

**DIKTAT**

# **FISIKA GELOMBANG**



**Disusun Oleh:**

**Ratni Sirait, M.Pd**

**NIB 1100000071**

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUMATERA UTARA**

**MEDAN**

**2020**

## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah segala puji hanya milik Allah Tuhan sekalian alam. Atas berkat rahmat dan karuniaNya, saya dapat menyelesaikan penulisan diktat ini dengan judul “**Fisika Gelombang**”. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Muhammad SAW beserta kerabat, sahabat, para pengikutnya sampai akhir zaman, adalah sosok yang telah membawa manusia dan seisi alam dari kegelapan ke cahaya sehingga kita menjadi manusia beriman, berilmu, dan tetap beramal shaleh agar menjadi manusia yang berakhlak mulia.

Penulisan diktat ini bertujuan agar dapat menambah wawasan ilmu pengetahuan dalam instalasi nilai-nilai Islam yang terpadu dalam proses pembelajaran di lingkungan UIN Sumatera Utara, Medan.

Dalam penulisan diktat ini, saya sangat menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang perlu perbaikan di sana sini, sumbangan pemikiran yang membangun sangat penulis harapkan dari rekan-rekan sejawat terutama dari dosen-dosen senior yang terhimpun dalam mata kuliah serumpun. Semoga konten fisika gelombang dapat diperkaya melalui evaluasi terus menerus. Atas segala budi baik yang telah penulis terima dari semua pihak untuk itu saya ucapkan ribuan terima kasih. Semoga Allah SWT membalas kebaikan seluruh rekan sekalian dengan ganjaran yang berlipat ganda, Amiin.

Medan, September 2020

Penulis



**Ratni Sirait, M.Pd**

**NIB 110000071**

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<i>i</i>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<i>ii</i>
<b>BAB 1 GERAK HARMONIK SEDERHANA</b>	
1.1. Pegas.....	1
1.2. Persamaan Matematis Gerak Harmonik Sederhana.....	2
1.3. Periode Dan Frekuensi Gerak Harmonik Sederhana .....	4
1.4. Energi Osilasi Harmonik Sederhana .....	7
1.5. Pendulum (Bandul Sederhana).....	12
1.6. Gerak Harmonik Tereadam.....	14
1.7. Gerak Harmonik Terpaksa .....	19
1.8. Aplikasi Gerak Harmonik Sederhana.....	21
<b>BAB 2 GELOMBANG</b>	
2.1. Pengertian Gelombang .....	25
2.2. Jenis Gelombang .....	25
2.3. Sifat-Sifat Gelombang.....	29
2.4. Pemanfaatan Gelombang .....	32
2.5. Besaran-Besaran Gelombang .....	32
2.6. Hubungan Kecepatan Dan Sifat Medium .....	35
<b>BAB 3 GELOMBANG MEKANIK</b>	
3.1. Jenis Gelombang Mekanik.....	40
3.2. Gelombang Periodik.....	42
3.3. Deskripsi Matematis Gelombang.....	44
3.4. Laju Gelombang Transversal Pada Dawai .....	51
3.5. Laju Gelombang Longitudinal .....	52
3.6. Gelombang Bunyi Dalam Gas.....	56

<b>BAB 4 SIFAT-SIFAT UMUM GELOMBANG</b>	
4.1. Superposisi Gelombang .....	60
4.2. Interferensi Gelombang.....	61
4.3. Refleksi Dan Transmisi Gelombang.....	68
4.4. Gelombang Berdiri Pada Dawai.....	72
4.5. Difraksi Gelombang .....	76
4.6. Polarisasi Gelombang.....	78
4.7. Dispersi.....	79
<b>BAB 5 GELOMBANG BUNYI</b>	
5.1. Gelombang Bunyi .....	83
5.2. Getaran Dawai.....	86
5.3. Pipa Organa.....	89
5.4. Intensitas Bunyi.....	93
5.5. Layangan Bunyi .....	97
5.4. Efek Doppler .....	99
<b>BAB 6 GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK</b>	
6.1. Teori Maxwell.....	105
6.2. Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	107
6.3. Energi Gelombang Elektromagnetik.....	108
6.4. Intensitas Gelombang Elektromanetik .....	110
6.5. Aplikasi Gelombang Elektromagnetik .....	110
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>116</b>

# BAB 1

## GERAK HARMONIK SEDERHANA

Gerak gelombang merupakan gejala yang ditimbulkan oleh suatu gangguan lokal pada besaran fisis tertentu serta perambatan gangguan itu dalam medium di sekitarnya. Gangguan tersebut dapat berupa osilasi kedudukan partikel, osilasi tekanan atau kerapatan massa dalam medium bersangkutan, dan osilasi medan listrik/magnet yang berasal dari osilasi arus atau osilasi rapat muatan listrik. Selain gelombang elektromagnet, perambatan gangguan lokal tersebut selalu berlangsung dalam medium material. Gelombang yang terjadi dapat bersifat satu dimensi (misalnya gelombang tali), dua dimensi (misalnya gelombang permukaan air dan selaput tipis) atau bersifat tiga dimensi seperti gelombang elektromagnet, gelombang laut dan gelombang gempa bumi. Pada bab pertama ini akan dibahas mengenai gerak harmonik sederhana.

### 1.1. Pegas

Gerak periodik adalah gerak suatu benda yang secara teratur kembali ke posisi tertentu dalam interval waktu yang tetap. Apabila suatu partikel melakukan gerak periodik pada lintasan yang sama maka gerakannya disebut gerak osilasi/getaran. Bentuk sederhana dari gerak periodik adalah benda yang berosilasi pada ujung pegas (Gambar 1.1). Karenanya kita menyebutnya gerak harmonik sederhana. Gerak harmonik sederhana disebabkan oleh gaya pemulih atau gaya balik linier ( $F_p$ ), yaitu resultan gaya yang arahnya selalu menuju titik kesetimbangan dan besarnya sebanding dengan simpangannya, dimana arah gaya selalu berlawanan dengan arah simpangan yang dikenal dengan Hukum Hooke:<sup>1</sup>

$$F_p = -kx$$

**Keterangan:**

- $F_p$  : gaya pegas (Newton)
- $k$  : konstanta pegas (N/m)
- $x$  : simpangan (m)

---

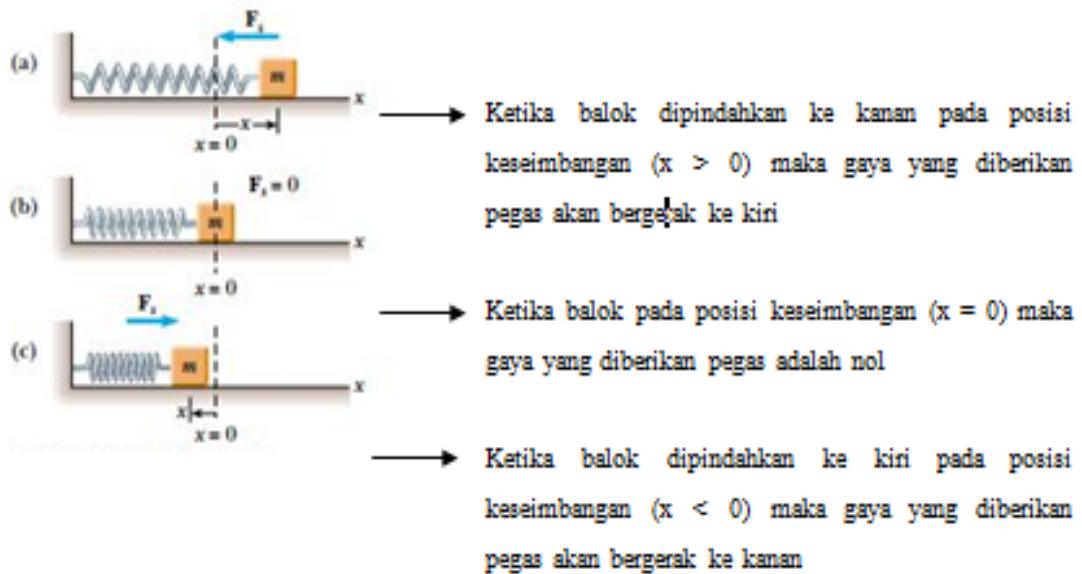
<sup>1</sup> Halliday, David dan Robert Resnick. 2007. *Fisika Edisi ke 3 Jilid1*. Erlangga, Jakarta.

Dari persamaan hukum II Newton, maka diperoleh:

$$F = m a$$

$$-k x = m a$$

$$a = -\frac{k}{m} x$$



**Gambar 1.1.** Pegas yang menempel pada sebuah balok pada permukaan tanpa adanya gesekan

## 1.2. Persamaan Matematis Gerak Harmonik Sederhana

Gerak yang dijelaskan di bagian sebelumnya sering kita bahas sebagai partikel untuk model gerak harmonik sederhana guna menjelaskan keadaan seperti itu. Secara matematis untuk model ini umumnya dengan memilih  $x$  sebagai sumbu osilasi. Percepatan gerak harmonik dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Maka persamaan 1.2 dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{k}{m} x$$

Dimana  $\omega^2 = \frac{k}{m}$ , maka

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x \quad (1.3)$$

Berdasarkan penyelesaian secara matematis untuk Persamaan 1.3, yaitu fungsi  $x(t)$  merupakan simpangan harmonik sederhana memenuhi persamaan turunan orde kedua dan termasuk representasi secara matematis dari posisi partikel sebagai fungsi waktu. Keadaan posisi partikel sebagai fungsi waktu dalam fungsi trigonometri dapat dituliskan:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.4)$$

Dengan  $A$ ,  $\omega$  dan  $\varphi$  adalah konstan.

Secara eksplisit dapat ditunjukkan persamaan (1.3) ditulis menjadi:

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan simpangan} \quad \frac{dx}{dt} &= \frac{d}{dt} [A \cos(\omega t + \varphi)] \\ \frac{dx}{dt} &= -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Kecepatan maksimum

$$v_{maks} = A \omega \quad (1.6)$$

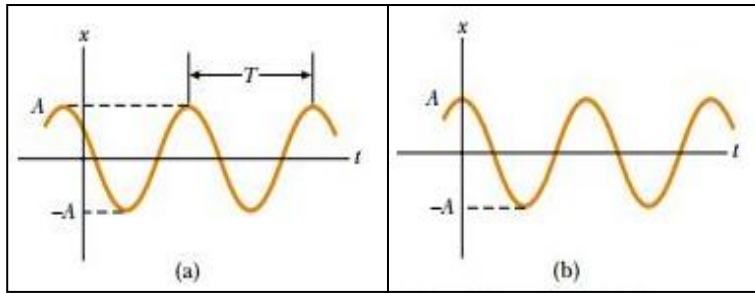
Percepatan simpangan

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\omega A \frac{d}{dt} \sin(\omega t + \varphi) \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Percepatan maksimum

$$a_{maks} = A \omega^2 \quad (1.8)$$

Parameter  $A$ ,  $\omega$  dan  $\varphi$  adalah gerak tetap. Untuk memberikan arti fisik pada keadaan ini, akan lebih udah direpresentasi dalam bentuk grafik dari gerak dengan memplot  $x$  sebagai fungsi dari  $t$  seperti pada Gambar 1.2 berikut ini



**Gambar 1.2.** a). Grafik  $x-t$  untuk gerak partikel pada harmonik sederhana. Amplitudo gerak yaitu  $A$ , dan periode  $T$ . b). grafik  $x-t$  untuk kasus dimana  $x = A$  pada  $t = 0$  dan  $\varphi = 0$

Konstanta  $\omega$  disebut frekuensi sudut yang nilainya setara dengan 1 radian/detik. Satuan  $\omega$  merupakan seberapa cepat terjadinya osilasi. Apabila terdapat banyak setiap waktu, maka besar frekuensi sudut dituliskan:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.9)$$

Sudut konstan  $\varphi$  disebut sebagai phase konstan atau sudut awal phase dan  $A =$  amplitudo maka dapat ditentukan posisi dan kecepatan partikel pada saat  $t = 0$ . Jika posisi maksimum partikel yaitu  $x = A$  dan  $t = 0$  dan  $\varphi = 0$ , maka gerak partikelnya dapat dilihat pada gambar 1.2b. Besarnya  $(\omega t + \varphi)$  disebut phase gerak. Fungsi  $x(t)$  harga periodiknya sama untuk setiap pertambahan  $\omega t$  sebesar  $2\pi$ .

### 1.3. Periode dan Frekuensi Gerak Harmonik Sederhana

Gerak harmonik sederhana adalah gerak melingkar beraturan yang berada pada salah satu sumbu utama. Oleh karena itu, periode dan frekuensi pada pegas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan  $F_p = -kx$  dan gaya sentripetal  $F_s = -ma_s = -m4\pi^2 f^2 x$  sehingga:



$$\begin{aligned}
F_p &= F \\
-kx &= -m4\pi^2 f^2 x \\
f^2 &= \frac{k}{4\pi^2 m} & (1.10) \\
f^2 &= \frac{1}{4\pi^2} \sqrt{\frac{k}{m}} \\
f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}
\end{aligned}$$

Sehingga frekuensinya adalah:  $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$  dan periodenya adalah:  $2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

**Keterangan:**

- $f$  : frekuensi (/sekon)
- $T$  : periode (sekon)
- $k$  : konstanta pegas (N/m)
- $m$  : massa beban (kg)

### Contoh soal 1

Sebuah benda melakukan gerak harmonik sederhana pada sumbu X. Posisi simpangannya berubah terhadap waktu berdasarkan:  $X = 4 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$  dimana

satuan  $t$  dalam sekon dan satuan  $\omega$  dalam radian. Tentukanlah:

- a. Amplitudo, frekuensi dan periode
- b. Hitunglah kecepatan dan percepatan
- c. Dengan menggunakan jawaban bagian b, posisi, kecepatan dan percepatan pada saat  $t = 1$  sekon adalah

Diketahui:  $X = 4 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

$$A = 4 \text{ m}$$

$$\omega = \pi \text{ rad / s}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{4}$$

Ditanya:

- $A, f$  dan  $T$ .....?
- $v$  dan  $a$ .....?
- $x, v$  dan  $a$  jika  $t=1$  sekon.....?

Penyelesaian:

- a. Amplitudo, frekuensi dan periode

$$X = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$X = 4 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$A = 4 \text{ m}, \quad \omega = \pi \text{ rad}, \quad \varphi = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pi}{2\pi} = 0,5 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,5 \text{ Hz}} = 2 \text{ sekon}$$

- b. Kecepatan dan percepatan

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi)$$

$$v = -4\pi \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right) \implies \text{Kecepatan}$$

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$a = -4\pi^2 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right) \implies \text{Percepatan}$$

c. Kedudukan, kecepatan dan percepatan ketika  $t = 1$  detik

$$x = 4 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$x = 4 \cos\left(\pi + \frac{\pi}{4}\right) \implies \text{posisi pada saat } t = 1 \text{ sekon}$$

$$x = 4 \cos \frac{5\pi}{4}$$

$$x = -2.83 \text{ m}$$

$$v = -4 \pi \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$v = -4 \pi \sin\left(\pi + \frac{\pi}{4}\right) \implies \text{kecepatan pada saat } t = 1 \text{ sekon}$$

$$v = -4 \pi \sin \frac{5\pi}{4}$$

$$v = -8.89 \text{ m/s}$$

$$a = -4 \pi^2 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$a = -4 \pi^2 \cos\left(\pi + \frac{\pi}{4}\right) \implies \text{percepatan pada saat } t = 1 \text{ sekon}$$

$$a = -4 \pi^2 \cos \frac{5\pi}{4}$$

$$a = 27.9 \text{ m/s}^2$$

#### 1.4. Energi Osilasi Harmonik Sederhana

Gambar 1.3 menjelaskan tentang sistem pada balok-pegas. Gambar tersebut menjelaskan bahwa karena adanya gesekan pada permukaan, sistem balok-pegas menjadi terisolasi sehingga dihasilkan energi mekanik total pada suatu sistem adalah konstan. Kita anggap bahwa pegas tidak memiliki massa sehingga balok memiliki energi kinetik. Untuk menjelaskan hal tersebut maka dapat menggunakan persamaan energi kinetik balok yaitu:<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Giancoli, Douglas C. 1996. *Physics* (3<sup>rd</sup> Edition). New York: Prentice Hall, Inc.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \quad (1.11)$$

Energi potensial elastis tersimpan pada pegas pada setiap perpanjangan  $x$  diberikan oleh  $\frac{1}{2}kx^2$ . Menggunakan Persamaan 1.4 memberikan:

$$U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (1.12)$$

Kita melihat bahwa  $K$  dan  $U$  selalu besaran positif atau nol. Karena  $\omega^2 = k/m$ , kita bisa menunjukkan total energi mekanik pada osilator harmonik sederhana yaitu:

$$E = K + U$$

$$E = \frac{1}{2}kA^2 [\sin^2(\omega t + \varphi) + \cos^2(\omega t + \varphi)]$$

Dari identitas  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ , sehingga persamaannya menjadi:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 \quad (1.13)$$

Artinya, energi mekanik total pada gerka harmonik sederhana bersifat konstan dan sebanding dengan kuadrat amplitudo. Nilai energi mekanik total sama dengan energi potensial maksimum yang tersimpan pada pegas ketika  $x = \pm A$  dan nilai  $v=0$  artinya tidak ada energi kinetik yang dihasilkan. Pada posisi kesetimbangan, Pada posisi kesetimbangan,  $U=0$  dimana  $x=0$  maka energi totalnya sama dengan energi kinetiknya  $\frac{1}{2}kA^2$ .

$$E = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

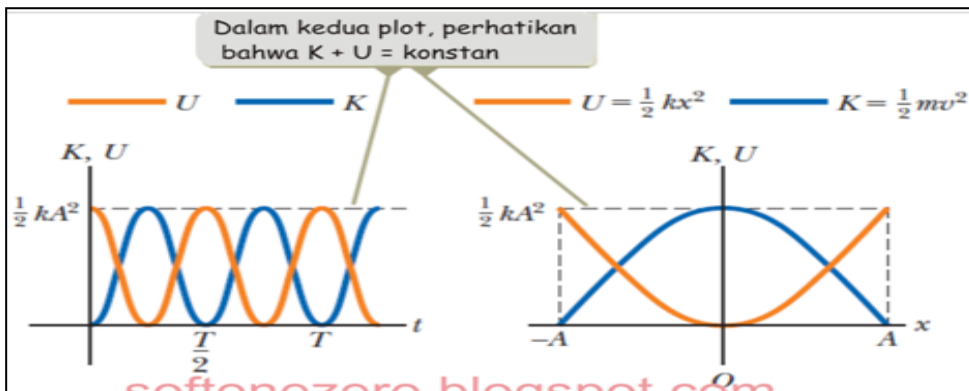
$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2$$

(pada sumbu  $x = 0$ )

$$E = \frac{1}{2}m \frac{k}{m} A^2$$

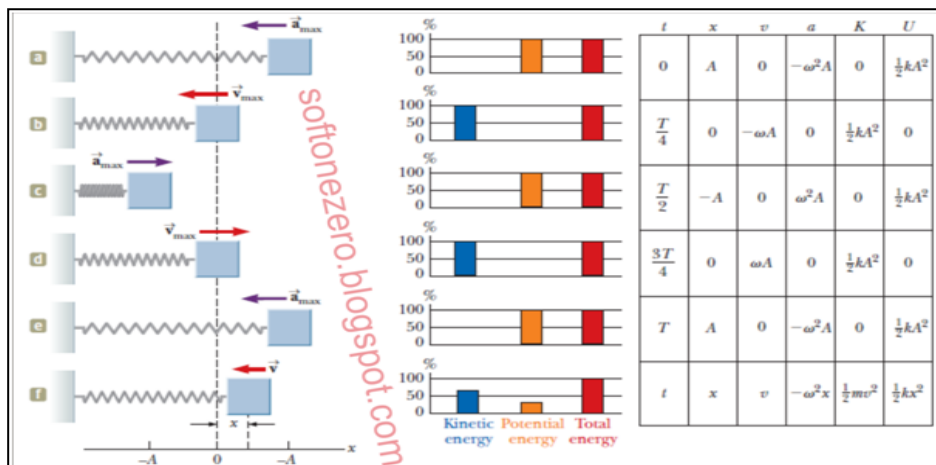
$$E = \frac{1}{2}k A^2$$

Gambar 1.3a menjelaskan hubungan energi kinetik dengan energi potensial dimana besar  $\varphi=0$ . Jika ditinjau terhadap waktu, besar energi kinetik dan energi potensial adalah konstanta yaitu sebesar  $\frac{1}{2}kA^2$  yang disebut dengan energi total sistem. Apabila nilai K dan U di plot pada sumbu X yang dapat dilihat pada gambar 1.3b. maka energi akan terus menerus berubah menjadi energi potensial yang tersimpan pegas dan energi kinetik yang tersimpan pada balok



**Gambar 1.3.** (a). Energi kinetik dan energi potensial dengan waktu untuk osilator harmonik sederhana dengan  $O = 0$ . (b). energi kinetik dan energi potensial dibandingkan posisi untuk osilator harmonik sederhana.

Gambar 1.4 menggambarkan posisi, kelajuan, percepatan, energi kinetik, dan energi potensial pada suatu sistem balok-pegas untuk satu periode penuh dari gerak.



**Gambar 1.4.** (a) sampai (e) beberapa waktu dalam gerak harmonik sederhana

untuk sistem balok-pegas. Grafik batang energi menunjukkan distribusi energi dari sistem pada setiap saat. Parameter dalam tabel disebelah kanan memperlihatkan sistem balok-pegas, dengan asumsi pada  $t = 0$ ,  $x = A$  maka  $x = A \cos \omega t$ . Selama lima waktu khusus ini, salah satu jenis energi adalah bernilai nol. (F) sebuah titik sembarang dalam gerak osilator. Sistem ini memiliki baik energi kinetik dan energi potensial pada saat ini seperti yang ditunjukkan dalam grafik batang

Sehingga, diketahui kelajuan balok pada posisi sembarang dengan menunjukkan energi total sistem untuk kedudukan  $x$  sembarang sebagai:

$$E = K + U$$

$$\frac{1}{2}k A^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}k x^2$$

$$\frac{1}{2}k A^2 - \frac{1}{2}k x^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$k A^2 - k x^2 = mv^2$$

$$v^2 = \frac{kA^2 - kx^2}{m}$$

$$v^2 = \frac{k(A^2 - x^2)}{m}$$

(1.14)

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)}$$

$$v = \omega \sqrt{(A^2 - x^2)}$$

Berdasarkan persamaan 1.11 dapat dilihat bahwa kecepatan maksimum berada pada saat  $x=0$  dan bernilai 0 pada saat  $x=\pm A$

### Contoh Soal 2

Sebuah balok yang menempel pada pegas dengan konstanta pegas 6.50 N/m dan mengalami gerak harmonik sederhana dengan amplitude 10 cm. Ketika balok berada ditengah, kecepatannya 30 m/s. Hitunglah massa balok, periode getaran dan percepatan maksimum balok.

Diketahui:  $k = 6.50 \text{ N / m}^2$

$$A = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$x = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$$

$$v = 0.3 \text{ m / s}$$

Ditanya:

- Massa balok.....?
- Periode .....
- Percepatan maksimum balok.....?

Penyelesaian:

- Massa balok

$$E_1 = E_2$$

$$K + U = K + U$$

$$\frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2$$

$$0 + \frac{1}{2} (6.50) (0.1)^2 = \frac{1}{2} m (0.3)^2 + \frac{1}{2} (6.50) (0.05)^2$$

$$0.0325 = 0.045 m + 0.008125$$

$$m = \frac{0.024375}{0.045}$$

$$m = 0.542 \text{ kg}$$

- Periode

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.542}{6.50}} = 1.81 \text{ sekon}$$

- Percepatan maksimum balok

$$a_{maks} = A \omega^2$$

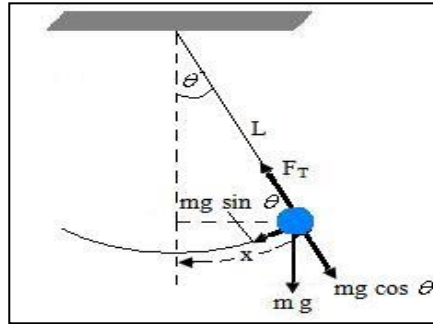
$$a_{maks} = A \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$a_{maks} = 0.1 \sqrt{\frac{6.50}{0.542}}$$

$$a_{maks} = 1.19 \text{ m / s}^2$$

### 1.5. Pendulum (Bandul Sederhana)

Bandul sederhana (pendulum) adalah contoh dari gerak osilasi. Pendulum terdiri dari seutas tali ringan dan sebuah bola kecil yang bermassa  $m$  yang digantung pada ujung tali, seperti yang dijelaskan pada gambar 1.5. Untuk menganalisis bandul sederhana, maka gaya gesek udaranya harus diabaikan dan massa tali di abaikan.



Gambar 1.5. pendulum sederhana

Gambar 1.5 menunjukkan bandul sederhana yang terdiri dari sebuah tali dengan panjang  $L$  dan bola kecil yang bermassa  $m$ . Gaya yang bekerja pada bandul sederhana yaitu gaya berat  $w = mg$  dan gaya tegangan tali  $F_T$ . Gaya berat  $w = mg \cos \theta$  yang searah terhadap tali dan  $w = mg \sin \theta$  yang tegak lurus terhadap tali. Bandul dapat berayun karena adanya besaran  $mg \sin \theta$  dimana gaya gesek udara diabaikan sehingga bandul dapat melakukan getaran sepanjang busur lingkaran pada amplitudo tetap.

Hubungan panjang busur  $x$  terhadap  $\theta$  yang ditetapkan pada persamaan:

$$x = L \theta \quad (1.15)$$

$\theta$  adalah perbandingan antara jarak  $x$  terhadap jari-jari lingkaran  $r$  yang dinyatakan dalam satuan radian. Karena lintasan bandul berupa lingkaran maka gunakan pendekatan ini untuk menentukan besar simpangannya dimana jari-jari lingkaran merupakan panjang tali  $L$

Syarat sebuah benda melakukan Gerak Harmonik Sederhana adalah apabila gaya pemulih sebanding dengan simpangannya. Apabila gaya pemulih sebanding dengan simpangan  $x$  atau  $\theta$  maka pendulum melakukan Gerak Harmonik Sederhana.



