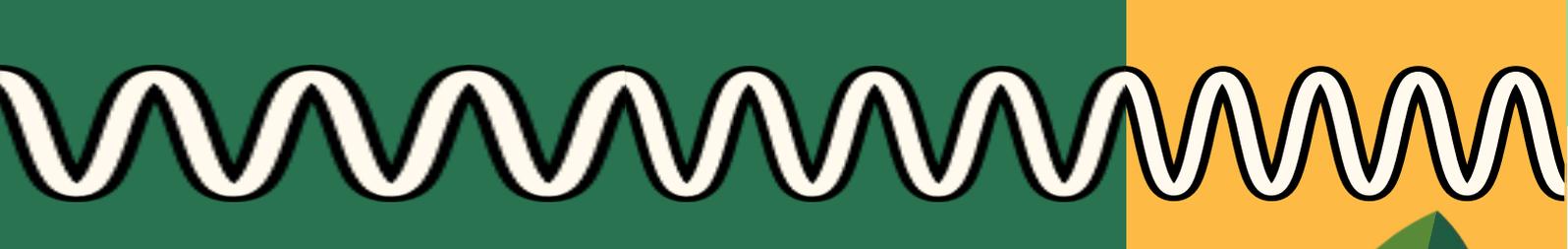
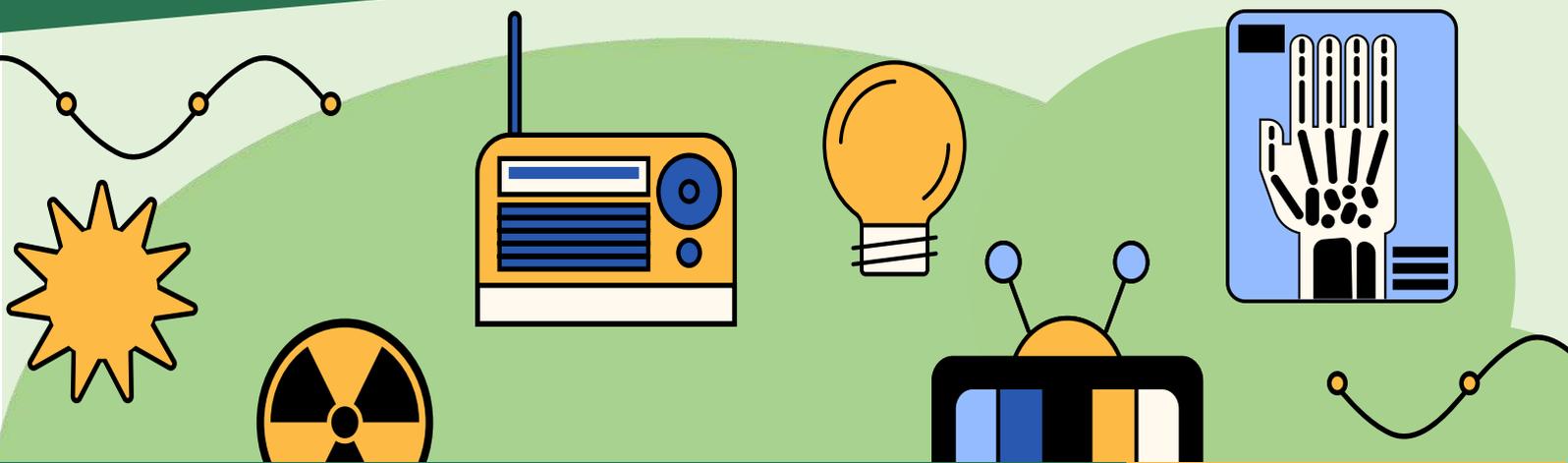


Modul Fisika Teknik

» Osilasi dan Gelombang



POLITEKNIK | 2024
NEGERI MEDAN

Rona Cuana

› Prakata

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan e-modul pembelajaran Fisika Teknik sebagai salah satu tugas dalam kegiatan Pelatihan Dasar (Latsar) Calon Pegawai Negeri Sipil (CPNS) Golongan III. Penyusunan e-modul ini sebagai bentuk pelaksanaan aktualisasi di unit kerja penulis yaitu di Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan. Penyusunan e-modul Fisika Teknik ini dapat terwujud atas bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Mentor pada Pelatihan Dasar CPNS 2024, Bapak Julham, S.T., M.Kom.
2. Coach pada Pelatihan Dasar CPNS 2024, Bapak Drs. Dedi Karyana, M. Ed.
3. Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Medan, Bapak Dr. Abdi Hanra Sebayang, S.T., M.T.
4. Kepala Prodi D-III Teknik Mesin Politeknik Negeri Medan, Bapak Ir. Nelson Manurung, M.T.
5. Rekan-rekan Dosen dan Tendik Prodi D-III Teknik Mesin Politeknik Negeri Medan
6. Rekan-rekan peserta Pelatihan Dasar CPNS 2024 angkatan LIII.

