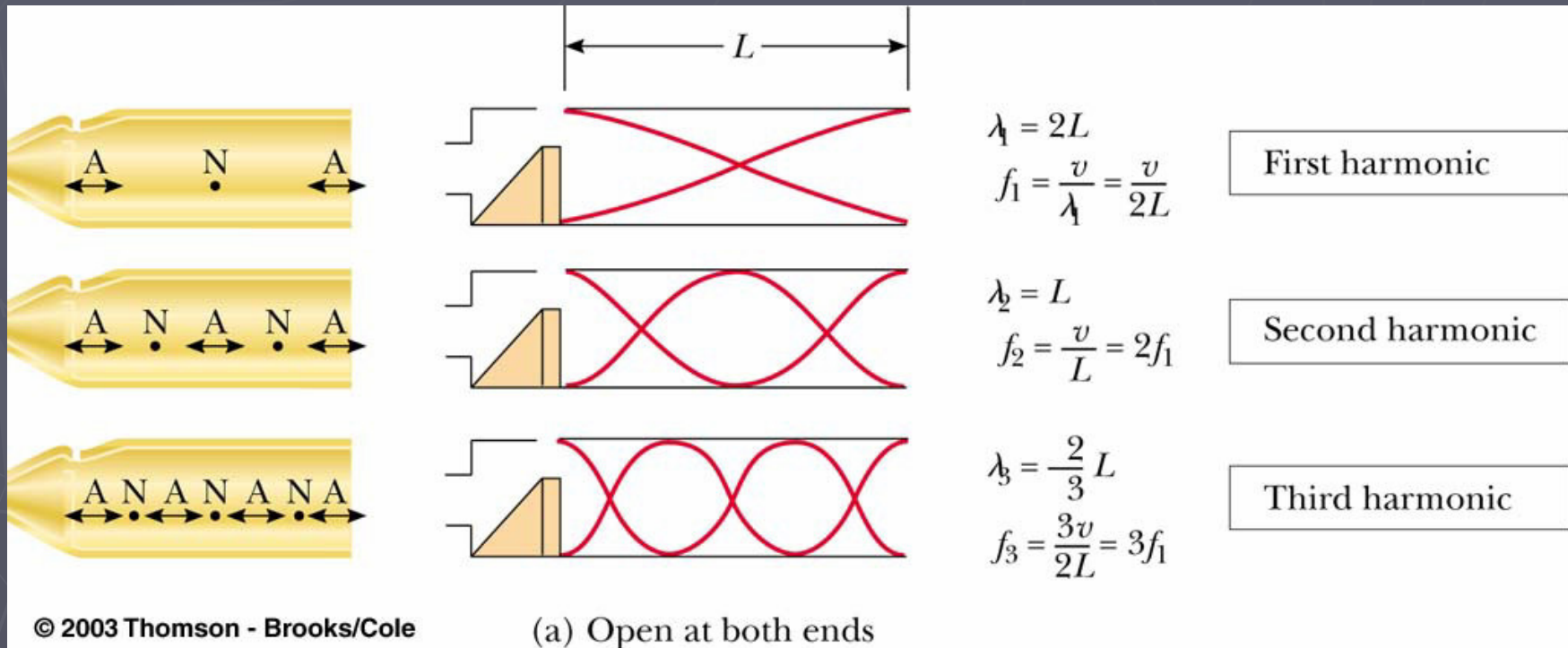
Interferensi

- **Interferensi Konstruktif** terjadi ketika perbedaan lintasan antara dua gelombang adalah nol atau **kelipatan bulat**
 - ▶ Beda lintasan = $n\lambda$
- **Interferensi Destruktif** terjadi ketika perbedaan lintasan antara dua gelombang adalah **setengah kelipatan bulat**
 - ▶ Beda lintasan = $(n + \frac{1}{2})\lambda$

Gelombang Berdiri pada Kolom Udara

- ▶ Jika salah satu ujung dari kolom udara tertutup, simpul harus ada pada ujung tersebut karena pergerakan udara dibatasi
- ▶ Jika ujungnya terbuka, bagian dari udara memiliki kebebasan bergerak dan sebuah perut akan muncul