Gaya pemulih yang bekerja pada pendulum secara matematis ditulis:

$$F = -m g \sin \theta \quad (1.16)$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya mempunyai arah yang berlawanan dengan simpangan  $\theta$ . Berdasarkan persamaan (1.16), tampak bahwa gaya pemulih sebanding dengan  $\sin \theta$ , bukan dengan  $\theta$ . Karena gaya pemulih  $F$  berbanding lurus dengan  $\sin \theta$  bukan dengan  $\theta$ , maka gerakan tersebut bukan merupakan Gerak Harmonik Sederhana. Alasannya jika sudut  $\theta$ , maka panjang busur  $x (x = L \theta)$  hampir sama dengan panjang  $L \sin \theta$  (garis putus-putus pada arah horisontal). Dengan demikian untuk sudut yang kecil, lebih baik digunakan pendekatan:

$$\sin \theta \approx \theta$$

Sehingga persamaan gaya pemulih menjadi:

$$F = -m g \sin \theta \approx -m g \theta \quad (1.17)$$

$$x = L \theta$$

Karena

$$\theta = \frac{x}{L}$$

Frekuensi pendulum sederhana dapat ditentukan dengan memakai persamaan:

$$F_p = F_{\text{sentripetal}}$$

$$m g \frac{x}{L} = 4 \pi^2 m f^2 x$$

$$\frac{g}{L} = 4 \pi^2 f^2$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (1.18)$$

Sehingga periodenya adalah  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

Berdasarkan persamaan di atas, tampak bahwa periode dan frekuensi getaran pendulum sederhana bergantung pada panjang tali dan percepatan gravitasi. Percepatan gravitasi bernilai tetap, sehingga periode ayunan pendulum sepenuhnya hanya bergantung pada panjang tali ( $L$ ). Dengan kata lain, periode dan frekuensi pendulum tidak bergantung pada massa pendulum. Anda dapat membuktikan hal tersebut dengan membandingkan ketika mendorong seorang yang gendut di atas ayunan dan mendorong seorang anak kecil kurus pada ayunan yang sama.

### Contoh Soal 3

Seseorang memasuki tower tinggi. Orang tersebut mencatat bahwa pendulum panjang memanjang dari langit-langit hampir ke lantai dengan periode 12 sekon. Hitunglah tinggi tower tersebut.

Diketahui:  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$$T = 12 \text{ sekon}$$

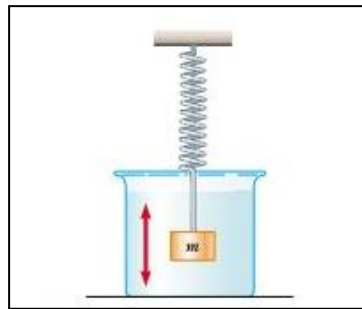
Ditanya: Tinggi tower.....?

Penyelesaian:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$
$$l = \frac{g T^2}{4\pi^2} = \frac{(9.8)(12)^2}{4(3.14)^2} = 35.7 \text{ m}$$

## 1.6. Gerak Harmonik Teredam

Gerak benda berisilasi untuk melihat sejauh mana suatu sistem dapat berisilasi tanpa adanya gaya aksi dari gaya pemulih linier. Dalam kehidupan nyata, contoh gaya non konservatif adalah gaya gesek. Akibat adanya gaya gesek, energi mekanik pada suatu sistem akan berkurang terhadap waktu sehingga dikatakan gerak teredam yaitu saat energi mekaniknya diubah menjadi energi dalam pada suatu objek yang dapat dilihat pada gambar 1.6 yaitu gambar osilasi teredam dimana piston adalah sebagai peredamnya yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi internal..<sup>3</sup>



Gambar 1.6. contoh getaran teredam

Salah satu dari jenis umum dari gaya perlambatan adalah gaya gesek, dimana gayanya sebanding dengan kecepatan benda bergerak dan bertindak dalam arah yang berlawanan arahnya. Gaya perlambatan ini sering sering diamati misalnya ketika sebuah objek bergerak melalui udara. Karena gaya penghambat dapat dinyatakan sebagai  $R = -bv$  (b adalah koefisien redaman) dan gaya pemulih sistem adalah  $-kx$  sehingga hukum II Newton dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\sum F_p &= \sum F \\ -kx - R &= ma_x \\ -kx - bv &= ma_x \\ -kx - b \frac{dx}{dt} &= m \frac{d^2x}{dt^2}\end{aligned}\tag{1.19}$$

<sup>3</sup> Jewett, Serway. 2010. Physics for Scientists and Engineers, California State Polytechnic University, Pomona.

Solusi untuk persamaan 1.19 dijabarkan menjadi persamaan 1.20. Ketika nilai  $b$  kecil maka gaya perlambatannya kecil dibandingkan dengan gaya pemulih maksimalnya. Persamaan 1.19 dapat dituliskan:

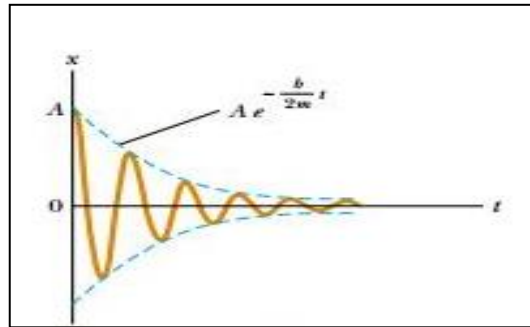
$$x = A e^{-(b/2m)t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.20)$$

dimana frekuensi sudut osilasi:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2} \text{ atau}$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{b}{2m}\right)^2} \quad (1.21)$$

dimana  $\omega_0$  merupakan frekuensi alami dari sistem.



**Gambar 1.7.** grafik posisi dengan waktu untuk osilator teredam

Gambar 1.17 menyatakan bahwa  $x$  sebagai fungsi waktu untuk benda yang berosilasi yang mengalami gaya perlambatan. Pada saay gaya perlambatannya akinkecil, maka gerak osilator tetap tetapi amplitudonya yang semakin berkurang gerhadap waktu sehingga gerak akhirnya menjadi tidak terdeteksi.

Pada umumnya setiap benda yang berosilasi akan berhenti jika tidak digetarkan secara terus menerus. Benda yang pada mulanya bergetar atau berosilasi bisa berhenti karena mengalami redaman. Redaman bisa terjadi akibat adanya gaya hambat atau gaya gesekan. Osilasi yang mengalami redaman biasa disebut gerak harmonik teredam.

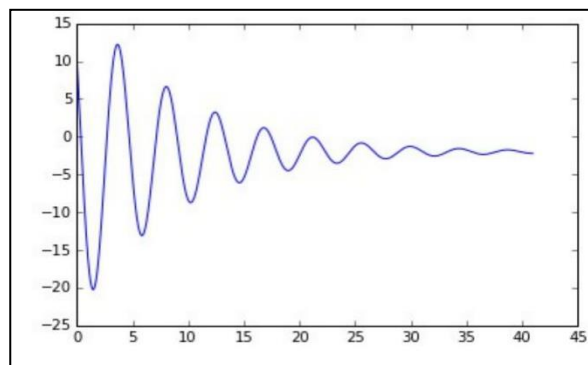
Jika hambatan atau gesekan cukup kecil maka benda tersebut akan mengalami redaman. Adanya redaman menyebabkan amplitudo berkurang perlahan-lahan hingga menjadi nol. Amplitudo berkaitan dengan energi.

Berkurangnya amplitudo osilasi menunjukkan bahwa energi benda yang berosilasi berkurang. Energi ini berubah menjadi kalor (kalor ditimbulkan oleh adanya gesekan). Redaman yang dialami oleh benda cukup kecil sehingga untuk kasus seperti ini, osilasi benda menyerupai gerak harmonik sederhana.

Apabila redaman cukup besar maka osilasi yang dialami benda tidak lagi menyerupai gerak harmonik sederhana. Dalam hal ini osilasi yang dialami benda termasuk osilasi teredam. Terdapat tiga jenis redaman (damping) yang dialami oleh benda yang berosilasi, antara lain redaman terlalu rendah (underdamped), redaman kritis (Critical damping) dan redaman berlebihan (over damping).

#### 1. Redaman terlalu rendah (underdamped)

Benda yang mengalami underdamped biasanya melakukan beberapa osilasi sebelum berhenti. Benda masih melakukan beberapa getaran sebelum berhenti karena redaman yang dialaminya tidak terlalu besar. Dimana gaya perlambatan disimbolkan dengan  $R_{\max} = b v_{\max} < k A$  maka dikatakan redaman terlalu rendah. Gerakannya dapat dilihat pada gambar 1.8. Ketika nilai  $b$  meningkat, amplitudo osilasi menurun lebih banyak dan lebih cepat. Contoh: sebuah bola yang digantungkan pada ujung pegas. Adanya hambatan udara menyebabkan bola dan pegas mengalami redaman hingga berhenti berosilasi.

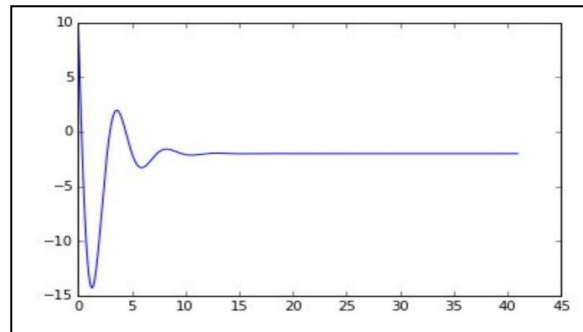


**Gambar 1.8.** grafik underdamped

#### 2. Redaman kritis (Critical damping)

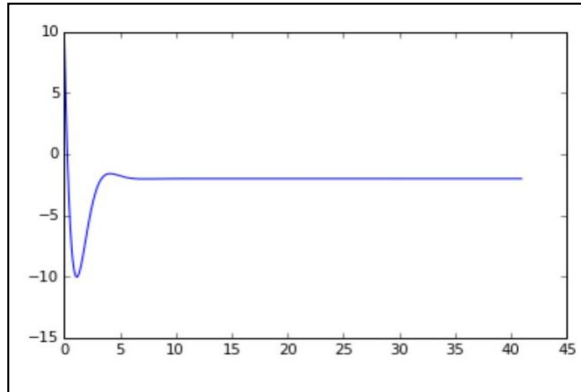
Benda yang mengalami critical damping biasanya langsung berhenti berosilasi (benda langsung kembali ke posisi setimbangnya). Benda langsung berhenti berosilasi karena redaman yang dialaminya cukup besar. Ketika  $b$  mencapai  $b_c$  nilai kritis sehingga  $\frac{b}{2m} = \omega_0$ , sistem tidak berosilasi dan dikatakan

teredam kritis. Dalam hal ini, sistem setelah dibebaskan dari keadaan diam di beberapa posisi nonequilibrium, mendekati tetapi tidak melewati posisi kesetimbangan. Grafik posisi dengan waktu untuk kasus ini adalah kurva merah pada Gambar 1.7. Contoh: sebuah bola yang digantungkan pada ujung pegas. Bola dimasukkan ke dalam wadah yang berisi air. Adanya hambatan berupa air menyebabkan bola dan pegas mengalami redaman yang cukup besar.



### 3. Redaman kritis (Critical damping)

Over damping mirip seperti critical damping. Bedanya pada critical damping benda tiba lebih cepat di posisi setimbangnya sedangkan pada over damping benda lama sekali tiba di posisi setimbangnya. Hal ini disebabkan karena redaman yang dialami oleh benda sangat besar. Apabila fluidanya kental maka akan menghasilkan gaya perlambatan yang besar jika dibandingkan dengan gaya pemulih yaitu  $b/2m > \omega_0$  yang disebut dengan *overdamped*. Pada saat sistem berpindah, sistem tersebut tidak berosilasi tetapi langsung kembali ke posisi kesetimbangannya. Ketika besar redamannya meningkat, waktu yang diperlukan sistem untuk kembali keseimbangan juga akan meningkat yang dapat dilihat pada 1.10. Bola dimasukkan ke dalam wadah yang berisi minyak kental. Adanya hambatan berupa minyak yang kental menyebabkan bola dan pegas mengalami redaman yang besar.



**Gambar 1.10.** grafik over damping

**Contoh Soal 4**

Sebuah benda bermassa 10,6 kg berosilasi pada ujung pegas vertikal yang memiliki konstanta pegas  $2.05 \times 10^4 \text{ N/m}$ . Koefisien redaman akibat adanya efek hambatan udara adalah  $3 \text{ N.s/m}$ . Hitunglah frekuensi dari osilasi teredam

Diketahui:  $k = 2.05 \times 10^4 \text{ N/m}$

$$b = 3 \text{ N.s/m}$$

$$m = 10.6 \text{ kg}$$

Ditanya: frekuensi dari osilasi teredam .....

Penyelesaian:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2.05 \times 10^4}{10.6} - \left(\frac{3}{2(10.6)}\right)^2}$$

$$\omega = \sqrt{0.19 \times 10^4 - \frac{9}{449.44}}$$

$$\omega = \sqrt{0.19 \times 10^4 - 0.02}$$

$$\omega = 43.58$$

maka frekuensi dari osilasi teredam adalah

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{43.58}{2(3.14)} = \frac{43.58}{6.28} = 6.94 \text{ Hz}$$

## 1.7. Gerak Harmonik Terpaksa

Getaran paksa adalah getaran yang terjadi karena rangsangan gaya luar, jika rangsangan tersebut beresilasi maka sistem dipaksa untuk bergetar pada frekuensi rangsangan. Jika frekuensi rangsangan sama dengan salah satu frekuensi natural sistem, maka akan didapat keadaan resonansi dan osilasi besar yang berbahaya mungkin terjadi. Kerusakan pada struktur besar seperti jembatan maupun gedung merupakan kejadian menakutkan yang disebabkan oleh resonansi. Jadi perhitungan frekuensi natural merupakan hal yang utama.<sup>4</sup>

Apabila ketika pegas beresilasi dengan frekuensi alaminya, pegas tersebut didorong lagi maka sistem-pegas benda tersebut mengalami osilasi paksa. Disebut osilasi paksa karena ketika sistem pegas-benda beresilasi dengan frekuensi alaminya, ada gaya luar yang memaksa sistem pegas-benda untuk beresilasi.

Amplitudo pada gerak harmonik terpaksa adalah

$$A = \frac{F_{eks} / m}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}}$$

### Keterangan:

$A$  : amplitudo (m)

$F_{eks}$  : gaya luar (N)

$\omega$  : frekuensi sudut pada gaya periode (rad/s)

$\omega_0$  : frekuensi alami dari osilator teredam (rad/s) dimana  $b = 0$

$m$  : massa beban (kg)

---

<sup>4</sup> Serway, Raymond A. 2000. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Virginia: Saunders College Publishing.



Beberapa contoh gerak harmonik terpaksa pada kehidupan yaitu sebagai berikut:

- a. Mesin pecah jika sebagian benda yang beresonansi terhadap bagian benda yang bergerak.
- b. Tentara yang berbaris dalam irama melintasi jembatan seperti mengatur getaran resonansi dalam struktur dan dengan demikian menyebabkan jembatan runtuh

### Contoh Soal 5

Berat sebuah benda 40 N ditanggihkan pada sebuah ayunan dengan ketetapan pegas  $200 \text{ N/m}$ . Sistemnya berada pada posisi tidak teredam dengan frekuensi harmoniknya  $10 \text{ Hz}$  dengan menghasilkan amplitudo gerak paksa  $2 \text{ cm}$ . Tentukanlah gaya maksimum pendorong.

Diketahui:  $\omega = 40$

$$k = 200 \text{ N/m}$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

$$A = 2 \text{ cm}$$

Ditanya: frekuensi dari osilasi teredam .....

Penyelesaian:

$$A = \frac{F_{eks} / m}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}}$$

$$2 \times 10^{-2} = \frac{F / 4}{(3943 - 50) + 0}$$

$$F = 311 \text{ N}$$

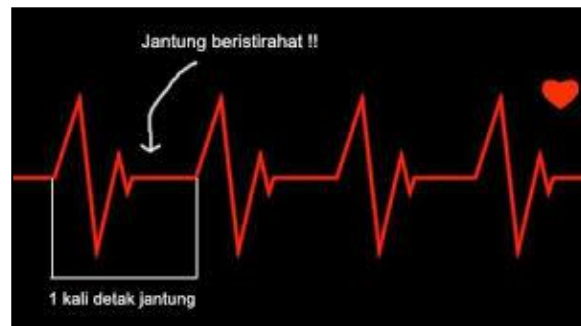
## 1.8. Aplikasi Gerak Harmonik Sederhana

### 1. Pergantian Siang dan Malam

Pergantian siang dan malam dianggap sebagai gerak osilasi? Karena pada saat siang ke malam atau malam ke siang, bumi melakukan rotasi pada porosnya. Perputaran bumi pada porosnya dilakukan secara terus-menerus. Inilah yang menyebabkan pergantian siang dan malam merupakan salah satu contoh gerak osilasi.<sup>5</sup>

### 2. Detak Jantung

Pada bagian jantung yang memompa (bagian bawah), terjadi gerak yang dilakukan secara terus-menerus pada porosnya. Gerak yang terus-menerus inilah yang menyebabkan jantung termasuk dalam gerak Osilasi.



### 3. Pergantian Siang dan Malam

Pergantian siang dan malam dianggap sebagai gerak osilasi? Karena pada saat siang ke malam atau malam ke siang, bumi melakukan rotasi pada porosnya. Perputaran bumi pada porosnya dilakukan secara terus-menerus. Inilah yang menyebabkan pergantian siang dan malam merupakan salah satu contoh gerak osilasi.

### 4. Shock Absorber

Shock absorber memiliki peranan penting dalam sistem suspensi kendaraan bermotor yaitu untuk mengurangi guncangan (mengurangi gaya osilasi dari pegas) dengan cara mengubah energi kinetik dari gerakan suspensi menjadi energi panas yang dapat dihamburkan melalui cairan hidrolik yang ada pada shock absorber.

---

<sup>5</sup> Bambang Ruwanto. 2007. *Asas-Asas Fisika 3A*. Bogor: Yudhistira.

## **5. Gitar**

Senar gitar yang sering dimainkan oleh gitaris group band yang menghasilkan bunyi yang sangat indah merupakan contoh dari gerak harmonik. Getar senar gitar tersebutlah yang merupakan gerak harmonic sederhana. Meski bolak-balik senar gitar yang begitu cepat hamper tidak terlihat. Sama halnya dengan kasus ayunan anak-anak. Getar senar gitar pun termasuk harmonik teredam sebab senar tersebut akan berhenti bergetar bila kita menghentikan petikan. Hal tersebut karena adanya gaya gesekan yang menyebabkan gerak osilasi senar gitar tersebut berhenti.

## **6. Jam Mekanik**

Gerak jarum jam dinding maupun jam tangan yang sering kita gunakan bergerak secara periode mengelilingi satu lingkaran atau secara angular, gerak tersebut merupakan gerak harmonik sederhana. Berbeda dengan kasus pada ayunana dan senar geitar yang dibahas sebelumnya untuk gerak jarum jam ini tidak termasuk pada gerak harmonik teredam sebab gaya gesek dapat dihindari artinya efek redaman dapat ditiadakan dengan memberikan energi kedalam sistem yang berosilasi untuk mengisi kembali energi yang hilang akibat gesekan. Hal tersebut terjadi karena adanya pegas yang terdapat pada roda keseimbangan jam mekanik. Pegas akan memberikan suatu torsi pemulih yang sebanding dengan perpindahan sudut dan posisi kesetimbangan. Gerak ini dinamakan gerak harmonik sederhana sudut (angular)

## LATIHAN SOAL

- Sebuah mesin piston berosilasi dengan gerak harmonik sederhana sesuai dengan persamaan  $X = 5 \cos\left(2t + \frac{\pi}{6}\right)$  dimana x dalam sentimeter dan t dalam detik. Tentukanlah:
  - Posisi piston pada saat  $t = 0$  sekon
  - Kecepatan piston saat  $t = 0$  sekon
  - Percepatan piston saat  $t = 0$  sekon
  - Periode dan Amplitudo
- Benda berukuran 7 kg digantung pada ujung pegas. Setelah melakukan osilasi periode balok adalah 2.60 sekon. Hitunglah konstanta pegas.
- Sebuah glider 1 kg yang terpasang pada mata air dengan gaya konstanta pegas 25 N/m berosilasi pada udara secara horizontal. Pada saat  $t = 0$  glider dilepaskan pada jarak 3 cm dengan amplitudo 3 cm. Tentukanlah:
  - Periode
  - Kecepatan maksimum dan percepatan maksimum
  - Posisi, kecepatan dan percepatan sebagai fungsi waktu
- Balok dengan massa 200 gram menempel pada pegas secara horizontal pada gerak harmonik sederhana dengan periode 0.25 detik. Jika total energi sistem adalah 2 Joule. Tentukanlah:
  - Konstanta gaya pegas
  - Amplitude
- Posisi sudut pendulum adalah  $\theta = (0.320 \text{ rad}) \cos \omega t$  dimana  $\theta$  dalam radian dan  $\omega = 4.43 \text{ rad / sekon}$ . Tentukan periode dan panjang pendulum.
- Benda yang memiliki massa 0.15 kg tergantung pada pegas dimana konstanta gaya pegas 6.30 N/m dengan mengabaikan redamannya dan menghasilkan gaya sinusoidal dengan sebesar 1.70 N. Berapa frekuensi memaksa agar objek bergetar dengan amplitudo 0.440 m.

## **BAB II**

### **GELOMBANG**

#### **2.1. Pengertian Gelombang**

Dalam era informasi seperti sekarang ini, gelombang memegang peranan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Salah satunya janin yang masih dalam kandungan dapat dilihat dengan mata telanjang karena ada gelombang ultrasonik. Contoh lainnya dapat dilihat pada beberapa peristiwa berikut. Kita dapat mendengar suara musik karena ada gelombang bunyi. Batu ginjal dihancurkan dengan gelombang ultrasonik. Jarak venus ke bumi dapat diukur dengan ketelitian yang sangat tinggi. Keadaan perut bumi dan isinya dapat diketahui dengan bantuan gelombang seismik. Kita dapat menikmati radio dan televisi karena ada gelombang radio, dapat saling berkomunikasi lewat telephon dan masih banyak hal lainnya. Dari penjelasan di atas maka gelombang dapat didefinisikan sebagai gejala rambatan dari suatu getaran/usikan. Gelombang akan terus terjadi apabila sumber getaran ini bergetar terus menerus. Gelombang membawa energi dari satu tempat ke tempat lainnya. Contoh sederhana gelombang, apabila kita mengikatkan satu ujung tali ke tiang, dan satu ujung talinya lagi digoyangkan, maka akan terbentuk banyak bukit dan lembah di tali yang digoyangkan tadi, inilah yang disebut gelombang.<sup>6</sup>

#### **2.2. Jenis Gelombang**

Pada saat kita melempar batu ke danau atau kolam air, gelombang melingkar terbentuk dan bergerak menyebar. Gelombang juga akan melakukan perjalanan sepanjang tali yang direntangkan lurus di atas meja jika kita menggetarkan satu ujungnya bolak balik. Gelombang air dan gelombang pada tali adalah dua contoh umum gelombang mekanis. Jika gelombang merambat hingga menyebabkan terjadinya gerak pada medium tempat dimana gelombang itu menjalar disebut gelombang mekanis. Pada gelombang mekanis, perjalanan gelombang di dalam medium terjadi karena adanya interaksi pada medium itu. semakin kuat interaksi pada suatu medium maka perjalanan gelombang akan

---

<sup>6</sup> Bambang Ruwanto. 2007. *Asas-Asas Fisika 3A*. Bogor: Yudhistira.

semakin cepat. Laju perjalanan gelombang bergantung pada medium inersianya dimana semakin besar medium inersianya maka akan semakin lambat gelombang berjalannya. Berbeda dengan gelombang mekanis, gelombang elektromagnetik merambat tanpa memerlukan medium perantara seperti gelombang radio, mikro, infra merah, sinar UV dan sinar X.

### **2.2.1. Jenis – jenis Gelombang Berdasarkan medium**

Dari pembahasan di atas maka berdasarkan medium perambatannya gelombang terbagi ke dalam dua jenis, yaitu:

a. Gelombang Mekanis

yaitu gelombang yang membutuhkan media perantara dalam perambatannya. Contohnya gelombang pada tali, gelombang air dan gelombang bunyi.

b. Gelombang Elektromagnetik

yaitu gelombang yang bisa merambat walaupun tidak ada mediana. Maka berdasarkan frekuensinya maka urutan gelombang elektromagnetik adalah sebagai berikut:

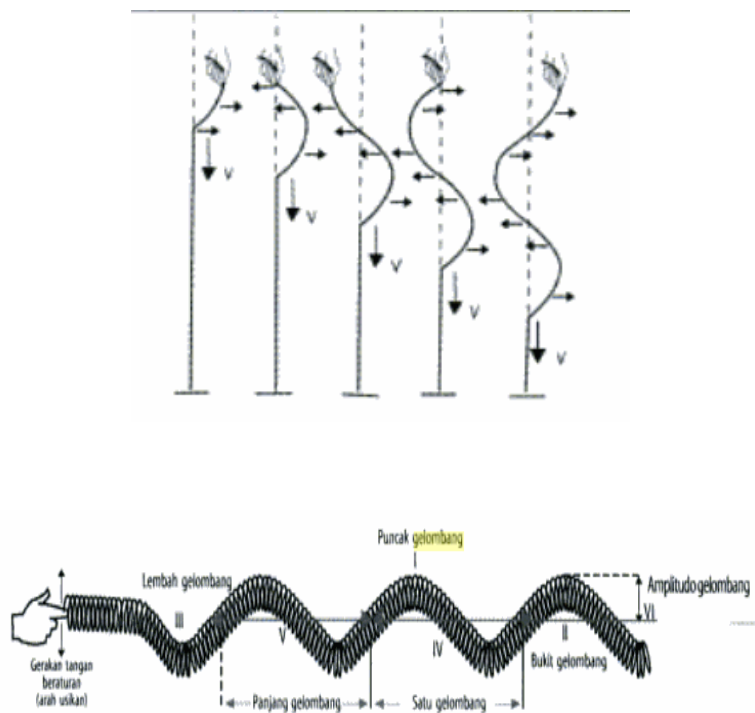
- a. Gelombang radio dan televisi
- b. Gelombang mikro
- c. Sinar infra merah
- d. Sinar tampak
- e. Sinar ultraviolet
- f. Sinar X
- g. Sinar gamma

### **2.2.2. Jenis Gelombang Berdasarkan Arah Getarnya**

#### **a. Gelombang Transversal**

Jika kita mengamati gelombang tali, pola yang terbentuk merambat sepanjang tali sedangkan gerakan komponen tali (simpangan) terjadi dalam arah tegak lurus tali. Gelombang dengan arah getaran tegak lurus arah rambat dinamakan gelombang transversal. Untuk gelombang bunyi yang dihasilkan akibat pemberian tekanan, arah getaran yang terjadi searah dengan perambatan

gelombang. Contohnya, gelombang bunyi di udara. Gelombang ini dihasilkan dengan memberikan tekanan secara periodik pada salah satu bagian udara sehingga molekul-molekul udara di sekitar daerah tersebut ikut bergetar. Molekul yang bergetar menumbuk molekul disekitarnya yang diam, sehingga molekul yang mula-mula diam ikut bergetar dalam arah yang sama. Begitu seterusnya sehingga molekul yang makin jauh ikut bergetar. Ini adalah fenomena perambatan gelombang. Arah getaran persis sama dengan arah rambat gelombang.