Penulis menyadari bahwa e-modul Fisika Teknik ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran yang membangun demi perbaikan e-modul Fisika Teknik yang lebih baik lagi. Meskipun begitu, penulis berharap semoga e-modul pembelajaran ini dapat memberikan manfaat baik kepada penulis maupun kepada unit kerja tempat penulis bertugas.

› Daftar Isi

Bab 5. Osilasi dan Gelombang	1
5.1 Gerak harmonik sederhana	1
5.2 Energi pada gerak harmonik sederhana	6
5.3 Analisis gerak harmonik sederhana	9
5.4 Pendulum sederhana	12
5.5 Gerak gelombang	14
5.6 Gelombang transversal dan gelombang longitudinal	17
5.7 Pemantulan dan transmisi gelombang	20
5.8 Interferensi gelombang	23
5.9 Gelombang stasioner	25
5.10 Gelombang elektromagnetik	29
Problems	33
Summaries	34
References	35
Answers	36

› Instruksi Penggunaan Modul

Modul ini berisi beberapa fitur yang akan membantumu dalam belajar, seperti yang dijelaskan di bawah ini

Menjelaskan apa yang akan kamu pelajari di setiap bab. →

Spotlight. Kamu dapat menonton video pembelajaran di YouTube terkait topik yang dibahas untuk meningkatkan pemahamanmu dengan cara memindai barcode yang telah disediakan. →

Check My Understanding. Kamu diberikan kesempatan untuk menguji pemahamanmu terhadap konsep fisika yang disajikan melalui Check My Understanding. →

Pada bab ini

- Membahas osilasi pada pegas, bandul, serta gelombang sederhana seperti gelombang pada air dan tali.
- Membahas karakteristik gelombang elektromagnetik.



Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas bagaimana osilasi pada pegas terjadi.



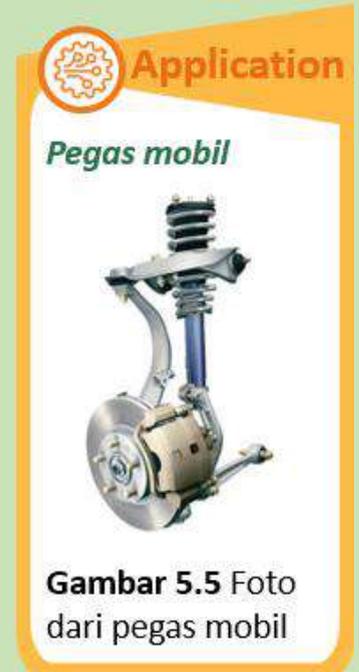
Check My Understanding



Benar atau salah?

- 1 Perpindahan pada pegas A dengan konstanta $2k$ akan lebih besar dari pada perpindahan pada pegas B dengan konstanta k ketika diberikan besar gaya F yang sama

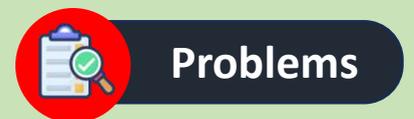
Application. Menunjukkan aplikasi yang dapat kamu temui dalam kehidupan sehari-hari berkaitan dengan topik fisika yang dibahas pada modul.



Example. Berisi contoh soal dari penggunaan rumus ataupun konsep fisika untuk meningkatkan pemahamanmu.



Problems. Soal-soal disertakan pada akhir bab untuk menguji pemahamanmu.



Summaries. Berisi ringkasan pada akhir bab yang mengulas konsep dan persamaan penting yang dibahas pada bab tersebut.



Answer Key. Berisi kunci jawaban dari soal-soal pada Problems untuk mengecek kebenaran jawabanmu.