Pipa dengan Kedua Ujung Terbuka

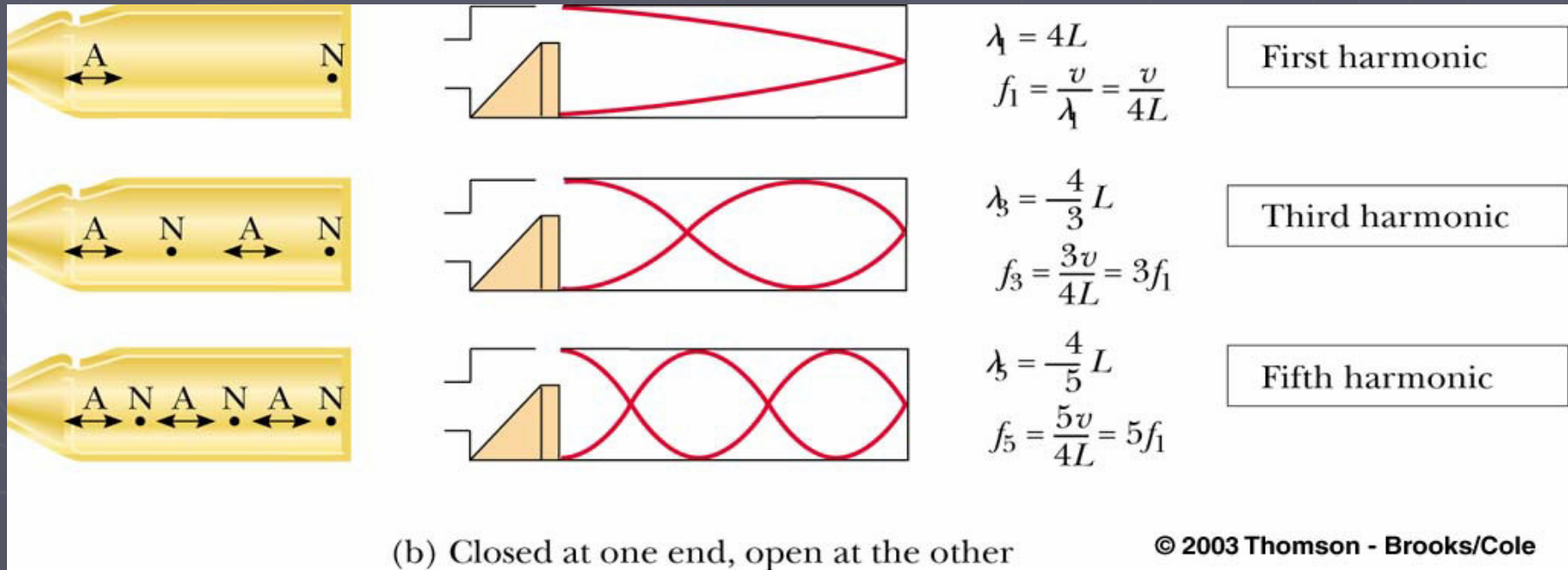


Resonansi pada Kolom Udara dengan Kedua Ujung Terbuka

- ▶ Pada pipa yang kedua ujungnya terbuka, frekuensi alami dari getaran membentuk sebuah deret yang harmonik yang sama dengan perkalian bulat frekuensi dasar

$$f_n = n \frac{v}{2L}, n = 1, 2, 3, \dots$$

Pipa yang Tertutup pada Salah Satu Ujung



© 2003 Thomson - Brooks/Cole

Resonansi pada Kolom Udara yang Tertutup pada Salah Satu Ujung

- ▶ Ujung tertutup adalah simpul
- ▶ Ujung terbuka adalah perut

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

Layangan

- ▶ Interferensi dua gelombang dengan frekuensi berbeda namun hampir sama ($\Delta f \ll$)
- ▶ Layangan bunyi akan terdengar suatu nada yang mempunyai intensitas yang berubah-ubah secara bergantian antara keras dan lemah
- ▶ Δf = frekuensi layangan
- ▶ Telinga manusia hanya dapat mendeteksi layangan dengan frekuensi kurang dari 7 Hz

Aplikasi dan fenomena Layangan

- ▶ (Layangan gelombang bunyi) Membandingkan suatu frekuensi tak diketahui dengan frekuensi yang diketahui
- ▶ (Layangan gelombang bunyi) Mengukur laju mobil dengan mendeteksi perubahan frekuensi kecil berkas gelombang radar yang terpantul dari mobil yang bergerak
- ▶ (Layangan cahaya) Pola moire yang dihasilkan bila dua kumpulan garis paralel dengan jarak sedikit berbeda saling tumpang tindih

Polarisasi

- ▶ Superposisi dua gelombang/lebih yang bidang getarnya saling tegak lurus (misalnya arah y dan arah z)

$$y = A_y \cos(kx - \omega t + \varphi_y)$$

+

$$z = A_z \cos(kx - \omega t + \varphi_z)$$



Polarisasi

- ▶ Ambil saat $x=0$,

$$y = A_y \cos(\omega t - \varphi_y) \quad , \quad z = A_z \cos(\omega t - \varphi_z)$$

- ▶ dengan sedikit trigonometri didapatkan

$$\left(\frac{y}{A_y}\right)^2 + \left(\frac{z}{A_z}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{A_y}\right)\left(\frac{z}{A_z}\right)\cos(\varphi_y - \varphi_z) = \sin^2(\varphi_y - \varphi_z)$$

PR Gelombang Bunyi

Buku Tipler Jilid I

Hal 556 no. 79, 80 & 81