**Gambar 2.1.** Gelombang transversal

**Keterangan:**

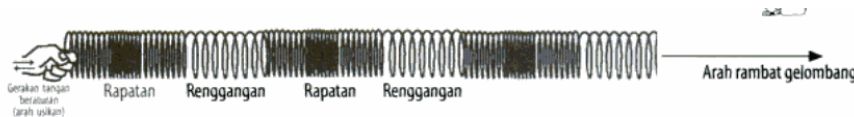
- I : puncak gelombang
- II : bukit gelombang
- III : lembah gelombang
- IV : satu siklus gelombang disingkat dengan satu gelombang
- V : panjang satu siklus gelombang (jarak antara puncak gelombang ke puncak gelombang berikutnya) disingkat dengan panjang gelombang
- VI : amplitude gelombang = simpangan terbesar gelombang

Fase atau sudut fase gelombang sama dengan fase getaran yang menyebabkannya. Pada gambar dibawah ini, apabila sudut fase titik A adalah  $0^\circ$  maka sudut fase pada titik B =  $90^\circ$ , pada titik C =  $180^\circ$ , titik D =  $270^\circ$ , titik E =  $360^\circ$ , titik F =  $630^\circ$ . Sedangkan untuk besar fasenya adalah sebagai berikut:

- Fase A = 0
- Fase B =  $\frac{90}{360} = \frac{1}{4}$
- Fase C =  $\frac{180}{360} = \frac{1}{2}$
- Fase D =  $\frac{270}{360} = \frac{3}{4}$
- Fase E =  $\frac{360}{360} = 1$  atau 0
- Fase F =  $\frac{630}{360} = \frac{3}{4}$

## b. Gelombang Longitudinal

Sedangkan Gelombang dengan arah getaran sama dengan arah rambat gelombang dinamakan gelombang longitudinal.



**Gambar 2.2.** Gelombang longitudinal

Pada gambar di atas tampak bahwa arah getaran sejajar dengan arah rambatan gelombang. Serangkaian **rapatan** dan **regangan** merambat sepanjang pegas. **Rapatan** merupakan daerah di mana kumparan pegas saling mendekat, sedangkan **regangan** merupakan daerah di mana kumparan pegas saling menjauhi. Jika gelombang transversal memiliki pola berupa puncak dan lembah, maka gelombang longitudinal terdiri dari pola rapatan dan regangan. Panjang gelombang adalah jarak antara rapatan yang berurutan atau regangan yang



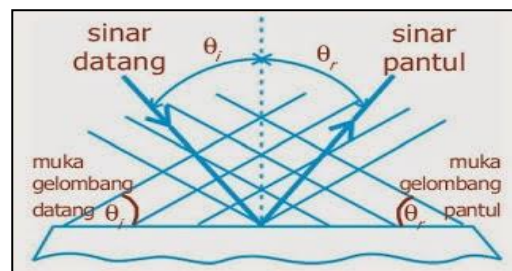
berurutan. Yang dimaksudkan di sini adalah jarak dari dua titik yang sama dan berurutan pada rapatan atau regangan.

Salah satu contoh gelombang longitudinal adalah gelombang suara di udara. Udara sebagai medium perambatan gelombang suara, merapat dan meregang sepanjang arah rambat gelombang udara. Berbeda dengan gelombang air atau gelombang tali, gelombang bunyi tidak bisa kita lihat memakai mata.

## 2.3. Sifat-Sifat Gelombang

### 2.3.1. Pemantulan (Refleksi) Gelombang

Tentunya sahabat sudah sangat mengerti tentang pemantulan ini, jadi secara garis besar saya rasa kita sudah sepaham. Dalam pemantulan gelombang berlaku hukum pemantulan gelombang, yaitu : Besar sudut datangnya gelombang sama dengan sudut pantul gelombang. Gelombang datang, gelombang pantul, dan garis normal terletak pada satu bidang datar.<sup>7</sup>

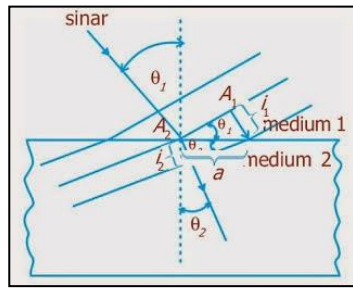


**Gambar 2.3.** Refleksi Gelombang

### 2.3.2. Pembiasan (Reraksi) Gelombang

Perubahan arah gelombang saat gelombang masuk ke medium baru yang mengakibatkan gelombang bergerak dengan kelajuan yang berbeda disebut pembiasan. Pada pembiasan terjadi perubahan laju perambatan. Panjang gelombangnya bertambah atau berkurang sesuai dengan perubahan kelajuannya, tetapi tidak ada perubahan frekuensi. Peristiwa ini ditunjukkan pada Gambar 2.4

<sup>7</sup> Giancoli, Douglas C. 1996. *Physics* (3<sup>rd</sup> Edition). New York: Prentice Hall, Inc.



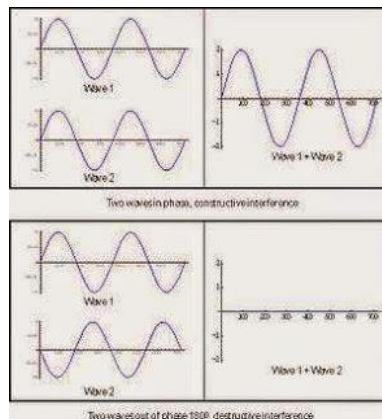
**Gambar 2.4.** pembiasan gelombang oleh bidang

Pada gambar tersebut kecepatan gelombang pada medium 2 lebih kecil daripada medium 1. Dalam hal ini, arah gelombang membelok sehingga perambatannya lebih hampir tegak lurus dengan batas. Jadi, sudut pembiasan ( $\theta_2$ ), lebih kecil daripada sudut datang ( $\theta_1$ ). Sehingga diperoleh persamaan Hukum Snellius:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \text{ atau } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

### 2.3.3. Perpaduan (Interferensi) Gelombang

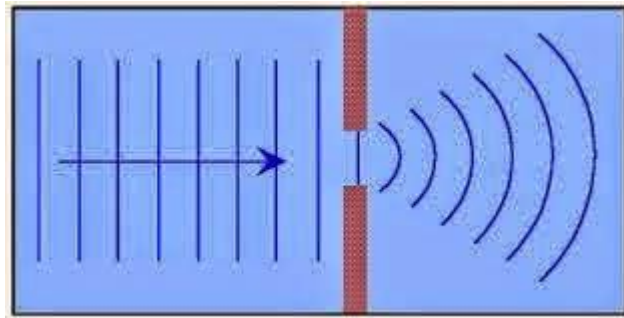
Perpaduan gelombang terjadi apabila terdapat gelombang dengan frekuensi dan beda fase saling bertemu. Hasil interferensi gelombang akan ada 2, yaitu konstruktif (saling menguatkan) dan destruktif (saling melemahkan). Interferensi Konstruktif terjadi saat 2 gelombang bertemu pada fase yang sama, sedangkan interferensi destruktif terjadi saat 2 gelombang bertemu pada fase yang berlawanan.



**Gambar 2.5.** Interferensi Gelombang

### 2.3.4. Pembelokan (Difraksi) Gelombang

Difraksi gelombang adalah pembelokkan/penyebaran gelombang jika gelombang tersebut melalui celah. Gejala difraksi akan semakin tampak jelas apabila celah yang dilewati semakin sempit.



**Gambar 2.6.** Difraksi

### 2.3.5. Dispersi Gelombang

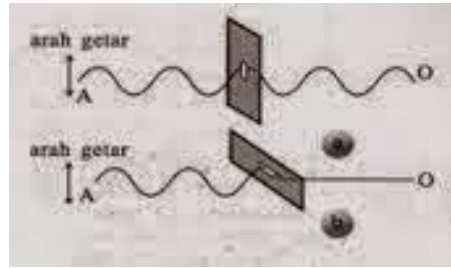
Dispersi yaitu peristiwa terurainya sinar cahaya yang merupakan campuran dari beberapa panjang gelombang menjadi komponen-komponennya karena adanya pembiasan. Dispersi terjadi karena adanya perbedaan deviasi untuk setiap panjang gelombang, yang disebabkan oleh perbedaan kelajuan masing-masing gelombang pada saat melewati medium pembias. Jika sinar cahaya putih jatuh pada salah satu sisi prisma, cahaya putih itu akan terurai menjadi komponen-komponennya dan spektrum lengkap cahaya tampak akan terlihat.<sup>8</sup>

### 2.3.6. Dispolarisasi Gelombang

Polarisasi adalah peristiwa terserapnya sebagian arah getar gelombang sehingga hanya tinggal memiliki satu arah saja. Polarisasi hanya akan terjadi pada gelombang transversal, karena arah gelombang sesuai dengan arah polarisasi, dan sebaliknya, akan terserap jika arah gelombang tidak sesuai dengan arah polarisasi celah tersebut.

---

<sup>8</sup> Halliday, David dan Robert Resnick. 2007. *Fisika Edisi ke 3 Jilid1*. Erlangga, Jakarta



**Gambar 2.7.** Dispolarisasi

#### 2.4. Pemanfaatan Gelombang

Sangat banyak pemanfaatan dari gelombang dengan mempertimbangkan berbagai sifat gelombang yang ada di sekitar kita. Beberapa diantaranya adalah

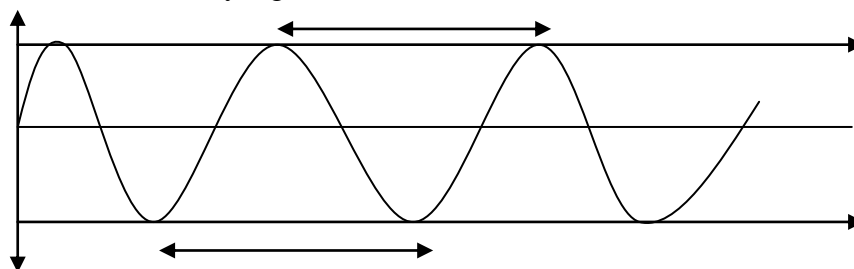
1. Gelombang TV dan Radio untuk komunikasi.
2. Gelombang Micro yang dimanfaatkan untuk memasak makanan atau yang kita kenal dengan microwave.
3. Gelombang bunyi yang sangat membantu bidang kesehatan, yaitu Ultrasonik pada peralatan USG untuk memeriksa ada tidaknya penyakit.

#### 2.5. Besaran-Besaran Gelombang

Diantara besaran – besaran gelombang adalah sebagai berikut:

##### 1. Panjang Gelombang

Pada saat kita mengamati gelombang pada permukaan air ketika kita menjatuhkan batu di atas permukaan air. Maka akan terlihat puncak dan lembah yang disebut dengan panjang gelombang yaitu jarak dua puncak yang berdekatan atau jarak dua lembah yang berdekatan.

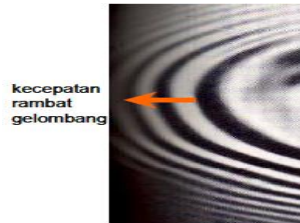


Panjang gelombang

**Gambar 2.8.** Panjang gelombang untuk gelombang permukaan air dan gelombang tali

## 2. Cepat Rambat Gelombang

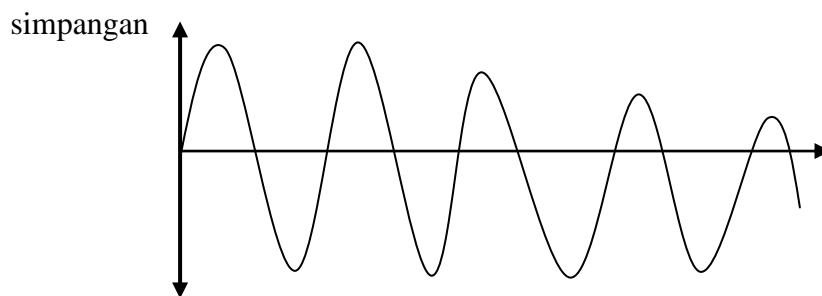
Cepat rambat gelombang adalah untuk melihat berapa cepat sebaran gelombang berpindah dari satu tempat ke tempat lain.



**Gambar 2.9.** Arah kecepatan rambat gelombang

## 3. Simpangan

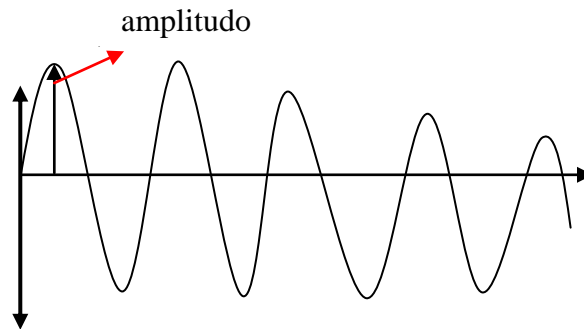
Selama gelombang merambat, simpangan suatu pada medium selalu berubah-ubah yaitu mulai dari nilai minimumnya sampai nilai maksimumnya. Nilai maksimum dan minimum diperoleh secara periodek.



**Gambar 2.10.** Simpangan gelombang

#### 4. Amplitudo

Amplitudo adalah simpangan maksimum yang dilewati oleh suatu medium



**Gambar 2.11.** Amplitudo gelombang adalah panjang simpangan Maksimum

#### 5. Periode

Periode adalah waktu osilasi yang diperlukan oleh suatu benda untuk kembali osilasi yang semula. Misalkan suatu titik berada pada simpangan nol

#### 6. Frekuensi

Frekuensi adalah banyaknya osilasi setiap detik pada suatu medium.

#### 7. Kecepatan Osilasi

Kecepatan osilasi adalah untuk mengetahui berapa cepat terjadi perubahan simpangan pada medium. Pada gelombang transversal, kecepatan osilasinya dilihat naik turun simpangannya, sedangkan untuk gelombang longitudinal, kecepatan osilasinya dilihat dari cepatnya getaran maju mundur.

**Contoh soal 1:**

Apakah kecepatan dari sebuah gelombang yang bergerak sepanjang sebuah tali sama dengan kecepatan sebuah partikel pada tali itu?

**Pembahasan contoh soal 1:**

Kedua kecepatan itu berbeda, baik dalam magnitudo dan arah. Gelombang pada tali bergerak ke kanan sepanjang permukaan meja, tetapi masing-masing bagian tali hanya bergetar kesana kemari, tegak lurus dengan gelombang berjalan itu.

**2.6. Hubungan antara Kecepatan Gelombang dan Sifat Medium**

Sifat medium sangat berpengaruh pada laju perambatan gelombang pada medium tersebut. Berikut hubungan untuk beberapa peristiwa<sup>9</sup>

**a. Gelombang Tali**

Cepat rambat gelombang tali bergantung pada tegangan tali dan massa talinya. Dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

**Keterangan**

$F_T$  : gaya tegangan pada tali

$\mu$  : massa tali per satuan panjang

**b. Gelombang Longitudinal dalam Zat Padat**

Kecepatan rambat gelombang longitudinal dalam zat padat memenuhi hubungan

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

**Keterangan**

$Y$  : modulus elastisitas zat padat, dan

$\rho$  : massa jenis zat padat

---

<sup>9</sup>Bambang Ruwanto. 2007. *Asas-Asas Fisika 3A*. Bogor: Yudhistira.

c. **Gelombang Longitudinal untuk Fluida**

Kecepatan rambat gelombang longitudinal untuk fluida memenuhi hubungan

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

**Keterangan**

B : modulus volum (bulk) fluida dan

$\rho$  : massa jenis fluida

d. **Gelombang longitudinal dalam gas**

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

Dengan  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  (perbandingan kapasitas kalor spesifik) adalah 1,67 untuk gas monoatomik seperti helium dan neon. Untuk gas diatomik seperti N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> nilai ini sekitar 1,40.



## LATIHAN SOAL

1. Sebutkan jenis gelombang yang bergerak sepanjang sebuah batang logam horizontal jika Anda memukul ujungnya
  - a. secara vertikal dari atas
  - b. secara horizontal dengan panjangnya?
2. Sebuah gelombang berdiri dihasilkan pada seutas tali pada frekuensi 438 Hz. Jarak antara dua simpul yang terbentuk adalah 45 cm.
  - a. Hitung panjang gelombang pada tali
  - b. Jika tegangan tali 85 N, hitunglah massa tali per satuan panjang
  - c. Jika diameter tali 0,28 mm, hitunglah massa jenis material tadi.
3. Seseorang berdiri pada jarak tertentu dari sebuah pesawat jet yang memiliki empat mesin. Keempat mesin tersebut serupa. Ketika empat mesin hidup orang tersebut mendengar bunyi dengan level intensitas 120 dB. Jika kemudian kapten mematikan tiga mesin sehingga hanya satu mesin yang hidup. Berapakah taraf intensitas yang didengar orang tersebut?
4. Seorang nelayan memukul perahunya tepat di permukaan air. 3 detik kemudian nelayan tersebut mendengar bunyi pantulan dari dasar laut. Apabila diketahui modulus volum air laut adalah  $2,0 \times 10^9$ . Hitunglah kedalaman dasar laut tersebut?
5. Ketika gelombang bunyi merambat di udara ke air, apakah terdapat perubahan frekuensi atau perubahan panjang gelombang? Jelaskan.
6. Jarak antara puncak dan dasar gelombang laut berturut-turut adalah 60 cm. Bila dalam 4 sekon ada 2 gelombang yang melintas. Tentukan cepat rambat gelombang tersebut?
7. Dua perahu nelayan P dan Q berjarak 18 meter sedang diam mengapung di permukaan laut. Suatu ketika datang gelombang dengan cepat rambat 4 m/s dan periode 3 s. Ketika perahu P berada di puncak gelombang apakah kedua nelayan pada masing-masing perahu dapat saling melihat? (anggaplah amplitudo gelombang cukup besar)

8. Dua buah gabus berjarak 15 cm satu sama lain mengapung di permukaan air. Kedua gabus tersebut naik-turun bersama permukaan air. Bila sebuah gabus berada di diantara ke dua gabus tersebut terdapat satu bukit dan satu lembah gelombang. Dengan cepat rambat gelombang 50 cm/s. Berapakah frekuensi gelombang air tersebut?
9. Sebuah gelombang datang pada bidang batas antara dua medium dengan sudut datang  $37^\circ$  dan cepat rambat 5 m per sekon. Gelombang tersebut memasuki medium kedua dan dibelokkan dengan sudut bias  $30^\circ$ .
  - a. Tentukan cepat rambat gelombang dalam medium 2
  - b. Tentukan indeks bias medium 2 relatif dengan medium 1
10. Gempa longitudinal menabrak perbatasan antara dua jenis batuan dengan sudut  $35^\circ$ . Pada waktu menyebrangi perbatasan, gravitasi khusus batuan berubah dari 3,7 menjadi 2,8. Dengan menganggap modulus elastis untuk kedua jenis batuan adalah sama. Tentukan sudut bias ?

## **BAB III**

### **GELOMBANG MEKANIK**

Sebuah batu yang dijatuhkan pada permukaan air akan menyebabkan pola berbentuk lingkaran, yaitu membentuk gelombang permukaan air. Jika diamati sepintas, tampak permukaan air bergerak bersama gelombang. Akan tetapi, jika diamati dengan seksama permukaan air tidak bergerak bersama gelombang. Sehelai daun yang terapung pada permukaan air yang membentuk gelombang tidak mengalami pergeseran horizontal. Daun hanya bergerak vertikal, mengikuti gerak gelombang.<sup>10</sup>

Uraian di atas merupakan salah satu gejala gelombang yang sangat mudah diamati. Gelombang laut, suara musik, transmisi radio dan televisi, dan gempa bumi merupakan beberapa contoh fenomena gelombang. Gelombang dapat terjadi apabila suatu sistem diganggu dari posisi setimbangnya dan gangguan itu dapat merambat dari satu tempat ke tempat lain. Gelombang memegang peranan penting dalam berbagai bidang kehidupan.

Kita akan membicarakan gelombang mekanik, yaitu gelombang yang merambat pada suatu bahan (material) yang dinamakan medium. Di samping gelombang mekanik, dikenal pula gelombang elektromagnetik yaitu gelombang yang tidak memerlukan medium untuk merambat. Contoh gelombang elektromagnetik adalah cahaya, gelombang radio, radiasi ultraungu dan intramerah, sinar- $x$ , dan sinar gamma.

#### **3.1. Jenis-jenis Gelombang Mekanik**

Gelombang mekanik adalah gangguan yang merambat melalui material atau zat yang dinamakan medium. Ketika gelombang mekanik merambat pada medium, partikel-partikel penyusun medium itu mengalami perpindahan (pergeseran) dan pergeseran ini bergantung pada sifat gelombang yang melaluinya.

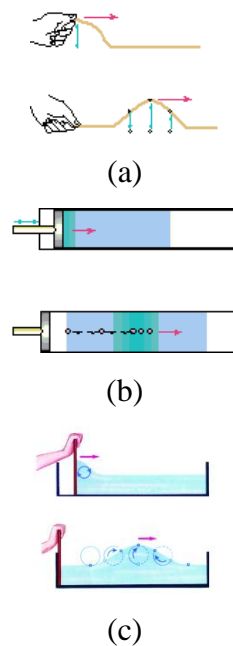
---

<sup>10</sup> Bambang Ruwanto. 2007. *Asas-Asas Fisika 3A*. Bogor: Yudhistira.

Gambar 3.1 menunjukkan tiga jenis gelombang mekanik. Pada Gambar 3.1(a) mediumnya berupa dawai atau tali yang teregang. Jika ujung kiri dawai digoyang sedikit ke atas, maka goyangan itu akan merambat sepanjang tali. Secara berurutan, bagian-bagian dawai mengalami gerak yang sama seperti yang diberikan pada ujung dawai. Pada gelombang ini pergeseran medium (tali) tegak lurus dengan arah rambat gelombang. Gelombang yang terjadi pada dawai dinamakan gelombang transversal.

Pada Gambar 3.1(b) mediumnya berupa zat cair atau gas dalam tabung yang memiliki dinding tegar di ujung kanan dan sebuah piston yang dapat bergerak bebas di ujung kiri. Jika piston itu digerakkan satu kali bolak-balik, maka fluktuasi pergeseran dan fluktuasi tekanan berjalan sepanjang medium itu. Pada saat itu partikel-partikel medium bergerak bolak-balik searah dengan perambatan gelombang. Gelombang yang terjadi dinamakan gelombang longitudinal.

Pada Gambar 3.1(c) mediumnya berupa air dalam suatu saluran, misalnya parit atau kanal. Jika papan rata di ujung kiri digerakkan satu kali bolak-balik, maka gelombang akan merambat sepanjang saluran itu. Dalam kasus ini, pergeseran air memiliki dua komponen, yaitu komponen longitudinal dan komponen transversal.



**Gambar 3.1.** Proses terjadinya gelombang transversal dan gelombang longitudinal. (a)

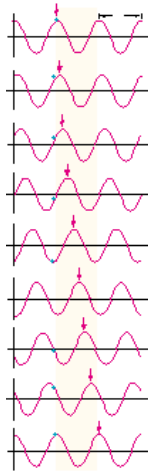
Tangan menggerakkan dawai ke atas, kemudian kembali, menghasilkan gelombang transversal. (b) Piston menekan zat cair atau gas ke kanan, kemudian kembali, menghasilkan gelombang longitudinal. (c) Papan mendorong air ke kanan, kemudian kembali, menghasilkan gelombang transversal dan gelombang longitudinal.

Ketiga contoh gelombang yang telah diuraikan di atas memiliki tiga sifat yang sama. Pertama, dalam setiap kasus gangguan itu merambat dengan laju tertentu. Laju ini dikenal sebagai laju gelombang, dengan simbol  $v$ . Laju ini ditentukan oleh sifat-sifat mekanik medium. Kedua, mediumnya sendiri tidak berjalan. Akan tetapi, partikel-partikel medium bergerak bolak-balik di sekitar posisi kesetimbangannya. Ketiga, untuk membuat sistem bergerak, kita harus memberikan energi dengan cara melakukan kerja mekanik pada sistem tersebut. Gerak gelombang ini membawa energi dari satu tempat ke tempat lain.

### 3.2. Gelombang Periodik

Gelombang traansversal pada dawai yang diregangkan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2(a) merupakan salah satu contoh pulsa gelombang yang berjalan sepanjang dawai. Apabila pada ujung bebas dawai digerakkan secara periodik ke atas dan ke bawah, setiap partikel pada dawai juga akan mengalami gerakan periodik sehingga diperoleh gelombang periodik. Jika kita menggerakkan dawai itu ke atas dan ke bawah dalam gerak harmonik sederhana dengan amplitudo  $A$ , frekuensi  $f$ , frekuensi sudut  $\omega = 2\pi f$ , dan periode  $T = 1/f = 2\pi/\omega$ , maka diperoleh gelombang periodik yang menyerupai fungsi sinus (sinusoidal). Oleh karena itu, gelombang periodik juga dikenal dengan istilah gelombang sinusoidal.

Gambar 3.2 menunjukkan bentuk dari sebagian gelombang sinusoidal pada dawai di ujung kiri pada setiap selang waktu  $\frac{1}{8}$  periode dari waktu total 1 periode. Bentuk gelombang itu bergerak ke kanan, seperti yang ditunjukkan oleh anak panah yang menunjuk puncak gelombang tertentu. Ketika gelombang itu bergerak, setiap titik pada dawai berosilasi ke atas dan ke bawah di sekitar posisi setimbangannya.

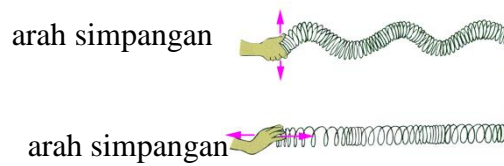


**Gambar 3.2** Gelombang transversal yang merambat pada dawai.

Untuk gelombang periodik seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2, bentuk dawai menunjukkan suatu pola berulang. Panjang gelombang, dengan simbol  $\lambda$ , didefinisikan sebagai jarak dari satu puncak ke puncak berikutnya atau dari satu lembah ke lembah berikutnya atau dari sembarang titik ke titik yang bersangkutan pada pengulangan berikutnya. Pola gelombang ini merambat dengan laju konstan  $v$  dan bergerak maju sejauh satu panjang gelombang dalam selang waktu  $T$ . Jadi,  $v = \lambda/T$ . Dengan mengingat  $f = 1/T$ , maka

$$v = f\lambda. \quad (3.1)$$

Untuk memahami gelombang longitudinal, kita dapat memakai slinki (Gambar 3.3). Jika salah satu ujung slinki didorong sepanjang slinki, maka pulsa gelombang bergerak sepanjang slinki. Jika ujung slinki digerakkan bolak-balik sejajar dengan sumbu slinki, gerakan ini akan membentuk rapatan dan renggangan di sepanjang slinki. Untuk gelombang longitudinal, panjang gelombang adalah jarak dari satu rapatan ke rapatan berikutnya atau jarak dari satu renggangan ke renggangan berikutnya. Perlu diketahui, Persamaan (3.1) berlaku juga untuk gelombang longitudinal.



**Gambar 3.3.** Slinky

### Contoh Soal 3.1

Telinga manusia dapat menanggapi gelombang longitudinal pada jangkauan frekuensi sekitar 20 Hz – 20.000 Hz. Untuk gelombang bunyi di udara yang merambat dengan laju  $v = 344$  m/s, hitunglah panjang gelombang yang bersesuaian dengan jangkauan frekuensi ini.

### Penyelesaian

Laju gelombang bunyi di udara  $v = 344$  m/s. Dengan memakai Persamaan (1-1), untuk frekuensi  $f_1 = 20$  Hz dan  $f_2 = 20.000$  Hz, diperoleh

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{344 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 17,2 \text{ m},$$

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{344 \text{ m/s}}{20.000 \text{ Hz}} = 0,0172 \text{ m}.$$

### 3.3. Deskripsi Matematis Gelombang

Banyak ciri-ciri gelombang periodik yang bisa dijelaskan dengan menggunakan konsep laju gelombang, periode gelombang, dan panjang gelombang. Akan tetapi, seringkali kita membutuhkan gambaran yang lebih detail tentang kedudukan dan gerak partikel yang bergetar. Tujuannya adalah ita bisa menggunakan konsep fungsi gelombang, yaitu suatu fungsi yang menjelaskan kedudukan partikel yang bergetar pada sembarang waktu.

Kita ingin melihat gelombang pada senar yang dilonggarkan. Pada kedudukan setimbang, senar membentuk garis lurus. Kita menganggap bahwa garis lurus ini adalah sumbu- $x$  dalam sistem koordinat kartesius. Getaran senar membentuk gelombang transversal sehingga selama gerakanya semua partikel pada

posisi setimbang sepanjang sumbu- $x$  digeser sejauh  $y$  yang arahnya tegak lurus terhadap sumbu- $x$  ini. Nilai  $y$  bergantung pada kedudukan partikel yang dilihat dan juga bergantung terhadap waktu. Secara matematis,  $y$  adalah fungsi dari  $x$  dan  $t$  atau sering ditulis  $y = y(x, t)$ . Pernyataan  $y(x, t)$  disebut sebagai fungsi gelombang. Apabila fungsi gelombang diketahui, kita bisa menetapkan pergeseran partikel yang bergetar (diukur dari kedudukan setimbang) pada sembarang waktu.

Sekarang kita ingin membahas bentuk fungsi gelombang pada gelombang sinusoidal, yaitu gelombang sinusoidal yang berjalan dari arah kiri ke kanan sepanjang senar. Seandainya pergeseran partikel di ujung kiri senar ( $x = 0$ ) diungkapkan melalui persamaan

$$y(0, t) = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f t = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (3.2)$$

Maksudnya, partikel itu bergerak harmonik sederhana pada amplitudo  $A$ , frekuensi  $f$ , dan frekuensi sudut  $\omega = 2\pi f$ . Pada  $t = 0$  partikel di  $x = 0$  mempunyai pergeseran nol ( $y = 0$ ) dan partikel sedang bergerak ke arah sumbu- $y$  positif. Gelombang ini merambat dari  $x = 0$  ke titik  $x$  di sebelah kanan titik asal dalam waktu  $x/v$ , dengan  $v$  laju gelombang. Jadi, gerakan di titik  $x$  pada waktu  $t$  sama seperti gerakan di titik  $x = 0$  pada waktu sebelumnya, yaitu  $t - \frac{x}{v}$ . Dengan demikian, kita bisa menentukan pergeseran di titik  $x$  pada waktu  $t$  hanya dengan merubah  $t$  pada Persamaan (2-2) dengan  $t - \frac{x}{v}$ . Jadi,

$$y(x, t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi f \left( t - \frac{x}{v} \right). \quad (3.3)$$

Fungsi gelombang bisa dituliskan pada Persamaan (2-3) menjadi beberapa bentuk yang berbeda. Dengan mengingat  $f = 1/T$  dan  $\lambda = v/f = vT$ , Persamaan (3.3) menjadi

$$y(x, t) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (3.4)$$



Bilangan gelombang, dengan simbol  $k$ , diartikan sebagai

$$k = 2\pi / \lambda. \quad (3.5)$$

Dengan substitusi  $\lambda = 2\pi/k$  dan  $f = \omega/2\pi$  ke Persamaan (3.1), diperoleh

$$\omega = vk. \quad (3.6)$$

Dengan demikian, Persamaan (3.4) menjadi

$$y(x,t) = A \sin(\omega t - kx). \quad (3.7)$$

Kita dapat memvariasikan Persamaan (3.3) sampai dengan Persamaan (3.7) agar lebih jelas gelombang yang merambat ke arah sumbu- $x$  negatif. Pada peristiwa ini, pergeseran di titik  $x$  pada saat  $t$  yaitu sama seperti gerak di titik  $x = 0$  pada waktu sesudahnya, yaitu  $t + \frac{x}{v}$ . sehingga, kita bisa merubah  $t$  pada Persamaan (3.2) dengan  $\left(t + \frac{x}{v}\right)$ . Jadi, untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu- $x$  negatif berlaku

$$y(x,t) = A \sin 2\pi f \left(t + \frac{x}{v}\right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) = A \sin(\omega t + kx). \quad (3.8)$$

Secara umum, gelombang berfungsi sebagai  $y(x,t) = A \sin(\omega t \pm kx)$ . Tanda positif ditunjukkan untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu- $x$  negatif, sedangkan tanda negatif ditunjukkan untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu- $x$  positif. Besaran  $(\omega t \pm kx)$  disebut sudut fase, dengan satuan derajatnya atau radian. Titik-titik yang pergeserannya besar, yaitu  $y = A$ , terjadi saat  $\sin(\omega t \pm kx) = 1$ . Sudut fase pada saat pergeseran besar yaitu  $\pi/2, 5\pi/2,$

dan seterusnya. Titik-titik yang pergeserannya minimum, yaitu  $y = 0$ , terjadi ketika sudut fasenya adalah  $0, \pi, 2\pi$ , dan seterusnya. Dua titik  $A$  dan  $B$  dikatakan memiliki fase sama apabila kedua titik ini memiliki beda sudut fase sebesar  $2\pi$  atau  $2n\pi$ , dengan  $n$  bilangan bulat. Apabila dua titik memiliki fase yang sama, maka kedua titik tersebut bergerak dalam arah yang sama.

### Contoh Soal 3.2

Iwan bermain dengan menggunakan tali plastik yang sering dipakai untuk menjemur pakaian. Iwan melepaskan salah satu ujung tali dan memegang tali tersebut sehingga tali membentuk garis lurus yang mendatar. Kemudian, Iwan menggerakannya ke atas dan ke bawah secara sinusoidal dimana frekuensi 2 Hz dan amplitudo 0,5 m. Laju gelombang pada tali yaitu  $v = 12$  m/s. Saat  $t = 0$  ujung tali mempunyai pergeseran nol dan bergerak ke arah sumbu-y positif.

- Hitunglah amplitudo, frekuensi sudut, periode, panjang gelombang, dan bilangan gelombang dari gelombang yang terbentuk pada tali.
- Tulislah fungsi gelombangnya.
- Tulislah fungsi gelombang dari sebuah titik yang terletak pada tali yang dipegang Iwan.
- Tulislah fungsi gelombang dari sebuah titik yang berjarak 3 m dari ujung tali yang dipegang Iwan.

### Penyelesaian

- Amplitudo gelombang sama dengan amplitudo gerakan tali. Jadi, amplitudo  $A = 0,5$  m.

Frekuensi sudut  $\omega = 2\pi f = (2\pi \text{ rad})(2 \text{ Hz}) = 4\pi \text{ rad/s}$

$$\text{Periode } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2 \text{ Hz}} = 0,5 \text{ s.}$$

Panjang gelombang dapat cari dengan menggunakan Persamaan (3.1):

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{12 \text{ m/s}}{2 \text{ Hz}} = 6 \text{ m.}$$

Bilangan gelombang  $k$  dapat ditentukan dengan Persamaan (3.5) atau Persamaan (3.6). Diperoleh,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{6 \text{ m}} = \frac{\pi}{3} \text{ rad/m} \text{ atau } k = \frac{\omega}{v} = \frac{4\pi \text{ rad}}{12 \text{ m/s}} = \frac{\pi}{3} \text{ rad/m.}$$

- b. Misalkan ujung tali yang dipegang Iwan yaitu  $x = 0$  dan gelombang merambat sepanjang tali ke arah sumbu- $x$  positif. Oleh sebab itu, fungsi gelombangnya bisa dinyatakan pada Persamaan (3.4):

$$\begin{aligned} y(x,t) &= A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = (0,5 \text{ m}) \sin(2\pi) \left( \frac{t}{0,5 \text{ s}} - \frac{x}{6 \text{ m}} \right) \\ &= (0,5 \text{ m}) \sin [(4\pi \text{ rad/s})t - (\pi/3 \text{ rad/m})x] \end{aligned}$$

Hasil ini dapat juga diperoleh dengan menggunakan Persamaan (3.7), dimana

$$\omega = 4\pi \text{ rad/s} \text{ dan } k = \frac{\pi}{3} \text{ rad/m.}$$

- c. Fungsi gelombang pada sebuah titik yang terletak pada tali yang dipegang Iwan, artinya  $x = 0$ , dapat diperoleh dengan substitusi  $x = 0$  ke dalam jawaban (b). Diperoleh,

$$y(x,t) = (0,5 \text{ m}) \sin [(4\pi \text{ rad/s})t - (\pi/3 \text{ rad/m})(0)] = (0,5 \text{ m}) \sin(4\pi \text{ rad/s})t.$$

- d. Fungsi gelombang dari sebuah titik yang berjarak 3 m dari ujung tali yang dipegang Iwan bisa didapat dengan mensubstitusikan  $x = 3 \text{ m}$  ke dalam jawaban (b). Diperoleh,

$$\begin{aligned} y(x,t) &= (0,5 \text{ m}) \sin [(4\pi \text{ rad/s})t - (\pi/3 \text{ rad/m})(3 \text{ m})] \\ &= (0,5 \text{ m}) \sin [(4\pi \text{ rad/s})t - \pi \text{ rad}] \end{aligned}$$

➤ **Kecepatan dan Percepatan Partikel dalam Gelombang Sinusoidal**

Kita bisa menetapkan kecepatan transversal sembarang partikel yang bergerak pada gelombang transversal dengan menggunakan fungsi gelombang. Ada perbedaan antara cepat rambat gelombang dengan kecepatan transversal. Agar dapat membedakan keduanya, cepat rambat gelombang diberi simbol  $v$ , sedangkan kecepatan transversal diberi simbol  $v_y$ . Untuk menetapkan kecepatan transversal  $v_y$  di titik tertentu, kita artikan sebagai parsial fungsi gelombang  $y(x,t)$  dengan  $t$ . Jika fungsi gelombangnya berbentuk  $y(x,t) = A\sin(\omega t - kx)$ , maka kecepatan transversal didefinisikan sebagai

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \omega A \cos(\omega t - kx). \quad (3.9)$$

Ungkapan  $\partial y(x,t)/\partial t$  disebut diferensial parsial  $y(x,t)$  dengan  $t$ , yaitu diferensial  $y(x,t)$  dengan  $t$  dengan mempertahankan  $x$  tetap. Persamaan (3.9) menunjukkan bahwa kecepatan transversal berubah dengan waktu. Kecepatan transversal mencapai maksimum ketika  $\cos(\omega t - kx) = 1$ , sehingga  $v_{y, \text{maks}} = \omega A$ .

Percepatan partikel dalam gelombang sinusoidal merupakan diferensial parsial kedua dari  $y(x,t)$  dengan  $t$ . Jadi,

$$a_y(x,t) = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t - kx) = -\omega^2 y(x,t). \quad (3.10)$$

Kita dapat juga menentukan diferensial parsial kedua  $y(x,t)$  dengan  $x$ . Jika hal ini dilakukan, diperoleh

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = -k^2 A \sin(\omega t - kx) = -k^2 y(x,t). \quad (3.11)$$

Ungkapan  $\partial^2 y(x,t)/\partial x^2$  menunjukkan kelengkungan dawai. Berdasarkan Persamaan (3.10) dan Persamaan (3.11) serta mengingat  $\omega = vk$ , diperoleh

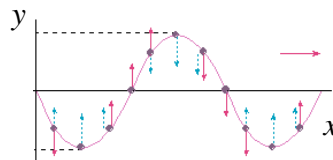
$$\frac{\partial^2 y(x,t)/\partial t^2}{\partial^2 y(x,t)/\partial x^2} = \frac{-\omega^2 y(x,t)}{-k^2 y(x,t)} = \frac{\omega^2}{k^2} = v^2,$$

atau

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}. \quad (3.12)$$

Persamaan (3.12) disebut persamaan gelombang yang merupakan salah satu persamaan yang begitu penting dibidang fisika.

Gambar 3.4 memperlihatkan arah kecepatan transversal  $v_y$  dan percepatan transversal yang diberikan oleh Persamaan (3.9) dan Persamaan (3.10) untuk beberapa titik pada dawai. Titik-titik di mana dawai itu mempunyai kelengkungan ke atas, maka percepatan di titik-titik itu bernilai positif. Sebaliknya, titik-titik di mana dawai itu mempunyai kelengkungan ke bawah, maka percepatan di titik-titik itu bernilai negatif. Perlu ditegaskan lagi bahwa  $v_y$  dan  $a_y$  yaitu kecepatan dan percepatan transversal dari titik-titik pada dawai. Titik-titik bergerak sepanjang arah sumbu-y, bukan sepanjang arah perambatan gelombang.



**Gambar 3.4.** Arah kecepatan transversal  $v_y$  dan percepatan transversal  $a_y$  pada beberapa titik dalam dawai.

### Contoh Soal 3.3

Fungsi gelombang transversal yang merambat sepanjang dawai diberikan pada persamaan  $y(x,t) = 3\sin \pi(t - 4x)$ , dimana  $x$  dan  $y$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon.

- Tetapkan panjang gelombang dan periode gelombang transversal ini.
- Tetapkan kecepatan transversal dan percepatan transversal pada saat  $t$ .

c. Tetapkan kecepatan transversal dan percepatan transversal pada titik  $x = 0,25$  cm ketika  $t = 0$ .

d. Tetapkan kecepatan transversal dan percepatan transversal maksimumnya

### Penyelesaian

a. Jika fungsi gelombang  $y(x,t) = 3 \sin \pi(t - 4x)$  dibandingkan dengan Persamaan (1-7), yaitu  $y(x,t) = A \sin(\omega t - kx) = A \sin \pi \left( \frac{2t}{T} - \frac{2x}{\lambda} \right)$ , diperoleh

❖ panjang gelombang:  $4 = \frac{2}{\lambda}$ ,  $\lambda = 0,5$  cm,

❖ periode:  $1 = \frac{2}{T}$ ,  $T = 2$  sekon.

b. Kecepatan transversal:  $v_y = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = 3\pi \cos \pi(t - 4x)$ .

Percepatan transversal  $a_y = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = -3\pi^2 \sin \pi(t - 4x)$ .

c. Kecepatan transversal dan percepatan transversal pada  $x = 0,25$  cm ketika  $t = 0$  dapat dihitung dengan substitusi  $x = 0,25$  cm dan  $t = 0$  ke dalam jawaban (b):

$$v_y = 3\pi \cos(-\pi) = -3\pi \text{ cm/s}, \quad a_y = -3\pi^2 \sin(-\pi) = 0.$$

d. Kecepatan transversal maksimum,  $v_{y,\text{maks}} = 3\pi$  cm/s.

Percepatan transversal maksimum,  $a_{y,\text{maks}} = -3\pi^2$  cm/s<sup>2</sup>.

### 3.4. Laju Gelombang Transversal pada Dawai

Besaran fisika yang dipengaruhi oleh laju gelombang transversal pada senar yaitu tegangan senar  $F$  dan massa per satuan panjang  $\mu$  (kerapatan massa linear) senar. Dengan menggunakan pendekatan analisis, diperlihatkan bahwa hubungan antara laju gelombang transversal, tegangan senar, dan massa per satuan panjang senar dirumuskan melalui persamaan

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}. \tag{3.13}$$

### Contoh Soal 3.4

Gelombang transversal dengan panjang gelombang 0,3 m merambat sepanjang kawat bermassa 15 kg dengan panjang 300 m. Jika tegangan kawat 1.000 N, berapakah laju gelombang transversal dan frekuensinya?

#### Penyelesaian

Panjang gelombang :  $\lambda = 0,3$  m

Panjang kawat :  $l = 300$  m

Massa kawat :  $m = 15$  kg

Tegangan kawat :  $F = 1.000$  N

Jadi, massa per satuan panjang kawat  $\mu = \frac{m}{l} = \frac{15 \text{ kg}}{300 \text{ m}} = 0,05 \text{ kg/m}$ .

Dengan memakai Persamaan (1-13), diperoleh

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{1.000 \text{ N}}{0,05 \text{ kg/m}}} = \sqrt{20.000} \text{ m/s} = 141 \text{ m/s}.$$

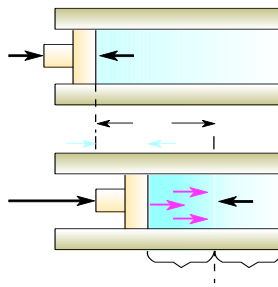
Frekuensi gelombang dapat dihitung:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{141 \text{ m/s}}{0,3 \text{ m}} = 470 \text{ Hz}.$$

### 3.5. Laju Gelombang Longitudinal

Gelombang longitudinal merupakan salah satu pokok bahasan yang sangat penting. Apabila frekuensi gelombang longitudinal terletak dalam jangkauan pendengaran manusia, gelombang manusia dikenal sebagai bunyi. Jadi, bunyi merupakan gelombang longitudinal. Semua alat musik tiup, misalnya seruling, akan menghasilkan gelombang longitudinal (bunyi) yang merambat dalam medium udara yang berada dalam pipa. Seperti pada pembahasan laju gelombang transversal, laju gelombang longitudinal juga bergantung pada sifat-sifat medium. Pada gelombang longitudinal pergeseran partikel-partikel yang bergetar tidak tegak lurus dengan arah perambatan, tetapi searah dengan arah perambatan.

Kita akan membahas laju gelombang longitudinal dalam fluida yang berada di dalam pipa. Gambar 3.5 menunjukkan fluida, baik zat cair maupun gas, dengan kerapatan  $\rho$  yang berada dalam pipa yang luas penampangnya  $A$ . Dalam keadaan setimbang, fluida ini memiliki tekanan tetap  $p$ . Pada Gambar 3.5(a), fluida dalam keadaan diam. Ketika  $t = 0$ , piston di ujung kiri digerakkan ke kanan dengan laju tetap  $v_y$ . Hal ini menyebabkan gelombang merambat ke kanan di sepanjang pipa. Gambar 3.5(b) menunjukkan keadaan fluida pada saat  $t$ . Bagian fluida di sebelah kiri titik  $P$  bergerak ke kanan dengan laju  $v_y$ , sedangkan bagian fluida yang terletak di sebelah kanan titik  $P$  tetap diam. Batas antara bagian fluida yang bergerak dan bagian fluida yang diam berjalan ke kanan dengan kelajuan yang sama dengan laju gelombang, yaitu  $v$ . Pada saat  $t$  piston telah bergerak sejauh  $v_y t$  dan batas itu telah bergerak sejauh  $vt$ . Kita akan menentukan laju gelombang longitudinal ini dengan memakai teorema impuls-momentum.<sup>11</sup>



**Gambar 3.5.** Laju gelombang longitudinal dalam fluida yang berada dalam pipa. (a) Fluida berada dalam keadaan setimbang. (b) Pada fluida yang bergerak terdapat gaya sebesar  $(p + \Delta p)A - pA = \Delta pA$  yang arahnya ke kanan.

<sup>11</sup> Young, H.D. and Freedman, Roger A. 2000. *University Physics* (Tenth Edition). New York: Addison Wesley Longman, Inc



Banyaknya air yang bergerak saat waktu  $t$  sama dengan banyaknya air pada awalnya menempati bagian pipa dengan panjang  $vt$  dan luas penampang  $A$ . Oleh sebab itu, air yang bergerak mempunyai volume  $Avt$  dan massa  $\rho Avt$ . Dengan mengingat momentum merupakan massa kali kecepatan, massa fluida ini mempunyai momentum sebesar  $(\rho Avt)v_y$ .

Kemudian, kita akan membahas perubahan tekanan  $\Delta p$  dalam air yang bergerak. Air yang bergerak mempunyai volume mula-mula  $V_0 = Avt$  dan telah berkurang sebanyak  $\Delta V = -Av_y t$  (tanda (-) memperlihatkan bahwa volume fluida sudah berkurang). Untuk menghitung perubahan tekanan fluida  $\Delta p$ , kita akan menggunakan besaran modulus Bulk  $B$  yang diartikan sebagai nilai negatif dari perbandingan perubahan tekanan  $\Delta p$  dengan fraksi perubahan volume  $\Delta V/V_0$ . Secara matematis, modulus Bulk dirumuskan dengan persamaan

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V_0}.$$

Akan tetapi,  $V_0 = Avt$  dan  $\Delta V = -Av_y t$  sehingga

$$B = -\frac{\Delta p}{-Av_y t / Avt} \text{ atau } \Delta p = B \frac{v_y}{v}.$$

Tekanan air yang bergerak yaitu  $p + \Delta p$  dan gaya yang diberikan oleh piston pada air yang bergerak yaitu  $(p + \Delta p)A$ . Jadi, pada air yang bergerak ada gaya sebesar  $(p + \Delta p)A - pA = \Delta pA$  (Gambar 3.5(b)). Jadi, air yang bergerak mempunyai impuls sebesar  $\Delta pAt = (Bv_y/v)At$ . Dengan mengingat teorema impuls-momentum, didapat.

$$B \frac{v_y}{v} At = \rho vtA_y,$$

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}. \quad (3.14)$$

Jadi, laju gelombang longitudinal pada air hanya bergantung pada modulus Bulk  $B$  dan massa jenis fluida.

Persamaan (3.14) adalah perumusan gelombang longitudinal didalam pipa. Akan tetapi, Persamaan (3.14) berlaku untuk gelombang longitudinal secara umum. Laju gelombang bunyi di udara dan di air bisa dihitung dengan memakai Persamaan (3.14).

Apabila gelombang longitudinal merambat didalam zat padat, keadaannya akan sedikit berbeda. Sebatang zat padat dapat melebar sedikit ke samping jika penampang batang itu ditekan secara horizontal. Sebaliknya, fluida yang berada didalam pipa tidak mampu melebar ke samping jika luas penampangnya ditekan secara horizontal. Kita bisa memperlihatkan bahwa laju gelombang longitudinal didalam zat padat bisa dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}, \quad (3.15)$$

dengan  $Y$  yaitu modulus Young zat padat, yaitu perbandingan antara tegangan dan regangan, dan  $\rho$  adalah massa jenis zat padat.

Perhatikan bahwa ada persamaan bentuk Persamaan (3.13), (3.14), dan (3.15). Pada ketiga persamaan tersebut, pembilang di dalam tanda akar menunjukkan sifat elastik yang dijelaskan gaya pemulih dan penyebut menunjukkan sifat inersial medium yang bersangkutan.

Tabel 3.1 memperlihatkan laju bunyi untuk beberapa macam medium. Gelombang bunyi merambat lebih lama untuk medium timah daripada untuk medium aluminium, karena timah mempunyai nilai modulus Bulk dan modulus geser lebih sedikit dan massa jenis yang lebih besar.

**Tabel 3.1.** Laju Bunyi dalam Bahan

Bahan	Laju Bunyi (m/s)
<b>Gas</b>	
Udara (20°C)	344
Helium (20°C)	999
Hidrogen (20°C)	1.330
<b>Zat Cair</b>	
Helium Cair (4 K)	211

Raksa (20°C)	1.451
Air (0°C)	1.402
Air (20°C)	1.482
Air (100°C)	1.543
<b>Zat Padat</b>	
Aluminium	6.420
Timah	1.960
Baja	5.941

### 3.6. Gelombang Bunyi dalam Gas

Dalam menetapkan laju perambatan bunyi didalam gas ideal dengan menggunakan Persamaan (2-14), kita harus mengetahui modulus Bulk gas ideal. Dalam frekuensi audio, antara 20 Hz – 20.000 Hz, perambatan bunyi dalam gas ideal sangat mendekati proses adiabatik. Oleh sebab itu, untuk gelombang bunyi dalam gas ideal Persamaan (2-14) harus menggunakan modulus Bulk adiabatik,  $B_{ad}$ . Dalam proses adiabatik berlaku  $pV^\gamma = \text{konstan}$ , sehingga  $dp/dV = -\gamma p/V$ . Dengan memakai definisi modulus Bulk diperoleh  $B_{ad} = \gamma p$ .

Dalam proses isothermal, pada gas ideal berlaku  $pV = \text{konstan}$ , sehingga  $dp/dV = -p/V$  dan  $B_{ad} = p$ . Dengan demikian, untuk gas ideal Persamaan (2-14) menjadi

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}. \quad (3.16)$$

Tetapi, massa jenis gas ideal adalah  $\rho = pM/RT$  sehingga Persamaan (2-16) menjadi

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (3.17)$$

dengan  $R$  tetapan gas umum,  $M$  massa molar, dan  $T$  suhu mutlak.

**Contoh Soal 3.5**

Hitunglah laju gelombang bunyi di udara pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$ .

**Penyelesaian**

Massa molar rerata udara adalah  $M = 28,8 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ,  $\gamma = 1,40$ , tetapan gas umum  $R = 8,315 \text{ J/mol.K}$  dan  $T = 20^{\circ}\text{C} = 293 \text{ K}$ . Substitusi nilai-nilai ini ke Persamaan (1-17), diperoleh  $v = 344 \text{ m/s}$ .

## LATIHAN SOAL

- Persamaan gelombang transversal yang merambat sepanjang senar ditetapkan melalui persamaan  $y(x,t) = 6\sin(4\pi t + 0,02\pi x)$ , dimana  $x$  dan  $y$  ditetapkan dalam cm dan  $t$  dalam sekon. Hitunglah
  - Amplitudo
  - Panjang gelombang
  - Frekuensi
  - Laju gelombang
  - Arah perambatan gelombang.
- Gelombang dengan frekuensi 500 Hz merambat dengan laju 350 m/s.
  - Berapakah jarak antara dua titik yang berlainan fase  $\pi/3$ ?
  - Berapakah beda fase antara dua pergeseran pada suatu titik tertentu pada waktu  $10^{-3}$  s berselang?
- Persamaan gelombang transversal yang merambat sepanjang senar ditetapkan melalui persamaan  $y(x,t) = 15\sin[(\pi/6)(64t - 2x)]$ , dengan  $x$  dan  $y$  ditetapkan dalam cm dan  $t$  dalam sekon.
  - Hitunglah kecepatan transversal maksimum pada titik-titik sepanjang senar
  - Hitunglah kecepatan transversal sebuah titik pada jarak  $x = 6$  cm ketika  $t = 0,25$  s.
- Gelombang sinusoidal merambat pada tali dengan laju 80 cm/s. Pergeseran partikel di  $x = 10$  cm ditetapkan melalui persamaan  $y(x,t) = 5\sin(1 - 4t)$ , dengan satuan cm. Massa per satuan panjang tali 4 g/cm.
  - Berapakah frekuensi gelombang ini?
  - Berapakah panjang gelombangnya?
  - Tulislah fungsi gelombangnya.
  - Hitunglah tegangan tali.

5. Kita dapat mendengarkan kereta api yang sedang bergerak dengan cara menempelkan telinga pada rel kereta api. Jika modulus Young baja  $Y = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  dan massa jenis baja  $7,9 \text{ kg/m}^3$ , berapakah waktu yang diperlukan gelombang bunyi yang merambat sepanjang rel baja ketika kereta api itu berjarak 1 km?
  
6. Laju gelombang bunyi yang merambat dalam gas hidrogen pada suhu 200 K adalah 1.220 m/s. Dengan menganggap bahwa hidrogen adalah gas ideal, berapakah laju bunyi dalam gas hidrogen apabila suhunya berubah menjadi 405 K?

## BAB IV

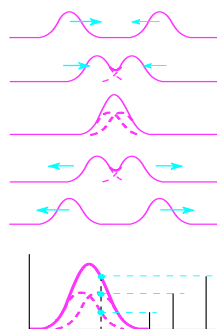
### SIFAT-SIFAT UMUM GELOMBANG

Saat Anda berteriak di dekat dinding bangunan atau berteriak di pinggir jurang yang menghadap gunung, gelombang bunyi akan dipantulkan oleh permukaan tegar pada dinding atau gunung sehingga terjadilah gema. Apabila kalian menyentak salah satu ujung tali yang ujung lainnya diikatkan pada penahan, maka pulsa yang menjalar sepanjang tali akan dipantulkan kembali kejadian ini disebut dengan interferensi.

Interferensi gelombang adalah salah satu sifat-sifat umum gelombang. Semua jenis gelombang, baik transversal maupun longitudinal, mempunyai sifat-sifat yang sama. Kita akan membahas beberapa sifat umum gelombang.

#### 4.1. Superposisi Gelombang

Nah saat ini kita ingin membahas apa yang terjadi apabila dua atau lebih gelombang yang sejenis merambat pada medium yang sama, contohnya dua gelombang bunyi bersama-sama merambat di udara. Agar memudahkan pembahasan, kita akan melihat dua pulsa gelombang yang merambat pada tali. Gambar 4.1 memperlihatkan dua buah pulsa gelombang pada tali yang merambat pada arah yang berlawanan. Saat kedua pulsa itu berhubungan, pergeseran tali sama dengan jumlah aljabar dari pergeseran masing-masing pulsa. Setelah keduanya berhubungan, kedua pulsa melanjutkan perambatannya tanpa mengalami adanya perubahan bentuk.



**Gambar 2.1.** Dua pulsa gelombang merambat pada arah berlawanan sepanjang tali yang teregang. Setelah berhubungani, kedua pulsa meneruskan perambatannya tanpa mengalami perubahan bentuk.

Jadi, apabila terdapat dua gelombang atau lebih menjalar pada medium yang sama, maka pergeseran totalnya adalah jumlah pergeseran dari masing-masing gelombang. Hal ini dikenal sebagai *prinsip superposisi*. Secara matematis, jika  $y_1(x,t)$  dan  $y_2(x,t)$  berturut-turut memperlihatkan fungsi gelombang dari dua gelombang tali yang merambat pada medium yang sama, maka pergeseran tali saat dua gelombang itu berinteraksi memenuhi persamaan

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t). \quad (4.1)$$

Prinsip superposisi merupakan konsekuensi logis dari persamaan gelombang yang bersifat linear untuk pergeseran transversal kecil. Dengan alasan ini pula prinsip superposisi juga sering disebut sebagai prinsip superposisi linear. Untuk sistem fisika yang mediumnya tidak memenuhi hukum Hooke, persamaan gelombangnya taklinear dan prinsip superposisi menjadi tidak berlaku.

Prinsip superposisi memegang peranan penting pada semua jenis gelombang. Apabila seorang teman berbicara dengan Anda yang sedang mendengarkan musik dari pengeras suara stereo, Anda dapat membedakan antara bunyi pembicaraan dan suara musik. Hal ini terjadi karena gelombang bunyi total yang sampai di telinga Anda merupakan jumlah aljabar dari gelombang yang dihasilkan oleh suara teman Anda dan gelombang yang dihasilkan oleh pengeras suara stereo. Jika dua gelombang bunyi tidak bergabung secara linear, suara yang Anda dengar menjadi campur-aduk dan kacau-balau. Prinsip superposisi juga memungkinkan kita dapat mendengarkan nada-nada yang dimainkan oleh setiap alat musik dalam pertunjukkan konser musik, meskipun gelombang bunyi dari seluruh alat konser yang sampai ke telinga itu sangat kompleks.



## 4.2. Interferensi Gelombang

Superposisi dua atau lebih gelombang sinusoidal disebut interferensi. Hasil interferensi gelombang-gelombang sinusoidal ini bergantung pada beda fase di antara gelombang-gelombang yang berinterferensi. Kita akan membahas dua gelombang yang frekuensi, amplitudo, dan laju sama yang merambat ke arah sumbu- $x$  positif, tetapi kedua gelombang itu memiliki beda fase  $\phi$ . Diandaikan dua gelombang itu berturut-turut memiliki fungsi gelombang

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t - \phi), \quad (4.2)$$

dan

$$y_2(x, t) = A \sin(kx - \omega t). \quad (4.3)$$

Persamaan (4.2) dapat dinyatakan dalam bentuk

$$y_1(x, t) = A \sin \left[ k \left( x - \frac{\phi}{k} \right) - \omega t \right] \quad (4.4a)$$

atau

$$y_1(x, t) = A \sin \left[ kx - \omega \left( t + \frac{\phi}{\omega} \right) \right]. \quad (4.4b)$$

Persamaan (4.4a) dan Persamaan (4.3) ditunjukkan bahwa kedua gelombang itu mengalami pergeseran satu sama lain sepanjang sumbu- $x$  yang jaraknya  $\phi/k$ . Persamaan (4.4a) dan Persamaan (4.3) memperlihatkan bahwa pada titik  $x$  tertentu kedua gelombang itu memunculkan gerak harmonik sederhana dengan beda waktu sebesar  $\phi/\omega$ .

Selanjutnya, kita ingin menetapkan gelombang resultan, yaitu jumlah dari Persamaan (4.2) dan Persamaan (4.3). Dengan menggunakan prinsip superposisi, didapat

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = A [\sin(kx - \omega t - \phi) + \sin(kx - \omega t)]$$

Dengan memakai rumus trigonometri, yaitu

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{1}{2}(A + B) \cos \frac{1}{2}(A - B),$$

didapat

$$y(x, t) = A \left[ 2 \sin \frac{1}{2}(kx - \omega t - \phi + kx - \omega t) \cos \frac{1}{2}(kx - \omega t - \phi - kx + \omega t) \right]$$

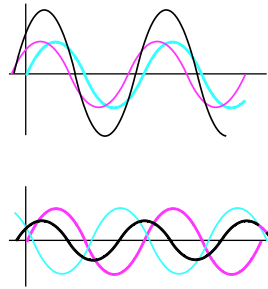
$$y(x, t) = A \left[ 2 \sin \left( kx - \omega t - \frac{\phi}{2} \right) \cos \frac{\phi}{2} \right]$$

atau

$$y(x, t) = \left( 2A \cos \frac{\phi}{2} \right) \sin \left( kx - \omega t - \frac{\phi}{2} \right). \quad (4.5)$$

Gelombang resultan memperlihatkan sebuah gelombang baru yang mempunyai frekuensi dan bilangan gelombang yang sama terhadap gelombang awal, tetapi mempunyai amplitudo  $2A \cos(\phi/2)$ . Jika beda fase  $\phi$  antara  $y_1(x, t)$  dan  $y_2(x, t)$  sangat kecil jika dibandingkan dengan  $180^\circ$ , maka amplitudo penjumlahannya mendekati nilai  $2A$ , sebab untuk  $\phi$  sangat kecil  $\cos(\phi/2) \cong \cos 0^\circ = 1$ . Jika  $\phi = 0^\circ$  maka kedua gelombang itu mempunyai fase yang sama. Artinya, ujung gelombang  $y_1(x, t)$  akan bersesuaian dengan puncak gelombang  $y_2(x, t)$  dan lembah gelombang  $y_1(x, t)$  akan bersesuaian dengan lembah gelombang  $y_2(x, t)$ . Jika hal ini terjadi, antara  $y_1(x, t)$  dan  $y_2(x, t)$  terjadi interferensi konstruktif dan amplitudo penjumlahannya sama persis dengan dua kali amplitudo masing-masing gelombang. Sebaliknya, apabila perbedaan fase  $\phi$  antara  $y_1(x, t)$  dan  $y_2(x, t)$  mendekati  $180^\circ$ , maka amplitudo penjumlahannya hampir sama dengan nol. Ini terjadi karena untuk  $\phi = 180^\circ$ ,  $\cos(\phi/2) \cong \cos 90^\circ = 0$ . Jika  $\phi = 180^\circ$ , maka ujung gelombang  $y_1(x, t)$  akan berpadanan terhadap lembah gelombang  $y_2(x, t)$  dan lembah gelombang  $y_1(x, t)$

akan berpadanan dengan puncak gelombang  $y_2(x,t)$ . ini terjadi, antara  $y_1(x,t)$  dan  $y_2(x,t)$  terjadi interferensi destruktif dan amplitudo resultannya sama dengan nol. Gambar 2.2(a) menunjukkan superposisi dua gelombang dengan beda fase  $\phi \cong 0^\circ$ , sedangkan Gambar 4.2(b) menunjukkan superposisi dua gelombang dengan beda fase  $\phi \cong 180^\circ$ .<sup>12</sup>



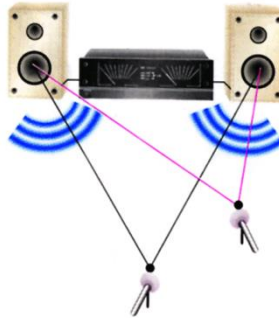
**Gambar 2.2.** (a) Superposisi dua gelombang yang frekuensi dan amplitudonya sama serta (hampir) sefase menghasilkan sebuah gelombang yang amplitudonya (hampir) dua kali amplitudo masing-masing gelombang. (b) Superposisi dua gelombang yang frekuensi dan amplitudonya sama serta berbeda fase mendekati  $180^\circ$  menghasilkan sebuah gelombang yang amplitudonya (hampir) sama dengan nol. Perhatikan bahwa panjang gelombang hasil superposisi dalam setiap kasus tidak berubah.

Kita dapat juga menjumlahkan gelombang-gelombang yang memiliki panjang gelombang sama, tetapi amplitudonya berbeda. Dalam kasus ini, resultan gelombangnya memiliki panjang gelombang yang sama dengan panjang gelombang komponen-komponennya, tetapi resultan amplitudonya tidak memiliki bentuk sederhana sebagaimana dirumuskan oleh Persamaan (4.5). Mengapa demikian? Jika dua gelombang yang dijumlahkan memiliki amplitudo  $A_1$  dan  $A_2$  dan kedua gelombang itu sefase, maka resultan amplitudonya adalah  $A_1 + A_2$ . Sebaliknya, jika kedua gelombang itu berbeda fase  $180^\circ$ , maka amplitudo resultannya adalah  $|A_1 - A_2|$ .

Gambar 4.3 menunjukkan contoh interferensi gelombang. Dua penguat suara yang dijalankan sefase oleh penguat, memancarkan gelombang bunyi sinusoidal identik dengan frekuensi yang sama. Pada titik  $P$  ditempatkan mikrofon

<sup>12</sup> Jewett, Serway. 2010. Physics for Scientists and Engineers, California State Polytechnic University, Pomona.

yang berjarak sama dari kedua pengeras suara. Puncak gelombang yang dipancarkan oleh dua pengeras suara pada waktu yang sama menempuh jarak yang sama, sehingga sampai di titik  $P$  pada waktu yang sama. Jadi, kedua gelombang itu sefase dan di  $P$  terjadi interferensi saling memperkuat (konstruktif). Amplitudo gelombang total di  $P$  adalah dua kali amplitudo gelombang komponennya.



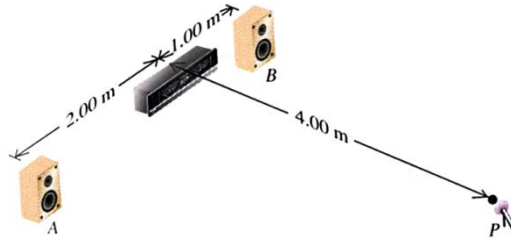
**Gambar 4.3.** Dua pengeras suara dijalankan oleh penguat yang sama, sehingga gelombang yang dipancarkan oleh kedua pengeras suara itu sefase.

Sekarang mikrofon digerakkan ke titik  $Q$  di mana jarak dari kedua pengeras suara ke mikrofon berbeda sebesar  $\frac{1}{2}\lambda$ . Jadi, kedua gelombang itu sampai di  $Q$  dengan beda lintasan sebesar setengah periode atau berlawanan fase. Artinya, puncak positif dari satu pengeras suara tiba pada waktu yang bersamaan dengan puncak negatif dari pengeras suara yang lain. Dalam hal ini di  $Q$  terjadi interferensi saling memperlemah (destruktif) dan amplitudo yang diukur mikrofon itu jauh lebih kecil daripada satu pengeras suara saja. Jika amplitudo dari kedua pengeras suara itu sama, kedua gelombang itu akan saling meniadakan di  $Q$  dan amplitudo totalnya sama dengan nol.

Interferensi konstruktif terjadi jika beda lintasan yang dilalui oleh kedua gelombang adalah  $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  atau  $n\lambda$  ( $n = \text{bilangan cacah}$ ). Dalam hal ini kedua gelombang sampai di mikrofon sefase. Jika beda lintasan yang dilalui oleh kedua gelombang adalah  $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$  atau  $(n + \frac{1}{2})\lambda$  ( $n = \text{bilangan cacah}$ ), maka gelombang-gelombang itu sampai di mikrofon berbeda fase dan terjadi interferensi destruktif.

### Contoh Soal 4.1

Gambar dibawah ini menunjukkan dua pengeras suara *A* dan *B* yang dijalankan oleh penguat suara yang sama sehingga keduanya dapat memancarkan gelombang sinusoidal sefase. Laju perambatan bunyi di udara 350 m/s. Pada frekuensi berapakah supaya di *P* terjadi interferensi (a) konstruktif dan (b) destruktif?



### Penyelesaian

Sifat interferensi di *P* bergantung pada beda lintasan dari titik *A* dan *B* ke titik *P*. Jarak dari pengeras suara *A* dan *B* ke titik *P* berturut-turut adalah

$$x_{AP} = \sqrt{(2,00 \text{ m})^2 + (4,00 \text{ m})^2} = 4,47 \text{ m}$$

$$x_{BP} = \sqrt{(1,00 \text{ m})^2 + (4,00 \text{ m})^2} = 4,12 \text{ m}.$$

Dengan demikian, beda lintasan itu adalah

$$d = x_{AP} - x_{BP} = 4,47 \text{ m} - 4,12 \text{ m} = 0,35 \text{ m}.$$

- a. Interferensi konstruktif terjadi apabila beda lintasan  $d = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$ . Akan tetapi,  $\lambda = v/f$  sehingga  $d = 0, v/f, 2v/f, \dots = nv/f$ . Jadi, frekuensi yang mungkin supaya di *P* terjadi interferensi konstruktif adalah

$$f_n = \frac{nv}{d} = n \frac{350 \text{ m/s}}{0,35 \text{ m}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$f_n = 1.000 \text{ Hz}, 2.000 \text{ Hz}, 3.000 \text{ Hz}, \dots$$

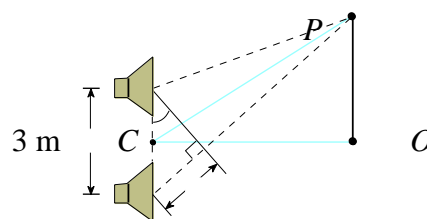
- b. Interferensi destruktif terjadi jika beda lintasan  $d = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$ . Akan tetapi,  $\lambda = v/f$  sehingga  $d = v/2f, 3v/2f, 5v/2f, \dots$ . Jadi, frekuensi yang mungkin supaya di  $P$  terjadi interferensi destruktif adalah

$$f_n = \frac{nv}{2d} = n \frac{350 \text{ m/s}}{2(0,35 \text{ m})} \quad (n = 1, 3, 5, \dots)$$

$$f_n = 500 \text{ Hz}, 1.500 \text{ Hz}, 2.500 \text{ Hz}, \dots$$

#### Contoh Soal 4.2

Gambar dibawah ini menunjukkan dua pengeras suara yang dijalankan oleh penguat suara yang sama sehingga masing-masing pengeras suara dapat memancarkan gelombang sinusoidal dengan frekuensi 2.000 Hz. Dua pengeras suara itu terpisah sejauh 3 m satu sama lain. Seorang pendengar mula-mula di  $O$  dan berada pada jarak 8 m, seperti ditunjukkan pada diagram. Titik  $C$  merupakan titik tengah di antara dua pengeras suara, dengan  $CO$  tegak lurus  $OP$ . Laju perambatan bunyi di udara pada saat itu adalah 330 m/s. Berapa jauhkah pendengar itu harus berjalan sepanjang garis  $OP$  supaya ia mendengar interferensi destruktif yang pertama?



$\Delta r$

## Penyelesaian

Laju perambatan bunyi di udara adalah  $v = 330 \text{ m/s}$  dan frekuensi yang dipancarkan oleh pengeras suara adalah  $f = 2.000 \text{ Hz}$ , sehingga panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{330 \text{ m/s}}{2.000 \text{ Hz}} = 0,165 \text{ m.}$$

Interferensi destruktif yang pertama terjadi ketika beda lintasan kedua gelombang bunyi,  $\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{1}{2} \lambda$ . Jadi,

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{1}{2} \lambda = \frac{1}{2} (0,165 \text{ m}) = 0,0825 \text{ m.}$$

Berdasarkan Gambar tersebut untuk sudut  $\theta$  kecil, dua sudut  $\theta$  pada diagram sama besar. Dengan demikian, untuk segitiga siku-siku kecil berlaku

$$\sin \theta = \frac{\Delta r}{3 \text{ m}} = \frac{0,0825 \text{ m}}{3 \text{ m}} = 0,0275 \text{ atau } \theta = 1,58^\circ.$$

Untuk segitiga besar berlaku  $\tan \theta = y/8$ , sehingga

$$y = (8 \text{ m}) \tan 1,58^\circ = 0,22 \text{ m.}$$

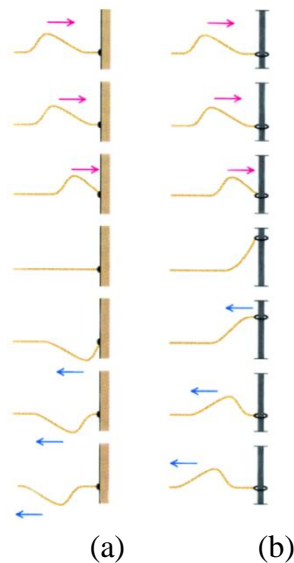
Oleh karena itu, pendengar akan mendengar interferensi destruktif yang pertama pada posisi  $y = 0,22 \text{ m}$ .

### 4.3. Refleksi dan Transmisi Gelombang

Untuk mengulang kembali materi refleksi dan transmisi gelombang serta peranan batas medium gelombang, kita akan membahas mengenai gelombang transversal pada senar yang diregangkan. Apa yang terjadi apabila pulsa gelombang atau gelombang sinusoidal tiba di ujung senar?

Apabila ujung senar itu diikatkan ketat pada penahan, maka ujung itu termasuk ujung tetap yang tidak bisa tidak diam. Jika pulsa gelombang tiba di ujung tetap, maka pulsa gelombang memberikan gaya pada penahan itu. Tetapi penahan tidak mampu bergerak. Menurut Hukum III Newton, penahan memberikan gaya yang sama besarnya berlawanan arah pada senar. Gaya reaksi ini akan menghasilkan pulsa gelombang yang merambat sepanjang senar dalam arah yang berlawanan dengan arah pulsa gelombang yang menuju penahan. Jadi, pulsa gelombang yang menuju penahan telah direfleksikan di titik ujung tetap

senar. Gambar 4.4 ditunjukkan pada rangkaian peristiwa refleksi gelombang pada ujung yang tetap.



**Gambar 4.4.** (a) Refleksi gelombang pada ujung yang tetap dan (b) refleksi gelombang pada ujung bebas.

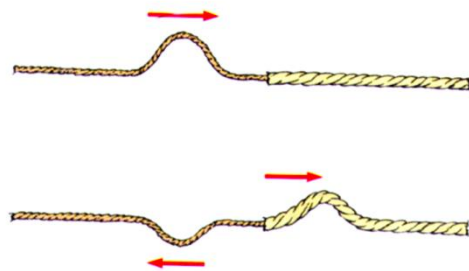
Apabila suatu gelombang menuju titik ujung tetap, maka suatu gelombang yang lain akan menghasilkan titik ini melalui cara yang sama. Pergeseran setiap titik pada senar adalah jumlah pergeseran-pergeseran yang diakibatkan oleh gelombang yang menuju titik tetap dan gelombang yang direfleksikan. Karena ujung tetap, kedua gelombang itu harus selalu berinterferensi secara destruktif sehingga memberikan pergeseran nol di ujung tetap itu. Sehingga, gelombang yang direfleksikan selalu berbeda fase sebesar  $180^\circ$  dimana gelombang yang menuju ujung tetap. Istilah lain, saat terjadi refleksi pada ujung tetap gelombang mengalami perubahan fase sebesar  $180^\circ$ .

Saat ini akan kita bahas refleksi pulsa gelombang di ujung bebas dari sebuah senar yang diregangkan, yaitu ujung yang bisa bergerak bebas pada arah tegak lurus dengan panjang dawai. Hal ini bisa didapat melalui cara mengikatkan ujung dawai itu pada sebuah cincin yang sangat ringan sehingga bisa meluncur tanpa gesekan pada penahan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.4(b). Saat pulsa gelombang tiba di ujung bebas, cincin akan bergerak sepanjang penopang. Saat cincin mencapai pergeseran yang maksimum, sesaat cincin diam. Akan



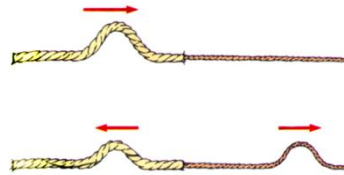
tetapi, senar menjadi teregang sehingga ujung bebas senar ditarik kembali ke bawah dan didapat pulsa gelombang yang direfleksikan. Seperti pada kejadian refleksi gelombang pada ujung konstan, pulsa yang direfleksikan ini bergerak berlawanan arah dengan pulsa mula-mula. Akan tetapi, pada ujung bebas arah pergeserannya sama terhadap arah pergeseran pulsa mula-mula. Berbeda dengan refleksi pada ujung tetap, gelombang yang menuju titik ujung bebas dan gelombang yang direfleksikan harus berinterferensi konstruktif di titik itu. Dapat disimpulkan bahwa, gelombang yang direfleksikan harus selalu satu fase dengan gelombang datang. Dengan kata lain, pada ujung bebas gelombang yang direfleksikan tidak mengalami perubahan fase.

Apabila senar kedua memiliki massa per satuan panjang yang lebih besar dibandingkan senar 1, seperti pada Gambar 4.7, maka gelombang yang direfleksikan kembali ke senar 1 masih akan mengalami pergeseran fase sebesar  $180^\circ$ . saat pulsa gelombang ini mencapai sambungan senar, ada bagian pulsa gelombang yang direfleksikan dan simpangannya terbalik serta ada bagian pulsa gelombang yang ditransmisikan ke senar kedua. Pulsa gelombang yang direfleksikan mempunyai amplitudo yang lebih kecil dibandingkan pulsa gelombang datang, sebab gelombang yang ditransmisikan akan terus berjalan sepanjang senar 2 yang membawa sebagian energi yang datang. Simpangan pulsa gelombang refleksi yang terbalik ini sama seperti perlakuan pulsa gelombang saat tiba di ujung tetap.



**Gambar 4.5** (a) Sebuah pulsa gelombang merambat ke kanan dari senar yang massa per satuan panjangnya kecil ke senar yang massa per satuan panjangnya lebih besar. (b) Sebagian pulsa gelombang ini direfleksikan dengan simpangan terbalik, dan sebagian lagi ditransmisikan ke senar yang kedua

Apabila senar kedua memiliki massa per satuan panjang yang lebih kecil dibandingkan senar pertama, maka ada bagian pulsa gelombang yang direfleksikan dan ada pula bagian pulsa gelombang yang ditransmisikan. Akan tetapi, pulsa gelombang yang direfleksikan ini terjadi tanpa adanya perubahan fase. Dalam peristiwa ini, pulsa gelombang yang direfleksikan tidak mengalami perubahan arah simpangan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** (a) Sebuah pulsa gelombang merambat ke kanan dari senar yang massa per satuan panjangnya besar ke senar yang massa per satuan panjangnya lebih kecil. (b) Sebagian pulsa gelombang ini direfleksikan dengan simpangan searah dengan pulsa gelombang datang, dan sebagian lagi ditransmisikan ke senar yang kedua.

Pada bab 1 sudah dijelaskan bahwa, laju gelombang transversal pada senar bergantung pada massa per satuan panjang dan tegangan senar. Oleh sebab itu, gelombang ingin merambat lebih pelan pada senar yang massa per satuan panjangnya besar. Seperti diketahui, frekuensi gelombang tetap, yaitu, gelombang datang, gelombang refleksi, dan gelombang transmisi mempunyai frekuensi yang sama. Sehingga, gelombang-gelombang yang memiliki frekuensi sama tetapi merambat pada laju yang berbeda mempunyai panjang gelombang yang berbeda. Pada rumus umum gelombang,  $\lambda = v/f$ , dapat disimpulkan bahwa pada senar yang massa per satuan panjangnya besar, artinya laju gelombangnya kecil, panjang gelombangnya lebih pendek. Fenomena perubahan panjang gelombang saat gelombang itu merambat pada medium yang berbeda ini ditemui pada gelombang cahaya.

Dari penjelasan di atas bisa disimpulkan bahwa saat pulsa gelombang merambat dari medium  $A$  ke medium  $B$  dan  $v_A > v_B$  (artinya,  $\mu_B > \mu_A$ ) maka pulsa gelombang yang direfleksikan akan terbalik. Saat pulsa gelombang merambat dari medium  $A$  ke medium  $B$  dan  $v_A < v_B$  (artinya,  $\mu_B < \mu_A$ ) maka pulsa gelombang yang direfleksikan tidak terbalik.

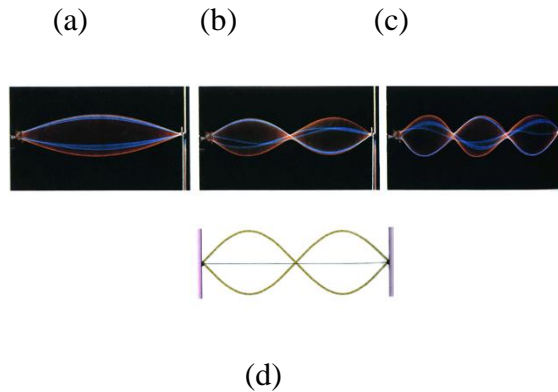
#### 4.4. Gelombang Berdiri pada Dawai

Kita telah membicarakan refleksi (pemantulan) pulsa gelombang pada dawai bila pulsa itu sampai di titik batas, baik ujung tetap maupun ujung bebas. Sekarang kita akan membicarakan apa yang terjadi apabila gelombang sinusoidal direfleksikan oleh ujung tetap dawai. Kita akan membahas persoalan ini dengan meninjau superposisi dari dua gelombang yang merambat sepanjang dawai: satu gelombang mengatakan gelombang datang dan gelombang yang lain menyatakan gelombang yang direfleksikan di ujung tetap.<sup>13</sup>

Gambar 4.7 menunjukkan seutas dawai yang ujung kirinya diikatkan pada penopang (ujung tetap). Ujung kanan dawai itu digerakkan naik-turun dengan gerak harmonik sederhana sehingga menghasilkan gelombang berjalan ke kiri. Selanjutnya, gelombang yang direfleksikan di ujung tetap itu merambat ke kanan. Apa yang terjadi apabila kedua gelombang itu bergabung? Pola gelombang yang dihasilkan apabila kedua gelombang itu bergabung ternyata tidak lagi seperti dua gelombang yang berjalan dengan arah berlawanan, tetapi dawai itu tampak seperti terbagi-bagi menjadi beberapa segmen, seperti tampak pada foto yang ditunjukkan pada Gambar 4.7(a), 4.7(b), dan 4.7(c). Gambar 4.7(d) menunjukkan bentuk sesaat dawai pada Gambar 4.7(b). Pada gelombang yang merambat sepanjang dawai, amplitudonya tetap dan pola gelombang merambat dengan laju yang sama dengan laju gelombang. Untuk gelombang yang disajikan pada Gambar 4.7, pola gelombang tetap dalam posisi yang sama sepanjang dawai dan amplitudonya berubah-ubah. Ada titik-titik tertentu yang sama sekali tidak bergerak (amplitudo sama dengan nol). Titik-titik ini dinamakan simpul dan ditandai dengan  $S$ , sedangkan di titik tengah di antara dua titik simpul terdapat titik perut dan ditandai dengan  $P$  (Gambar 4.7(d)). Di titik perut amplitudonya maksimum. Pada titik simpul terjadi interferensi destruktif, sedangkan pada titik perut terjadi interferensi konstruktif. Jarak antara dua titik simpul yang berurutan sama dengan jarak antara dua titik perut yang berurutan, yaitu  $\frac{1}{2}\lambda$ . Bentuk gelombang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 tidak bergerak sepanjang dawai, sehingga gelombang ini disebut gelombang berdiri (gelombang stasioner).

---

<sup>13</sup> Kadri, M., Tanjung, Y., dan Sudarma, T. 2016. Fisika Dasar 2. Harapan Cerdas. Medan.



**Gambar 4.7.** (a)-(c) Gelombang-gelombang berdiri pada dawai yang diregangkan. Dari (a) ke (c) frekuensi getaran di ujung kanan naik, sehingga panjang gelombang dari gelombang berdiri itu rendah. (d) Perbesaran gerak gelombang berdiri pada (b).

Kita bisa menurunkan fungsi gelombang berdiri melalui cara menjumlahkan fungsi gelombang  $y_1(x,t)$  dan  $y_2(x,t)$  yang memiliki amplitudo, periode, dan panjang gelombang yang sama yang merambat pada arah yang berlawanan. Fungsi gelombang  $y_1(x,t)$  dinyatakan untuk gelombang datang yang merambat ke kiri sepanjang sumbu- $x$  positif dan saat tiba di  $x = 0$  direfleksikan, sedangkan fungsi gelombang  $y_2(x,t)$  dinyatakan untuk gelombang yang direfleksikan yang merambat ke kanan dari  $x = 0$ . sebagai halnya telah dijelaskan sebelumnya, gelombang yang direfleksikan pada ujung tetap akan terbalik. Dengan demikian,

$$y_1(x,t) = A \sin(\omega t + kx) \quad \text{gelombang merambat ke kiri,}$$

$$y_2(x,t) = -A \sin(\omega t - kx) \quad \text{gelombang merambat ke kanan.}$$

Perhatikan bahwa perubahan tanda ini berpadanan dengan perubahan fase sebesar  $180^\circ$  atau  $\pi$  rad. Pada  $x = 0$  gerakan gelombang yang merambat ke kiri yaitu  $y_1(0,t) = A \sin \omega t$  dan gerak gelombang yang merambat ke kanan yaitu  $y_2(0,t) = -A \sin \omega t = A \sin(\omega t + \pi)$ . Fungsi gelombang berdiri adalah penjumlahan dari kedua fungsi gelombang di atas, adalah:

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = A[\sin(\omega t + kx) - \sin(\omega t - kx)]$$

Dengan memakai rumus trigonometri  $\sin A - \sin B = 2 \cos \frac{1}{2}(A+B) \sin \frac{1}{2}(A-B)$ , diperoleh

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = (2A \sin kx) \cos \omega t. \quad (4.6)$$

Persamaan (4.6) memiliki dua variabel bebas, yaitu  $x$  dan  $t$ . Ungkapan  $2A \sin kx$  menunjukkan bahwa pada setiap saat bentuk dawai itu merupakan fungsi sinus. Meskipun demikian, tidak seperti gelombang berjalan pada dawai, bentuk gelombang berdiri tetap pada posisi yang sama dan berosilasi turun-naik. Setiap titik pada dawai mengalami gerak harmonik sederhana, tetapi semua titik di antara dua titik simpul yang berurutan berosilasi sefase.

Persamaan (4.6) dapat digunakan untuk menentukan posisi titik simpul, yaitu titik-titik yang pergeserannya sama dengan nol. Hal ini terjadi ketika  $\sin kx = 0$  atau  $kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$ . Dengan mengingat  $k = 2\pi/\lambda$ , maka

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

atau

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$$

(kedudukan titik-titik simpul gelombang berdiri, dengan ujung tetap di  $x = 0$ )

Persamaan (4.6) bisa dipakai untuk menetapkan kedudukan titik perut, yaitu titik-titik yang mempunyai amplitudo maksimum (baik positif maupun negatif). Letak titik perut ditetapkan oleh  $\sin kx = \sin \frac{2\pi}{\lambda} x$  yang nilainya harus

maksimum. Nilai sinus sudut paling besar, baik positif maupun negatif, bernilai  $\pm 1$ . Dengan demikian, letak titik perut bisa ditetapkan sesuai persyaratan

$$\begin{aligned}\sin \frac{2\pi}{\lambda} x &= \pm 1 \\ \frac{2\pi}{\lambda} x &= \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \\ x &= \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots\end{aligned}\tag{4.8}$$

(kedudukan titik-titik perut gelombang berdiri, dengan ujung tetap di  $x = 0$ )

### Contoh Soal 4.3

Dua gelombang merambat berlawanan arah sepanjang dawai sehingga menghasilkan gelombang berdiri. Gelombang-gelombang itu berturut-turut dinyatakan dengan persamaan  $y_1(x, t) = 4 \sin(3x - 2t)$  cm dan  $y_2(x, t) = 4 \sin(3x + 2t)$  cm, dengan  $x$  dan  $y$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon. (a) Hitunglah pergeseran maksimum gerakan gelombang berdiri itu pada  $x = 2,3$  cm. (b) Tentukan posisi perut dan simpul.

### Penyelesaian

a. Jika dua gelombang itu dijumlahkan, diperoleh gelombang berdiri yang fungsinya diberikan oleh Persamaan (2-6), dengan  $A = 4$  cm,  $k = 3$  rad/s, dan  $\omega = 2$  rad/s:

$$y(x, t) = (2A \sin kx) \cos \omega t = (8 \sin 3x) \cos 2t \text{ cm.}$$

Dengan demikian, pergeseran maksimum pada  $x = 2,3$  cm adalah

$$y_{\text{maks}} = 8 \sin 3x \Big|_{x=2,3 \text{ cm}} = 8 \sin(6,9 \text{ rad}) = 4,63 \text{ cm.}$$

b. Dengan mengingat  $k = 3 \text{ rad/s}$ , diperoleh  $\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi \text{ rad}}{3 \text{ rad/cm}} = \frac{2\pi}{3} \text{ cm}$ .

Untuk menentukan posisi simpul digunakan Persamaan (2-7):

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots = 0, \frac{\pi}{3} \text{ cm}, \frac{2\pi}{3} \text{ cm}, \frac{3\pi}{3} \text{ cm}, \dots$$

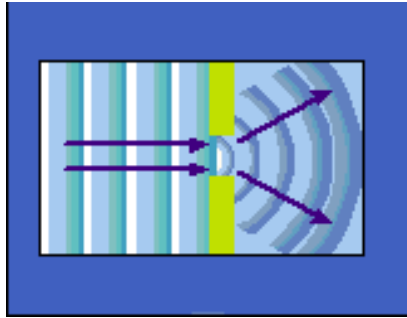
Untuk menentukan posisi perut digunakan Persamaan (4.8):

$$x = 0, \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots = \frac{\pi}{6} \text{ cm}, \frac{3\pi}{6} \text{ cm}, \frac{5\pi}{6} \text{ cm}, \dots$$

#### 4.5. Difraksi Gelombang

Kita mampu mendengar bunyi yang berasal dari balik dinding ataupun dari balik bukit, walaupun tidak ada benda-benda di sekeliling kita yang bisa memantulkan gelombang bunyi. Saat kita sedang mengikuti pelajaran di dalam kelas, kita selalu mendengar suara guru yang sedang mengajar di kelas lain. Ini terjadi karena adanya peristiwa biasa, sehingga tidak pernah diperhatikan. Pada pelajaran fisika, kejadian ini adalah termasuk pembelokan energi yang dibawa oleh gelombang dan dikenal sebagai peristiwa difraksi. Saat ini kita akan membahas kejadian difraksi secara kualitatif.

Agar menguasai peristiwa difraksi, kita akan melihat gelombang air. Gambar 2.10 memperlihatkan pola gelombang lurus pada permukaan air yang datang pada celah sempit. Lebar celah itu dibuat lebih kecil daripada panjang gelombangnya. Lihat bahwa gelombang yang keluar dari celah tidak lagi berupa gelombang lurus, melainkan gelombang melingkar yang tersebar ke segala arah. Ingat, seperti dapat dilihat dengan tangki gelombang, terdapat dua pola gelombang air, yaitu gelombang lurus dan gelombang lingkaran. Jadi, gelombang yang datang pada celah sudah dibelokkan.



**Gambar 4.8** Jika pola gelombang lurus datang pada celah, gelombang yang ke luar dari celah membentuk pola gelombang lingkaran.

Apa yang terjadi apabila pola gelombang lurus datang pada celah yang lebarnya berlainan? Hasil praktikum memperlihatkan bahwa apabila celahnya semakin mengecil, maka gelombang yang keluar dari celah semakin jelas. Apabila celah sangat kecil sehingga lebar celah sama dengan panjang gelombang, maka gelombang lingkaran yang terpusat pada celah akan menyebar ke segala arah.

Peristiwa difraksi gelombang bisa disampaikan dengan menggunakan konsep Huygens mengenai perambatan gelombang. Menurut Huygens, setiap titik pada permukaan gelombang bisa dianggap sebagai sumber gelombang yang berbentuk lingkaran. Gelombang lingkaran yang asalnya dari titik-titik di permukaan gelombang ini disebut sebagai gelombang sekunder. Garis singgung pada permukaan gelombang sekunder ini bisa memberikan muka gelombang baru. Semakin lebar celah, maka muka gelombang yang keluar dari celah semakin hampir sama dengan garis lurus sehingga sinar-sinar gelombang yang arahnya tegak lurus dengan muka gelombang ini sedikit mengalami pembelokan. Akan tetapi, apabila celahnya semakin mengecil maka muka gelombang yang merupakan garis singgung gelombang sekunder yang berasal dari celah mulai menyinggung dari garis lurus sehingga sinar-sinar gelombang yang ditunjukkan arah penjalaran gelombang akan mengalami pembelokan yang lebih besar. Jadi, apabila celahnya semakin kecil pembelokannya akan semakin luas.



Gelombang bunyi mempunyai panjang gelombang dalam orde meter, sehingga biasanya selalu mengalami difraksi. Kenapa hal itu terjadi? Beberapa penghalang contohnya seperti pintu dan jendela mempunyai ukuran dalam orde panjang gelombang bunyi. Sebaliknya, peristiwa difraksi cahaya jarang ditemui pada kehidupan sehari ditemui selalu lebih besar daripada orde ini.

#### 4.6. Polarisasi Gelombang

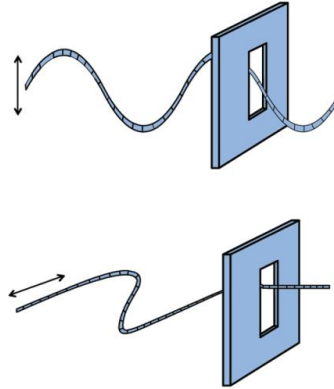
Gejala interferensi dan difraksi bisa terjadi pada semua jenis gelombang, baik itu gelombang transversal ataupun gelombang longitudinal. Akan tetapi, gejala polarisasi dapat dijumpai pada gelombang transversal.



**Gambar 4.9.** Gelombang transversal pada tali terpolarisasi linear (a) pada bidang vertikal (b) pada bidang horisontal.

Agar dapat menguasai konsep dasar polarisasi, kita ingin membahas lagi gelombang transversal pada tali. Seutas tali bisa digetarkan pada bidang vertikal seperti pada Gambar 4.9(a) atau pada bidang horisontal seperti pada Gambar 4.9(b). Gelombang-gelombang yang bergetar dalam bidang vertikal atau horisontal ini disebutkan terpolarisasi linear. maksudnya, getaran bisa terjadi pada bidang tertentu. Apabila ditempatkan pemisah berupa celah vertikal pada arah penjalaran gelombang, yang dijelaskan pada Gambar 4.10, gelombang yang terpolarisasi vertikal bisa melewati celah ini. Akan tetapi, gelombang yang terpolarisasi secara horisontal tidak mampu melewati celah ini. Sebaliknya, apabila diletakkan celah horisontal, gelombang yang terpolarisasi vertikal tidak mampu melewatinya. Apabila horisontal dan vertikal dipakai secara bersama-sama, kedua gelombang terpolarisasi ini akan terhenti. Perlu dijelaskan lagi bahwa *polarisasi* hanya bisa terjadi pada gelombang transversal dan tidak bisa terjadi pada gelombang longitudinal. Sebagaimana telah dijelaskan di depan, pada gelombang

longitudinal gerakan partikel-partikel medium satu arah terhadap penjalaran gelombang sehingga keberadaan celah tidak bisa memberhentikan gerak gelombang.

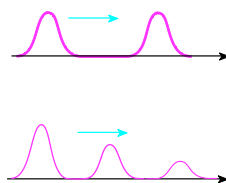


**Gambar 4.10.** Gelombang yang terpolarisasi vertikal mampu melewati celah vertikal, tapi gelombang longitudinal yang terpolarisasi horizontal belum mampu melewatinya.

#### 4.7. Dispersi

Jika gelombang merambat pada medium di mana laju gelombang dalam medium itu tidak bergantung pada frekuensi atau panjang gelombang, maka medium itu dinamakan medium tak dispersif dan gelombangnya dinamakan gelombang tak dispersif. Sebaliknya, dalam medium dispersif laju gelombang bergantung pada frekuensi atau panjang gelombang dan gelombangnya dinamakan gelombang dispersif. Pada gelombang dispersif, hubungan antara  $\omega$  dan  $k$  tidak linear. Contoh gelombang dispersif adalah gelombang elektromagnetik yang merambat dalam plasma dan gelombang pada permukaan air.

Gelombang yang merambat dalam medium tak dispersif berentuknya selalu tetap. Jika pulsa gelombang merambat dalam medium tak dispersif, pulsa itu merambat tanpa terjadi perubahan bentuk (Gambar 4.10(a)). Jika pulsa gelombang merambat dalam medium dispersif, bentuk pulsa akan mengalami perubahan (Gambar 4.10(b)). Selama pulsa itu bergerak, lebar pulsa semakin bertambah sehingga pada akhirnya pulsa itu lenyap.

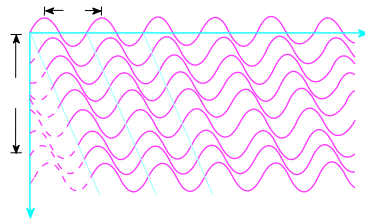


**Gambar 4.11.** Perambatan pulsa dalam medium tak dispersif dan medium dispersif. (a)

Dalam medium tak dispersif, perambatan pulsa tidak mengalami perubahan bentuk. (b) Dalam medium dispersif, lebar pulsa semakin bertambah dan akhirnya pulsa itu lenyap

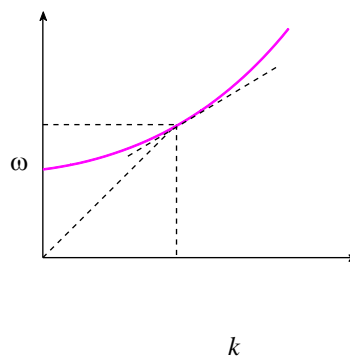
Sekarang kita akan membicarakan persamaan gelombang sinusoidal, yaitu  $y(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$ . Titik-titik yang mempunyai fase sama, yaitu  $\phi = kx - \omega t = \text{konstan}$ , membentuk garis lurus pada bidang  $x-t$  (Gambar 4.11). Gradien garis ini menunjukkan laju perambatan gelombang, yaitu

$$\frac{\omega}{k} = v_{\text{ph}} \quad (4.9)$$



**Gambar 4.12.** Perambatan gelombang sinusoida pada bidang  $x-t$ .

Laju perambatan gelombang yang didefinisikan dengan memakai Persamaan (4.9) disebut kecepatan fase  $v_{\text{phase}}$ , sebab titik-titik yang memiliki fase sama merambat dengan kecepatan ini. Dalam diagram  $\omega-k$ , kecepatan fase merupakan gradien garis yang menghubungkan titik  $O$  dan titik tertentu pada kurva yang menjelaskan hubungan antara  $\omega$  dan  $k$ , atau  $\omega(k)$  (Gambar 4.13).



**Gambar 4.13.** Pada gelombang dispersif, kecepatan kelompok  $d\omega/dk$  berbeda dengan kecepatan fase  $\omega/k$ .

Kecepatan perambatan yang didefinisikan oleh gradien garis singgung di titik tertentu pada kurva, yaitu  $d\omega/dk$ , disebut kecepatan kelompok atau kecepatan grup  $v_g$  yang besarnya dapat berbeda dengan kecepatan fase. Untuk gelombang tak dispersif, berlaku  $\omega = v_{\text{ph}}k = \text{konstan}$ . Dengan demikian,

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = v_{ph}. \quad (4.10)$$

Artinya, untuk gelombang tak dispersif kecepatan fase sama dengan kecepatan kelompok.  
Dengan demikian, untuk gelombang tak dispersif, berlaku

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{\omega}{k} = \text{konstan}. \quad (4.11)$$

Sebaliknya, untuk gelombang dispersif berlaku

$$\frac{d\omega}{dk} \neq \frac{\omega}{k}. \quad (4.12)$$

## LATIHAN SOAL

1. Dua gelombang sinusoidal masing-masing dinyatakan dengan persamaan  $y_1(x, t) = 5 \sin \pi(4x - 1.200t)$  dan  $y_2(x, t) = 5 \sin \pi(4x - 1.200t - 0,25)$ , dengan  $x$ ,  $y_1$ , dan  $y_2$  dalam cm dan  $t$  dalam sekon.
  - a. Berapakah amplitudo resultan gelombang-gelombang itu?
  - b. Berapakah frekuensi gelombang resultannya?
2. Dua gelombang merambat berlawanan arah sepanjang tali sehingga menghasilkan gelombang berdiri. Gelombang-gelombang itu dinyatakan dengan persamaan  $y_1(x, t) = 3 \sin \pi(x + 0,6t)$  dan  $y_2(x, t) = 3 \sin \pi(x - 0,6t)$ , dimana  $x$ ,  $y_1$ , dan  $y_2$  dalam cm dan  $t$  dalam detik. Tetapkan pergeseran maksimum gerakannya pada:
  - a.  $x = 0,25$  cm
  - b.  $x = 0,50$  cm
  - c.  $x = 1,50$  cm
  - d. Tentukan tiga nilai terkecil  $x$  yang bersesuaian dengan posisi titik-titik perut.
3. Gelombang berdiri dibentuk oleh dua gelombang berjalan yang merambat dalam arah berlawanan. Jika kedua gelombang itu masing-masing memiliki amplitudo  $A = \pi$  cm, bilangan gelombang  $k = \pi/2$  rad/cm, dan frekuensi sudut  $\omega = 10$  rad/s, hitunglah:
  - a. Jarak antara dua titik perut yang berurutan
  - b. Amplitudo gelombang berdiri itu pada  $x = 0,25$  cm.

## BAB V GELOMBANG BUNYI

### 5.1. Gelombang Bunyi

Gelombang bunyi adalah salah satu contoh gelombang longitudinal yang dapat merambat pada suatu medium seperti zat padat, zat cair dan gas. Tetapi bab V ini akan membahas mengenai tentang gelombang bunyi pada udara (gas).

Contoh gelombang bunyi yang paling sederhana adalah gelombang sinusoidal yang mempunyai besaran frekuensi, amplitudo dan panjang gelombang. Telinga manusia memiliki frekuensi jangkauan sebesar 20 Hz-20.000 Hz sehingga sangat sensitif terhadap gelombang bunyi. Frekuensi jangkauan yang dapat didengar disebut dengan *audible range*. Gelombang bunyi dengan frekuensi di atas 20.000 Hz disebut dengan gelombang ultrasonik, sedangkan gelombang bunyi dengan frekuensi dibawah 20 Hz disebut dengan gelombang infrasonik.<sup>14</sup>

Pada bab V ini kita akan membahas tentang gelombang bunyi pada sinusoidal yang dapat merambat ke arag sumbu  $x$  positif. Persamaan gelombang sinusoidal dapat ditulis:

$$y(x,t) = A \sin(\omega t - kx) \quad (5.1)$$

Defenisi gelombang bunyi dapat dijelaskan sebagai perubahan tekanan pada berbagai titik. Pada gelombang sinusoidal di udara, tekanannya tidak sama artinya tekanannya bisa di atas atmosfer  $p_a$  ataupun di bawah atmosfer.

Jika  $p(x,t)$  memperlihatkan perubahan tekanan pada titik  $x$  pada saat  $t$  yaitu,  $p(x,t)$  memperlihatkan adanya perbedaan tekanan pada titik tersebut melalui tekanan atmosfer  $p_a$ . Terdapat hubungan antara tekanan  $p(x,t)$  dan modulus bulk udara  $B$ , yaitu

$$p(x,t) = -B \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \quad (5.2)$$

---

<sup>14</sup> Kadri, M., Tanjung, Y., dan Sudarma, T. 2016. Fisika Dasar 2. Harapan Cerdas. Medan.

Tanda (-) memperlihatkan bahwa perubahan volume disebabkan karena tekanannya mengalami penurunan. Dengan menggunakan Persamaan (5.1), diperoleh

$$p(x,t) = BkA \cos(\omega t - kx) \quad (5.3)$$

Kuantitas  $BkA$  pada Persamaan (5.3) memperlihatkan perubahan tekanan yang terbesar yang disimbolkan dengan  $p_{\text{maks}}$ . Jadi,

$$p_{\text{maks}} = BkA \quad (5.4)$$

Persamaan (5.4) memperlihatkan bahwa besar amplitudo tekanan  $p_{\text{maks}}$  sebanding dengan amplitudo pergeseran  $A$ . Amplitudo tekanan bergantung pada panjang gelombang, sebab  $k = 2\pi/\lambda$ .

### Contoh Soal 5.1

Persamaan gelombang bunyi di udara adalah  $p(x,t) = 0,75 \cos \frac{1}{2} \pi (340 - x)$  dimana satuan  $p$  adalah pascal, satuan  $x$  adalah meter, dan satuan  $t$  adalah sekon. Hitunglah:

- Amplitudo tekanan
- Panjang gelombang
- frekuensi
- laju gelombang

### Penyelesaian

Dengan menggunakan persamaan  $p(x,t) = 0,75 \cos \frac{1}{2} \pi (340 - x)$  diperoleh

a. Amplitudo tekanan  $p_{\text{maks}} = 0,75$  Pascal

b.  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{1}{2} \pi$ , panjang gelombang  $\lambda = 4$  m,

c.  $\omega = 2\pi f = 170\pi$ , frekuensi  $f = 85$  Hz

d. laju gelombang  $v = f\lambda = (85 \text{ Hz})(4 \text{ m}) = 340 \text{ m/s}$ .

## 5.2. Getaran Senar

Alat musik gitar, piano dan biola adalah contoh dari senar dengan panjang  $L$  dimana kedua ujungnya diikat pada penumpu (konstan). Pada saat senar pada gitar dipetik, maka akan menghasilkan gelombang pada senar gitar tersebut. Gelombang tersebut akan dipantulkan pada kedua ujung yang diam sehingga getaran senar termasuk gelombang berdiri.

Sebuah senar yang kedua ujungnya diikat pada penumpu (konstan), maka akan menghasilkan titik simpul pada kedua ujung senar yang bernilai  $\lambda/2$  sehingga berlaku persamaan:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.5)$$

Artinya adalah apabila senar yang panjangnya  $L$  yang kedua ujungnya diikat pada penumpu, maka gelombang berdiri hanya bisa terjadi apabila panjang gelombang yang dapat dilihat pada persamaan 5.5.

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.6)$$

Pada panjang gelombang  $\lambda_n$  terdapat frekuensi  $f_n$ , sesuai dengan persamaan umum gelombang  $f_n = v/\lambda_n$ . Frekuensi paling kecil terjadi apabila panjang gelombangnya paling besar. Ini terjadi pada saat  $n = 1$ , yaitu  $\lambda_1 = 2L$ . Sehingga,

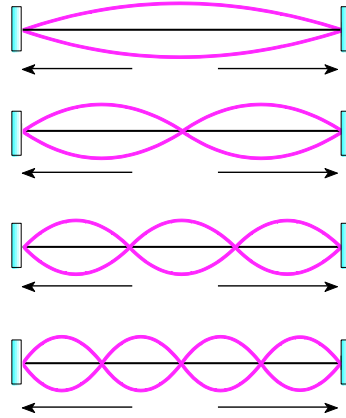
$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (5.7)$$

Besaran  $f_1$  dikenal sebagai frekuensi dasar. Frekuensi gelombang berdiri yang lain yaitu  $f_2 = 2v/2L$ ,  $f_3 = 3v/2L$ , dan selanjutnya. Perhatikan bahwa  $f_2 = 2f_1$ ,  $f_3 = 3f_1$ , dan seterusnya. Secara umum,

$$f_n = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.8)$$



Frekuensi  $f_n$  disebut harmonik sedangkan deretan frekuensi  $n=1,2,3,\dots$  dst disebut deret harmonik. Dimana  $f_2$  disebut harmonik kedua atau nada atas pertama dan begitu seterusnya. Dimana harmonik pertama = nada dasar.



**Gambar 5.1** Posisi simpul dan perut gelombang pada senar saat kedua ujungnya diikat.

Gambar 5.1(a) menunjukkan bahwa pada frekuensi dasar terdapat 2 simpul dan 1 perut. Harmonik kedua (nada atas pertama) terdapat 3 simpul dan 2 perut (Gambar 5.1(b)), harmonik ketiga (nada atas kedua) terdapat 4 simpul dan 3 perut (Gambar 5.1(c)), dan seterusnya.

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (5.9)$$

Persamaan (5.9) menunjukkan bahwa frekuensi  $f$  berbanding terbalik dengan panjang dawai  $L$ . Hal ini ditunjukkan pada piano atau biola di mana bagian bass (memiliki frekuensi rendah) memiliki dawai yang lebih panjang daripada bagian trebel (memiliki frekuensi tinggi).

### Contoh Soal 5.2

Panjang senar pada biola adalah 5 m berada di antara 2 titik. Massa per satuan panjang pada salah satu senar adalah 40 g/m dan frekuensi dasar 20 Hz. Tentukanlah:

- Tegangan tali senar
- Frekuensi dan panjang gelombang senar pada nada atas kedua

### Penyelesaian

- Diketahui

$$L = 5 \text{ m}$$

$$\mu = 40 \text{ g/m} = 40 \times 10^{-3} \text{ kg/m,}$$

$$f_1 = 20 \text{ Hz.}$$

Penyelesaian

$$F = 4\mu L^2 f_1^2 = 4(40 \times 10^{-3} \text{ kg/m})(5 \text{ m})^2 (20 \text{ Hz})^2 = 1.600 \text{ N}$$

- Nada atas kedua yaitu  $n = 3$ . Jadi, frekuensinya yaitu  $f_3 = 3f_1 = 3(20 \text{ Hz}) = 60 \text{ Hz}$ . Panjang gelombang untuk nada atas kedua adalah

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3} = \frac{2(5 \text{ m})}{3} = 3,3 \text{ m}$$

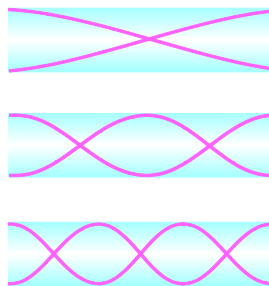
### 5.3. Pipa Organa

Pipa organa adalah salah satu contoh alat musik tiup yang paling sederhana. Pada saat pipa organa ditiup, peniup pipa organa memasukkan udara ke mulut pipa organa, akibatnya udara di dalamnya bergetar sehingga pada mulut pipa organa terdapat udara yang bergerak bebas. Kemudian pola gelombang yang terbentuk dalam pipa organa tergantung pada jenis pipa organanya. Jenis pipa organa terbagi atas 2 yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.

#### Pipa Organa Terbuka

Pipa organa terbuka adalah pipa organa yang terbuka pada kedua ujungnya yang dinamakan dengan titik perut. Pola gelombang berdiri pada frekuensi dasar pipa organa terbuka yaitu terdapat titik-titik perut pada kedua ujungnya dan terdapat 1 buah simpul ditengah-tengahnya. Frekuensi dasar pipa organa terbuka terdiri dari 2 perut dan 1 simpul. Jarak antara dua titik perut sama dengan  $\frac{1}{2}\lambda$  Jarak ini sama dengan panjang pipa, yaitu  $L$ . Dengan demikian,  $L = \frac{1}{2}\lambda$  atau  $\lambda = 2L$ . Persamaan umum gelombang,  $f = v/\lambda$ , diperoleh

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (5.10)$$



**Gambar 5.2.** Pipa organa terbuka. (a) Pola harmonik nada dasar. (b) Pola nada atas pertama. (c) Pola nada atas kedua.

Gambar 5.2b dan Gambar 5.2c menunjukkan pola harmonik kedua dan harmonik ketiga (nada atas pertama dan nada atas kedua) sebuah pipa organa terbuka. Pada harmonik kedua terdapat 3 perut dan 2 simpul, sedangkan pada harmonik ketiga terdapat 4 perut dan 3 simpul.

Pada harmonik kedua,  $L = 2\left(\frac{1}{2}\lambda\right) = \lambda$  Jadi,

$$f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{L} = 2f_1$$

Pada harmonik ketiga,  $L = 3\left(\frac{1}{2}\lambda\right) = 3\lambda/2$  atau  $\lambda = 2L/3$  Jadi,

$$f_3 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{2}{3}L} = \frac{3v}{2L} = 3f_1$$

Persamaan nada harmonik pipa organa terbuka panjang pipa  $L$

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} \text{ atau } \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n=1, 2, 3, \dots). \quad (5.11)$$

Oleh sebab itu, setiap frekuensi nada harmonik pipa organa terbuka selalu memenuhi persamaan

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L/n} = n\frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n=1, 2, 3, \dots). \quad (5.12)$$

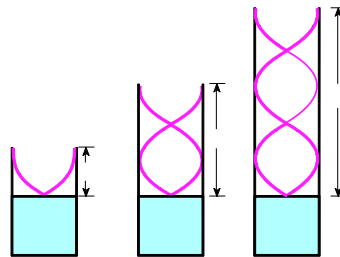
Nilai  $n=1$  berpadanan terhadap frekuensi dasar  $f_1$  dan  $n=2$  berpadanan terhadap frekuensi nada atas pertama (harmonik kedua), dan selanjutnya.

### Pipa Organa Tertutup

Pipa organa tertutup adalah pipa organa yang salah satu ujungnya di tutup. Pada gambar 5.3 dijelaskan bahwa penampang pada pipa organa tertutup di bagian ujung bawahnya sedangkan pipa organa terbuka di bagian ujung atas. Pada saat pipa organa tertutup ditiup maka bagian ujung yang terbuka merupakan titik perut sedangkan bagian ujung yang tertutup merupakan titik simpul. Jarak antara titik perut dengan titik simpul yang berdekatan adalah  $\frac{1}{4}$  panjang gelombang, persamaannya dapat ditulis:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L} \quad (5.13)$$

Jika persamaan (5.13) dibandingkan dengan persamaan (5.10) maka besar frekuensi dasar pipa organa tertutup sama dengan  $\frac{1}{2}$  frekuensi dasar pipa organa terbuka yang memiliki panjang yang sama.<sup>15</sup>



**Gambar 5.3.** (a) pola harmonik pertama pada penampang pipa organa tertutup harmonik kedua, dan (b) pola harmonik ketiga.

Gambar 5.3b menunjukkan pola harmonik kedua, dengan panjang pipa  $L = 3\lambda/4$  atau  $\lambda = 4L/3$ . Pola harmonik ini memiliki frekuensi  $f_3$ , yaitu:

$$f_3 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L/3} = 3 \frac{v}{4L} = 3f_1.$$

Gambar 5.3c menunjukkan pola harmonik ketiga, dengan panjang pipa  $L = 5\lambda/4$  atau  $\lambda = 4L/5$ . Pola harmonik ini memiliki frekuensi  $f_5$ , yaitu:

$$f_5 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L/5} = 5 \frac{v}{4L} = 5f_1.$$

<sup>15</sup> Young, H.D. and Freedman, Roger A. 2000. *University Physics* (Tenth Edition). New York: Addison Wesley Longman, Inc.

Secara umum, persamaan panjang gelombang pada pipa organa tertutup adalah:

$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \text{ atau } \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.14)$$

Persamaan frekuensi pada pipa organa tertutup adalah:

$$f_n = n \frac{v}{4L} = n f_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.15)$$

### Contoh Soal 5.3

Pipa organa yang panjangnya 26 cm dan memiliki laju gelombang bunyi di udara sebesar 345 m/s. Tentukanlah:

- Frekuensi dasar dan tiga nada harmonik pertama pada pipa organa terbuka
- Frekuensi dasar dan tiga nada harmonik pertama pada pipa organa tertutup

#### Penyelesaian

- Untuk pipa organa terbuka, maka diperoleh nilai frekuensi dasar:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{345 \text{ m/s}}{2(0,26 \text{ m})} = 663 \text{ Hz.}$$

Oleh sebab itu, tiga nada harmonik yang pertama yaitu  $f_2 = 2f_1 = 1.326 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 3f_1 = 1.989 \text{ Hz}$ , dan  $f_4 = 4f_1 = 2.326 \text{ Hz}$ .

- Untuk pipa organa tertutup, maka diketahui frekuensi dasar:

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{345 \text{ m/s}}{4(0,26 \text{ m})} = 332 \text{ Hz.}$$

Dalam pipa organa tertutup hanya harmonik ganjil yang terlihat. Oleh sebab itu, tiga nada harmonik yang pertama yaitu bernilai  $f_3 = 3f_1 = 996 \text{ Hz}$ ,  $f_5 = 5f_1 = 1.660 \text{ Hz}$ ,  $f_7 = 7f_1 = 2.324 \text{ Hz}$ .

#### 5.4. Intensitas Bunyi

Gelombang bunyi dapat merambat dan energinya dapat berpindah dari suatu tempat ke suatu tempat yang lain yang disebut dengan intensitas bunyi  $I$  dengan persamaan

$$I = \frac{P_{maks}^2}{2\rho v} = \frac{P_{maks}^2}{2\sqrt{\rho B}} \quad (5.16)$$

#### Contoh Soal 5.4

Frekuensi terendah yang dapat ditangkap oleh telinga manusia adalah 1.000 Hz dengan taraf intensitas  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Sedangkan taraf intensitas bunyi yang paling kuat adalah  $1 \text{ W/m}^2$ . Apabila massa jenis udara  $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$  dan laju gelombang bunyi adalah 344 m/s. Maka hitunglah:

- Amplitudo tekanan
- Amplitudo pergeserannya

#### Penyelesaian

Kita akan membahas intensitas  $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

- Dengan memakai Persamaan (5.19), didapat

$$P_{maks} = \sqrt{2\rho v I} = \sqrt{(2)(1,20 \text{ kg/m}^3)(344 \text{ m/s})(10^{-12} \text{ W/m}^2)} = 2,9 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2.$$

- Dengan mengingat  $v = \sqrt{B/\rho}$  atau  $B = \rho v^2$  dan  $k = \omega/v = 2\pi f/v$ , melalui persamaan (5.4) ditulis menjadi:

$$P_{maks} = BkA = \rho v^2 (2\pi f/v)A = 2\pi f \rho v A,$$

$$A = \frac{P_{maks}}{2\pi f \rho v}.$$

Dengan demikian, untuk frekuensi 1.000 Hz diberikan nilai amplitudo pergeseran sebesar

$$A = \frac{P_{maks}}{2\pi f \rho v} = \frac{2,9 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2}{2\pi (1.000 \text{ Hz})(1,20 \text{ kg/m}^3)(344 \text{ m/s})} = 1,1 \times 10^{-11} \text{ m}.$$

Apabila sumber bunyi mampu dilihat sebagai sebuah titik, intensitas bunyi pada jarak  $r$  dari sumber bunyi berbanding terbalik dengan  $r^2$ . Konsep ini sesuai dengan konsep hukum kekekalan energi yaitu apabila daya yang keluar dari sumber bunyi adalah  $P$ , maka intensitas  $I_1$  pada bola yang memiliki jari-jari  $r_1$  dan luas penampang  $\pi r_1^2$  yaitu

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}$$

Untuk menentukan besar intensitas  $I_2$  pada bola dengan jari-jari  $r_2$  dan luas penampang  $\pi r_2^2$  yaitu

$$I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$$

Secara umum, apabila sumber bunyi mengeluarkan bunyi dengan daya  $P$ , maka besarnya intensitas  $I$  pada jarak  $r$  dari sumber bunyi itu adalah

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (5.17)$$

Apabila tidak ada energi yang hilang pada kedua bola yang berjari-jari  $r_1$  dan  $r_2$ , maka daya  $P$  harus sama. Oleh sebab itu,

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

atau

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (5.21)$$

Mengingat telinga manusia sensitif dengan jangkauan intensitas yang sangat luas, maka intensitas bunyi sering dipakai pada skala logaritmik. Taraf intensitas bunyi, dengan simbol  $\beta$ , diartikan sebagai

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (5.22)$$



Dimana  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  disebut intensitas ambang artinya batas ambang pendengaran manusia berada pada frekuensi 1.000 Hz. Satuan taraf intensitas bunyi adalah dB.

Gelombang bunyi dengan intensitas  $I = I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  mempunyai taraf intensitas  $\beta = 0$  Sedangkan, gelombang bunyi pada intensitas  $I = 1 \text{ W/m}^2$  mempunyai taraf intensitas  $\beta = 120 \text{ dB}$

### Contoh Soal 5.5

Besar taraf intensitas bunyi pada pesawat jet yang terbang dengan ketinggian 20 m yaitu 140 dB. Tentukanlah taraf intensitasnya jika berada pada ketinggian 200 m?

### Penyelesaian

Besar  $I_1$  dengan ketinggian  $r_1 = 20 \text{ m}$  dapat ditentukan dengan persamaan (5.22),

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

$$140 = 10 \log \frac{I_1}{10^{-12} \text{ W/m}^2}$$

$$I_1 = 100 \text{ W/m}^2$$

Besar intensitas  $I_2$  dengan ketinggian  $r_2 = 200 \text{ m}$  dapat ditentukan dengan persamaan (5.21),

$$I_2 = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 I_1 = \left( \frac{20 \text{ m}}{200 \text{ m}} \right)^2 (100 \text{ W/m}^2) = 1 \text{ W/m}^2$$

Sehingga besar taraf intensitas bunyi dengan ketinggian  $r_2 = 200 \text{ m}$  yaitu

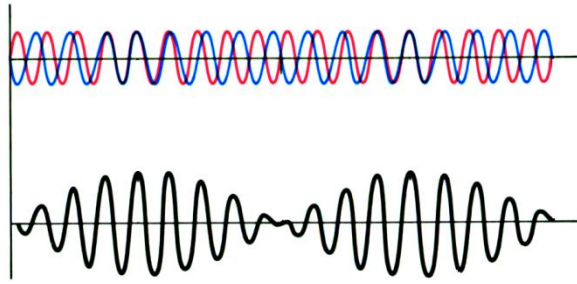
$$\beta = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 120 \text{ dB}.$$

### 5.5. Layangan Bunyi

Telah kita bahas topik interferensi dua gelombang dengan frekuensi yang sama. Sekarang kita akan membahas interferensi dua gelombang bunyi yang mempunyai amplitudo yang sama, tetapi frekuensinya agak berbeda. Kejadian ini dapat terjadi pada dua buah garpu tala yang memiliki frekuensi kecil berbeda dibunyikan bersama-sama.

Saat dua gelombang berinterferensi, lihat sebuah titik pada medium tersebut. Pergeseran setiap gelombang di titik itu bisa digambarkan sebagai fungsi waktu (Gambar 5.4a). Panjang total sumbu waktu dinyatakan dalam 1 s, sedangkan frekuensi masing-masing gelombang berturut-turut 16 Hz (ditandai dengan grafik warna biru) dan 18 Hz (ditandai dengan grafik warna merah). Berdasarkan prinsip superposisi, kita memperbanyak kedua pergeseran pada setiap saat untuk menetapkan pergeseran keseluruhan ketika saat itu. Hasil superposisi diperlihatkan pada Gambar 5.4b. Ketika  $t = 0,25$  s dan  $t = 0,75$  s, kedua gelombang satu fase. Maksudnya adalah amplitudo yang dihasilkan adalah maksimum. Tetapi apabila besar frekuensi berbeda maka kedua gelombang tidak dapat sefase untuk setiap waktu. Contohnya adalah  $t = 0,50$  s, kedua gelombang akan berlawanan fase. maksudnya, kedua gelombang itu saling menghilangkan sehingga amplitudo keseluruhannya sama dengan nol. Gelombang penjumlahan pada Gambar 5.4b terlihat seperti sebuah gelombang sinusoidal tunggal yang amplitudonya tidak tetap dari maksimum ke nol dan kembali ke maksimum lagi.

Berdasarkan penjabaran di atas, dalam waktu 1 s amplitudo penjumlahan mempunyai dua maksimum dan dua minimum sehingga frekuensi perubahan amplitudo ini yaitu 2 Hz. Perubahan amplitudo ini mengakibatkan perubahan kemerduan yang disebut layangan dan frekuensi di mana kemerduan tersebut berubah yang disebut dengan frekuensi layangan. Frekuensi layangan sama dengan selisih kedua frekuensi gelombang yang berinterferensi.



**Gambar 5.4.** (a) Dua gelombang pada frekuensi 16 Hz (ditandai warna biru) dan 18 Hz (ditandai warna merah). (b) Superposisi dua gelombang dengan frekuensi 16 Hz dan 18 Hz memperoleh frekuensi layangan 2 Hz.<sup>16</sup>

Kita ingin menunjukkan bahwa frekuensi layangan sama dengan selisih antara frekuensi  $f_a$  dan  $f_b$ . Jika  $f_a > f_b$  atau  $T_a < T_b$ , dimana  $T_a$  dan  $T_b$  memperlihatkan besar periode terhadap frekuensi  $f_a$  dan  $f_b$ . Apabila kedua gelombang sefase pada saat  $t = 0$ , maka kedua gelombang akan mengalami sefase jika gelombang pertama bergerak melewati gelombang kedua. Hal ini terjadi untuk nilai  $t$  yang sama terhadap  $T_{\text{layangan}}$ . Apabila  $n$  memperlihatkan jumlah siklus gelombang pertama pada waktu  $T_{\text{layangan}}$ , jumlah siklus gelombang kedua pada waktu  $T_{\text{layangan}}$  adalah  $(n - 1)$ . sehingga:

$$T_{\text{layangan}} = nT_a \text{ dan } T_{\text{layangan}} = (n - 1)T_b.$$

Dari kedua persamaan ini didapat,

$$T_{\text{layangan}} = \frac{T_a T_b}{T_b - T_a}.$$

Tetapi,  $f = 1/T$  sehingga

$$f_{\text{layangan}} = \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b},$$

$$f_{\text{layangan}} = f_a - f_b. \quad (5.23)$$

<sup>16</sup> Kadri, M., Tanjung, Y., dan Sudarma, T. 2016. Fisika Dasar 2. Harapan Cerdas. Medan

Seperti telah dijelaskan di atas, frekuensi layangan sama dengan selisih antara kedua frekuensi gelombang yang berinterferensi. Frekuensi layangan selalu bernilai positif, sehingga  $f_a$  pada Persamaan (5.23) selalu memperlihatkan frekuensi yang lebih besar.

## 5.6. Efek Doppler

Jika satu buah mobil bergerak menuju Anda sambil membunyikan klakson, Anda akan mendengar frekuensi bunyi klakson yang semakin besar. Kebalikannya, apabila mobil tersebut bergerak membelakangi Anda, Anda akan mendengar frekuensi bunyi klakson yang semakin kecil. Kejadian ini pertama sekali disampaikan oleh ilmuwan berkebangsaan Austria Christian Doppler pada abad pertengahan, sehingga dinamakan efek Doppler. Secara umum, apabila sumber bunyi dan pendengar bergerak relatif satu sama lain, maka frekuensi bunyi yang didengar oleh pendengar berbeda terhadap frekuensi sumber bunyi.

Untuk menelaah efek Doppler pada gelombang bunyi, kita ingin menetapkan hubungan antara pergeseran frekuensi, kecepatan sumber, dan kecepatan orang yang mendengar relatif dengan medium (udara) yang dilewati oleh gelombang bunyi tersebut. Agar simpel, kita hanya akan berbicara posisi khusus di mana kecepatan sumber dan orang yang mendengar keduanya berada disepanjang garis lurus yang keduanya terhubung. Untuk topik efek Doppler,  $v_s$  dan  $v_p$  berturut-turut memperlihatkan unsur-unsur kecepatan sumber bunyi dan kecepatan orang yang mendengar, relatif dengan medium. Kita akan memilih arah positif untuk  $v_s$  dan  $v_p$  sebagai arah dari orang yang mendengar  $P$  ke sumber  $S$ . Laju perambatan bunyi relatif dengan medium, yaitu  $v$ , selalu positif.

## Pendengar Bergerak

Gambar 5.5 memperlihatkan pendengar bergerak pada kecepatan  $v_p$  menuju sumber bunyi yang diam. Frekuensi sumber bunyi adalah  $f_s$  dengan panjang gelombang  $\lambda = v/f_s$ . Puncak gelombang yang tidak menyatu pada jarak yang sama adalah  $\lambda$ . Besar laju relatif pendengar sebesar  $v + v_p$ . Jadi besar frekuensi pendengar  $f_p$  adalah:

$$f_p = \frac{v + v_p}{\lambda} = \frac{v + v_p}{v/f_s} \quad (5.24)$$

$$f_p = \left(1 + \frac{v_p}{v}\right) f_s \quad (5.25)$$



**Gambar 5.5.** Pendengar yang bergerak menuju sumber bunyi yang tidak bergerak akan mendengar frekuensi yang lebih tinggi daripada frekuensi sumber.<sup>17</sup>

Dengan demikian, orang yang mendengar bergerak mendekati sumber bunyi seperti pada Gambar 5.5 orang yang mendengar akan mendengar frekuensi yang lebih besar daripada yang didengar oleh orang yang mendengay yang diam. Melainkan, orang yang mendengar yang bergerak menjauhi sumber bunyi akan mendengar frekuensi yang lebih kecil.

## Sumber Bunyi dan Pendengar yang Bergerak

Apa yang akan terjadi apabila sumber bunyi tidak diam? Pada Gambar 5.6 memperlihatkan sebuah sumber bunyi yang bergerak pada kecepatan  $v_s$ . Laju gelombang bunyi relatif terhadap medium (udara) adalah  $v$ . Laju gelombang

<sup>17</sup> Giancoli, Douglas C. 1996. *Physics* (3<sup>rd</sup> Edition). New York: Prentice Hall, Inc.

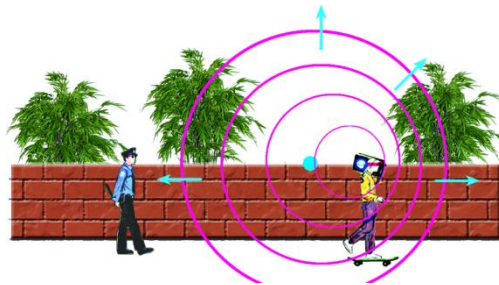
bunyi bernilai konstan, tidak akan bergantung pada gerak sumber. Tetapi, rumus panjang gelombang bunyi tidak sama dengan  $v/f_s$ . kenapa seperti itu? Waktu untuk memancarkan satu daur gelombang sama dengan periode  $T = 1/f_s$ . Dalam waktu  $T = 1/f_s$  ini gelombang merambat sejauh  $vT = v/f_s$  dan sumber bunyi merambat sejauh  $v_s T = v_s/f_s$ . Panjang gelombang yaitu jarak antara dua ujung gelombang yang berdekatan. Seperti diperlihatkan pada Gambar 5.6, panjang gelombang di depan sumber tidak sama dengan panjang gelombang di belakang sumber. Di depan sumber yang berada di sebelah kanan Gambar 5.6, panjang gelombangnya yaitu

$$\lambda = \frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s} = \frac{v - v_s}{f_s}. \quad (5.26)$$

Persamaan panjang gelombang jika berada dibelakang sumber yang berada disebalah kiri yaitu:

$$\lambda = \frac{v}{f_s} + \frac{v_s}{f_s} = \frac{v + v_s}{f_s}. \quad (5.27)$$

Gambar 5.6 menjelaskan bahwa gelombang yang berada di depan sumber mendekat dan di belakang sumber menjauh.



**Gambar 5.6.** Bentuk pancaran gelombang oleh bunyi yang bergerak.

Persamaan 5.27 ditukar menjadi persamaan 5.24 untuk frekuensi pendengar yang berada dibelakang sumber.

$$f_p = \frac{v + v_p}{\lambda} = \frac{v + v_p}{(v + v_s)/f_s}$$

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s \quad (5.28)$$

Persamaan (5.28) digunakan untuk sumber bunyi dan pendengar sepanjang garis yang dihubungkan untuk sumber bunyi dan pendengar. Apabila  $v_p = 0 \text{ m/s}$  Apabila sumber bunyi dan pendengar tidak bergerak atau mempunyai kecepatan yang sama relatif terhadap medium,  $v_p = v_s$  dan  $f_p = f_s$ . Apabila arah kecepatan asal atau arah kecepatan orang yang mendengar berlawanan dengan arah orang yang mendengar ke sumber (yang telah diartikan ditandai dengan tanda positif), sehingga besar kecepatan pendengar bertanda negatif.

### Contoh Soal 5.6

Sebuah sirine mobil polisi memiliki frekuensi  $f_s = 300 \text{ Hz}$ . Besar kelajuan gelombang bunyi saat di udara  $v = 340 \text{ m/s}$ . maka hitunglah:

- Besar panjang gelombang bunyi jika sirine dalam keadaan diam.
- Besar panjang gelombang didepan dan di belakang sirine jika sirine bergerak dengan kelajuan  $v = 108 \text{ km/jam}$
- Besar frekuensi yang didengar oleh pendengar P jika pendengar P berada pada posisi diam dan sirine menjauhi pendengar P pada kelajuan yang sama.

### Penyelesaian

$$v_s = 108 \text{ km/jam} = 30 \text{ m/s}$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$f_s = 300 \text{ Hz}$$

- Apabila sumber bunyi diam (tidak beregrak), maka:

$$\lambda = \frac{v}{f_s} = \frac{340 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1,13 \text{ m.}$$

- Besar panjang gelombang yang berada di depan sumber bunyi

$$\lambda = \frac{v - v_s}{f_s} = \frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1,03 \text{ m.}$$

Besar Panjang gelombang di depan sirine

$$\lambda = \frac{v + v_s}{f_s} = \frac{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}}{300 \text{ Hz}} = 1,23 \text{ m.}$$

- c. Orang yang mendengar dalam posisi tidak bergerak, yaitu  $v_p = 0 \text{ m/s}$ . Besar kelajuan sirine (sumber bunyi) adalah  $v_s = 30 \text{ m/s}$  (laju sumber bunyi  $v_s$  ditandai dengan tanda positif sebab sirine bergerak menuju arah yang sama seperti arah dari orang yang mendengar ke sumber bunyi).

$$f_p = \frac{v}{v + v_s} f_s = \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 276 \text{ Hz.}$$



## LATIHAN SOAL

1. Kawat baja yang memiliki massa 5 gram dan panjangnya 1,5 m kemudian kedua ujung kawat baja diikat kuat pada penumpu dengan tegangan 970 N. Tentukanlah:
  - a. Kelajuan gelombang transversal pada kawat baja
  - b. Panjang gelombang dan frekuensi nada awalnya
  - c. Frekuensi pada getaran kedua dan ketiga
2. Kelajuan gelombang bunyi pada saat di udara adalah  $345\text{ m/s}$ . Hitunglah panjang pipa organa terbuka dan tertutup jika frekuensi awalnya  $240\text{ Hz}$
3. Jika besar daya keluar pada gelombang bunyi adalah  $80\text{ W}$ . Hitunglah
  - a. Intensitas bunyi pada jarak 3 m dari sumber bunyi
  - b. Titik yang berjarak  $r$  dari sumber bunyi yang mempunyai taraf intensitas  $40\text{ dB}$
4. Besar frekuensi kereta api yang bergerak menuju pendengar yang diam di stasiun yaitu  $514\text{ Hz}$ . Setelah stasiun dilewati, frekuensi yang didengar yaitu  $474\text{ Hz}$ . Jika kelajuan gelombang bunyi pada saat di udara  $343\text{ m/s}$ , berapakah kelajuan kereta api?
5. Dua buah dawai piano mempunyai tegangan yang sama yang menghasilkan nada awal dengan frekuensi  $500\text{ Hz}$ . kemudian, tegangan salah satu dawai diubah sehingga apabila kedua piano dibunyikan secara bersama akan menyebabkan 5 layangan per detik. Hitunglah besarnya persen perubahan tegangan senar yang dikerjakan?

## BAB 6

### GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

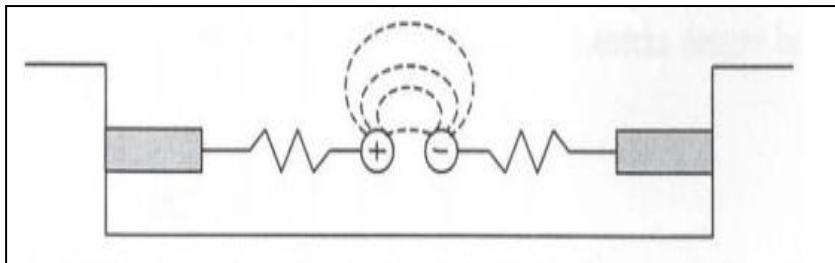
#### 6.1. Teori Maxwell

Menurut James Clark Maxwell: medan listrik muncul akibat adanya perubahan medan magnet dan sebaliknya perubahan medan magnet mampu memunculkan medan listrik. Hipotesis tersebutlah yang digunakan untuk membahas mengenai gelombang elektromagnetik.<sup>18</sup>

Dua buah bola isolator yang satu diberikan muatan positif dan yang satu lagi diberikan negatif. Keduanya diikat dengan pegas, kemudian digetarkan, sehingga jarak antara keduanya akan berubah-ubah dengan waktu.

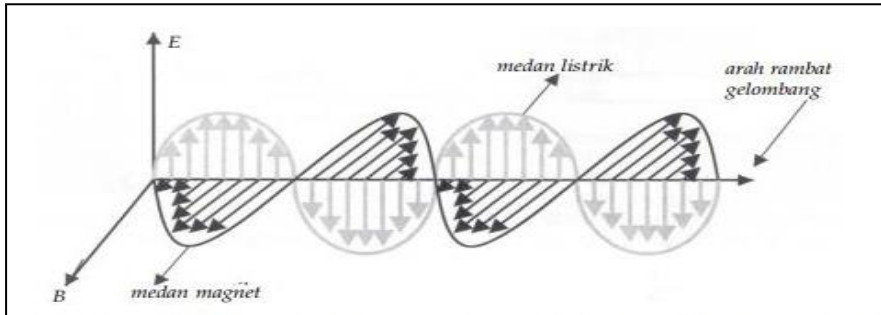
- a. Kedua muatan akan menimbulkan medan listrik di sekitarnya yang berubah – ubah dengan waktu.
- b. Menurut Maxwell perubahan medan listrik ini akan menimbulkan medan magnet yang juga berubah – ubah dengan waktu.
- c. Dengan adanya perubahan medan magnet yang digambarkan oleh Maxwell, maka akan timbul kembali medan listrik yang besarnya juga berubah-ubah.
- d. Demikian seterusnya sehingga akan terdapat proses berantai dari pembentukan medan magnet dan medan listrik yang menjalar ke segala arah.

Munculnya medan listrik ditandai dengan adanya pancaran gelombang elektromagnetik. Pada gambar 6.1 dapat dilihat adanya perubahan medan listrik dan medan magnet yang disebabkan oleh gelombang elektromagnetik.



**Gambar 6.1.** Perubahan medan magnet yang menghasilkan gelombang elektromagnetik.

<sup>18</sup> Hirose, A. and Karl E. Longreen. 1985. *Introduction to Wave Phenomena*. New York: John Wiley and Sons.



**Gambar 6.2.** gelombang elektromagnetik merambat tegak lurus terhadap medan listrik dan medan magnet.

Untuk Gambar 6.2 menjelaskan bahwa arah medan magnet selalu tegak lurus terhadap arah medan listrik. Sedangkan arah rambat gelombangnya selalu tegak lurus dengan medan listrik sehingga disebut dengan gelombang transversal.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (6.1)$$

**Keterangan:**

- $c$  : laju gelombang elektromagnetik pada ruang hampa
- $\mu_0$  : permeabilitas ruang hampa
- $\epsilon_0$  : permitivitas ruang hampa

**6.2. Spektrum Gelombang Elektromagnetik**

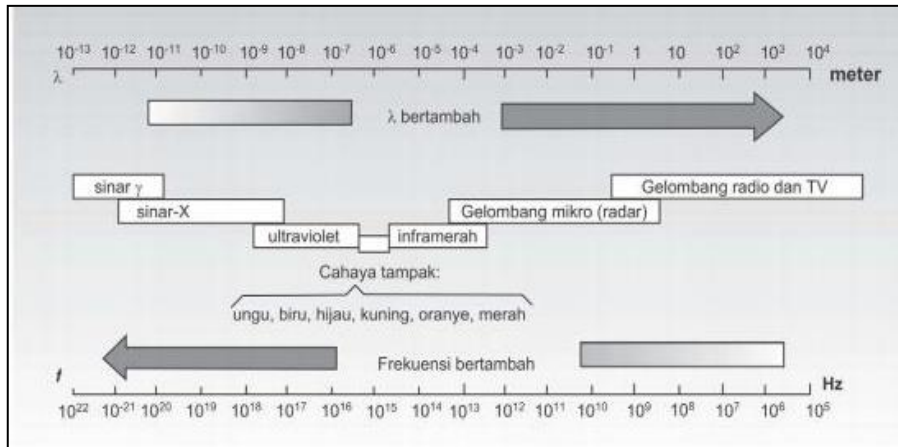
Gelombang elektromagnet terdiri atas bermacam-macam gelombang yang frekuensi dan panjang gelombangnya berbeda, tetapi semua gelombang-gelombang penyusun ini mempunyai kecepatan rambat yang sama yaitu:  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Ikatan tenggang frekuensi gelombang  $f$  atau  $\nu$ , panjang gelombang  $\lambda$  dan kecepatan perambatan  $c$  adalah sebagai berikut:

$$c = f \lambda \quad (6.2)$$

Spektrum gelombang elektromagnetik diurutkan mulai panjang gelombang paling pendek sampai paling panjang adalah sebagai berikut:

- a. Sinar gamma (J)
- b. Sinar (rontgen)
- c. Sinar ultra violet (UV)

- d. Sinar tampak (cahaya tampak)
- e. Sinar infra merah (IR)
- f. Gelombang radar (gelombang mikro)
- g. Gelombang televisive
- h. Gelombang radio



**Gambar 5.3.** spectrum gelombang elektromagnetik

**Contoh Soal 6.1**

Suatu berkas cahaya laser He - Ne mempunyai frekuensi  $4,7 \times 10^{14}$  Hz (warna merah). Hitunglah panjang gelombang cahaya laser tersebut.

**Penyelesaian**

Diketahui:  $f = 4,7 \times 10^{14}$  Hz

$$c = 3 \times 10^8$$

Ditanya: Panjang gelombang cahaya laser.....?

Jawaban:

$$c = f \lambda$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4,7 \times 10^{14}} = 6,32 \times 10^{-7} \text{ m}$$

### 6.3. Energi Gelombang Elektromagnetik

Jika kita sedang berada ditepi pantai, kita melihat adanya riak air laut menerpa karang di pantai dan mendengar deburan ombak. Kita tahu bagaimana bencana alam, tsunami (gelombang air laut) menghancurkan gedung-gedung yang diterjangnya. Saat kita terpapar cahaya matahari, kita dapat merasakan panasnya artinya kita telah menerima energi panas. Hal ini ditunjukkan bahwa gelombang laut telah membawa energi.

Gelombang elektromagnetik dapat membawa energi baik itu dalam bentuk medan listrik ataupun medan magnet yang dapat dilihat pada gambar 6.2 dengan persamaan:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad (6.3)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t) \quad (6.4)$$

#### Keterangan:

$E_m$  : amplitudo medan listrik

$B_m$  : amplitudo medan magnet

$k$  : tetapan gelombang  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$\omega$  : frekuensi sudut  $\omega = 2\pi f$

Maxwell berhasil menemukan hubungan antara amplitudo medan listrik dan amplitudo medan magnet yaitu:

$$\frac{E_m}{B_m} = -\frac{E}{B} = -c \quad (6.5)$$

#### Keterangan:

$c$  : laju perambatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa  
( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

Perbandingan antara amplitudo medan listrik dengan amplitudo medan magnetik dari suatu gelombang elektromagnetik selalu sama dengan laju perambatan cahaya dalam ruang hampa.

Satu gelombang elektromagnetik memiliki daerah listrik dan daerah magnet, sehingga gelombang elektromagnetik ini juga membawa kekuatan atau

rapat energi (besar energi per satuan volume). Rapat energi listrik diungkapkan sebagai berikut:

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (6.6)$$

Rapat energi magnet per satuan volume  $u_m$  dinyatakan sebagai berikut:

$$u_m = \frac{B^2}{2 \mu_0} \quad (6.7)$$

**Keterangan:**

- $u_e$  : rapat energi listrik ( $J / m^3$ )
- $u_m$  : rapat energi magnet ( $J / m^3$ )
- $B$  : besar induksi magnet ( $Wb / m^2 T$ )
- $\epsilon_0$  : permitivitas listrik ( $8.85 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$ )
- $E$  : kuat medan listrik ( $N / C$ )

**Contoh Soal 6.2**

Gelombang elektromagnetik mempunyai amplitudo medan  $E = 500 \text{ V/m}$ .  
Berapa amplitude medan magnetiknya?

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $E = 500 \text{ V/m}$

$$c = 3 \times 10^8$$

Ditanya: Amplitude medan magnetiknya .....?

Jawaban

$$\frac{E_m}{B_m} = -c$$

$$B_m = -\frac{E_m}{c} = -\frac{500}{3 \times 10^8} = -1,67 \times 10^{-6}$$

#### 6.4. Intensitas Gelombang Elektromagnetik

Intensitas gelombang elektromagnetik biasanya dinyatakan dalam laju energi (daya) per satuan luas permukaan yang tegak lurus arah rambat gelombang elektromagnetik. Laju energi (daya) per satuan luas permukaan yang tegak lurus arah rambat gelombang elektromagnetik dinyatakan dengan suatu vektor yang disebut vektor Poynting. Vektor Poynting dinyatakan sebagai berikut:

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (6.7)$$

#### 6.5. Aplikasi Gelombang Elektromagnetik

Berdasarkan kenyataan bahwa gelombang elektromagnetik terdiri atas banyak jenis sinar gamma ( $\gamma$ ), sinar (Rontgen), sinar ultraviolet, sinar tampak, sinar infra merah, gelombang radar, gelombang televisi dan gelombang radio. Pada bagian ini akan dibahas tentang aplikasi gelombang elektromagnetik dalam kehidupan sehari-hari.

##### 6.5.1. Sinar Gamma

Sinar gamma termasuk gelombang elektromagnetik yang mempunyai frekuensi antara  $10^{20}$  Hz -  $10^{25}$  Hz. Sinar gamma merupakan hasil reaksi yang terjadi dalam inti atom yang tidak stabil. Sinar gamma mempunyai daya tembus yang paling kuat dibanding gelombang-gelombang yang masuk dalam kelompok gelombang elektromagnetik. Sinar gamma dapat menembus pelat besi yang tebalnya beberapa cm. Penyerap yang baik untuk sinar gamma adalah timbal.

Aplikasi sinar gamma dalam bidang kesehatan adalah untuk mengobati pasien yang menderita penyakit kanker atau tumor. Sumber radiasi yang sering digunakan pada pengobatan penyakit-penyakit ini adalah Cobalt-60 atau sering ditulis Co-60. Salah satu alat untuk mendeteksi sinar gamma adalah detektor Geiger - Muller. Ada jenis detektor sinar gamma yang lain yaitu detektor sintilasi *NaI-Tl*.

### **6.5.2. Sinar – X**

Sinar-X ditemukan oleh Wilhem Conrad Rontgen pada tahun 1895 sehingga sering disebut sebagai sinar Rontgen. Sinar-X termasuk gelombang elektromagnetik yang mempunyai frekuensi antara  $10^{16}$  Hz –  $10^{20}$  Hz. SinarX merupakan hasil transisi elektronelektron di kulit bagian dalam, transisi terjadi dalam atom. Sinar-X mempunyai daya tembus terbesar kedua sesudah sinar gamma. Sinar-X dapat menembus daging manusia. Sinar sering digunakan dalam bidang kesehatan untuk mengecek pasien yang mengalami patah tulang. Pasien yang mengalami patah tulang diambil fotonya dengan sinar-X. Sinar-X juga digunakan di bandara pada pengecekan barang-barang penumpang di pesawat. Di pelabuhan digunakan untuk mengecek barang-barang (peti kemas) yang akan dikirim dengan kapal laut.

### **6.5.3. Sinar Ultraviolet**

Sinar ultraviolet adalah salah satu gelombang elektromagnetik dengan besar frekuensi antara  $10^{15}$  Hz sampai  $10^{16}$  Hz. Sinar ultraviolet adalah hasil transisi dari elektron-elektron dari molekul. Sinar ultraviolet tidak dapat dilihat dengan mata telanjang tetapi dapat dideteksi dengan menggunakan pelat yang peka terhadap gelombang ultraviolet. Matahari adalah sumber radiasi ultraviolet yang alami. Aplikasi sinar ultraviolet banyak digunakan di laboratorium untuk bidang penelitian seperti dibidang spektroskopi.

### **6.5.4. Sinar Tampak (Cahaya)**

Sinar tampak disebut juga dengan sebagai cahaya. Sinar tampak adalah salah satu gelombang elektromagnetik dengan besar frekuensi  $4,3 \times 10^{14}$  Hz sampai dengan  $7 \times 10^{14}$  Hz. Warna-warna yang dihasilkan dari sinar tampak adalah mulai warna merah, jingga, kuning. Hijau, biru sampai ungu. Warna-warna tersebut dapat kita lihat karena benda memantulkan dan diterima oleh mata. Penerapan dari sinar tampak adalah penerapan cahaya yaitu kita dapat melihat pemandangan yang indag karena adanya cahaya, nonton TV dan lain sebagainya, salah satu contoh sinar tampak adalah sinar ultraviolet. Aplikasi dari sinar tampak banyak digunakan di bidang spektroskopi.



#### **6.5.5. Sinar Inframerah (IR)**

Sinar inframerah adalah salah satu gelombang elektromagnetik dengan besar frekuensi di bawah  $4,3 \times 10^{14} \text{ Hz}$  sampai sekitar  $3 \text{ GHz}$ . Sinar inframerah tidak bisa kita lihat dengan mata terbuka tetapi sinar inframerah dapat diketahui dengan menggunakan pelat film yang mampu menangkap gelombang inframerah. Aplikasi dari sinar tampak banyak digunakan juga di bidang spektroskopi agar unsur-unsur di dalam setiap bahan dapat diketahui.

#### **6.5.6. Gelombang Radar**

Singkatan dari Radar adalah *Radio Detection and Ranging*. Gelombang radar merupakan gelombang mikro (*microwave*) dengan frekuensi 3 GHz yang digunakan sebagai alat komunikasi, memasak dan radar. Antena radar berfungsi untuk memancarkan dan menerima gelombang elektromagnetik.

Di pangkalan udara, antena pemancar radar dapat berputar ke segala arah untuk mendeteksi adanya pesawat terbang yang menuju atau meninggalkan pangkalan udara. Dalam bidang transportasi, gelombang radar dipakai untuk membantu kelancaran lalu lintas pesawat di pangkalan udara atau bandara. Gelombang radar digunakan juga pada bidang pertahanan yaitu untuk melengkapi pesawat tempur sehingga bisa mengetahui keberadaan pesawat musuh.

#### **6.5.7. Gelombang Televisi**

Gelombang televisi mempunyai frekuensi yang lebih tinggi dari gelombang radio. Gelombang televisi ini merambat lurus, tidak dapat dipantulkan oleh lapisan-lapisan atmosfer bumi. Gelombang televisi banyak dipakai dalam bidang komunikasi dan siaran. Pada proses penangkapan siaran televisi sering diperlukan stasiun penghubung (*relay*) agar penangkapan gambar dan suara lebih baik. Untuk televisi stasiun Jakarta, maka di wilayah Bandung diperlukan sebuah stasiun penghubung yang terletak di puncak gunung Tangkuban Perahu.

Penayangan siaran televisi untuk daerah yang lebih jauh lagi, misalnya untuk Indonesia bagian timur agar kualitas gambar dan suara bagus diperlukan sebuah satelit sebagai stasiun penghubung. Kita harus menyewa sebuah satelit yang bertindak sebagai stasiun penghubung, jika kita ingin melihat siaran langsung dari luar negeri, seperti pertandingan sepak bola, tinju, dan sebagainya

#### **6.5.8. Gelombang Radio**

Gelombang radio dipancarkan dari antena pemancar kemudian diterima oleh antena penerima. Besar panjang gelombang radionya tergantung pada tinggi rendahnya antena pemancar. Gelombang radio tidak dapat didengar secara langsung tetapi energi gelombang radio terlebih dahulu dirubah menjadi energi bunyi bunyi pada pesawat radio yang berperan sebagai penerima gelombang. Penerapan dari gelombang radio adalah telepon genggam (hp), pesawat telepon dan lain sebagainya.

## LATIHAN SOAL

1. Hitunglah selisih panjang gelombang pada cahaya tampak jika berada pada frekuensi  $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$  (cahaya merah) dan  $7,9 \times 10^{14} \text{ Hz}$  (cahaya ungu).
2. Seberkas cahaya X memiliki panjang gelombang 2,1 nm. Hitunglah besar frekuensi cahaya X tersebut.
3. Untuk menentukan kedalaman laut yaitu dengan cara mengirimkan gelombang mikro sampai ke dasar laut. Ternyata hasil pulsa pantul bernilai 8 Ps. Hitunglah kedalaman laut tersebut.
4. Kuat medan listrik pada gelombang elektromagnet adalah 200 N/C. Cepat rambat gelombang elektromagnetik di ruang hampa  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  dan permitivitas listrik bagi ruang hampa  $8,85 \times 10^{-12} \text{ C/Nm}^2$ . Hitung laju energi rata-rata setiap satuan luas gelombang elektromagnetik.
5. Hitunglah besar amplitudo medan magnetiknya jika diketahui besar amplitudo medan listrik adalah 210 V/m.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ruwanto, B. (2007). *Asas-Asas Fisika 3A*. Bogor: Yudhistira.
- Giambattista, Alan, B. Richardson, B. McCarthy and Richardson, Robert C. 2004. *College Physics*. New York: McGraw-Hill.
- Giancoli, Douglas C. 1996. *Physics* (3<sup>rd</sup> Edition). New York: Prentice Hall, Inc.
- Halliday, David dan Robert Resnick. 2007. *Fisika Edisi ke 3 Jilid1*. Erlangga, Jakarta.
- Hirose, A. and Karl E. Longreen. 1985. *Introduction to Wave Phenomena*. New York: John Wiley and Sons.
- Kadri, M., Tanjung, Y., dan Sudarma, T. 2016. *Fisika Dasar 2. Harapan Cerdas*. Medan.
- Jewett, Serway. 2010. *Physics for Scientists and Engineers*, California State Polytechnic University, Pomona.
- Serway, Raymond A. 2000. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Virginia: Saunders College Publishing.
- Young, H.D. and Freedman, Roger A. 2000. *University Physics* (Tenth Edition). New York: Addison Wesley Longman, Inc.