BAB 5

Osilasi dan Gelombang

- Berapa periode kira-kira dari langkah kamu saat berjalan?

Pada bab ini

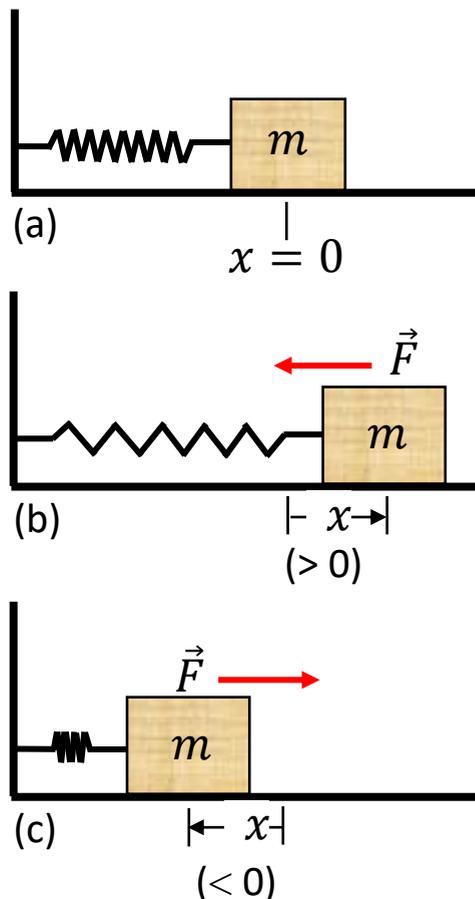
- Membahas osilasi pada pegas, bandul, serta gelombang sederhana seperti gelombang pada air dan tali.
- Membahas karakteristik gelombang elektromagnetik.

5.1 Gerak harmonik sederhana

Gerak yang berulang-ulang disebut sebagai gerak periodik atau gerak osilasi. Bentuk paling sederhana dari gerak periodik direpresentasikan oleh sebuah benda yang berosilasi di ujung sebuah pegas yang seragam.

Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas bagaimana osilasi pada pegas terjadi.



▲ **Gambar 5.1** Objek bermassa m berosilasi di ujung pegas yang seragam dengan gaya \vec{F} yang bekerja pada objek di berbagai posisi

Perhatikan Gambar 5.1. Pada Gambar 5.1a sebuah benda dengan massa m berada di atas lantai horizontal tanpa gesekan. Benda diikat pada ujung pegas yang massanya diabaikan. Benda m ditarik sejauh x seperti pada Gambar 5.1b dan dilepaskan. Benda akan bergetar atau berosilasi melalui titik kesetimbangan pada $x = 0$ dengan perpindahan sejauh x ke kanan dan x ke kiri, seperti pada Gambar 5.1b dan 5.1c. Posisi benda pada $x = 0$ disebut **posisi kesetimbangan**.

Benda tersebut berosilasi terhadap posisi kesetimbangan karena adanya gaya pemulih yang cenderung mengembalikan benda ke posisi setimbangnya, tidak peduli ke arah mana benda dipindahkan. Oleh sebab itu, gaya ini disebut *gaya pemulih (restoring force)*.

Besar gaya pemulih F berbanding lurus dengan perpindahan x dari pegas yang direntangkan atau ditekan dari posisi setimbang:

$$F = -kx$$

(5.1) ◀ ▶ Hukum Hooke

Persamaan 5.1 sering disebut sebagai hukum Hooke. Tanda minus berarti bahwa gaya pemulih selalu mempunyai arah yang berlawanan dengan perpindahan x . Sementara itu, konstanta pembanding k disebut *konstanta pegas*.

Untuk meregangkan pegas sejauh x , kita harus memberikan gaya (eksternal) pada ujung pegas sebesar

$$F_{ext} = +kx$$

Semakin besar nilai k (semakin kaku pegas), semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk meregangkan pegas sejauh jarak tertentu.

Check My Understanding

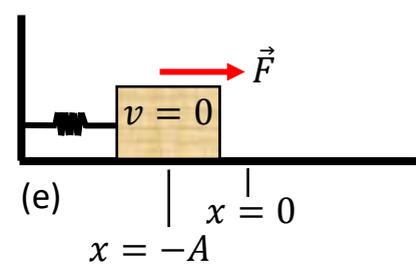
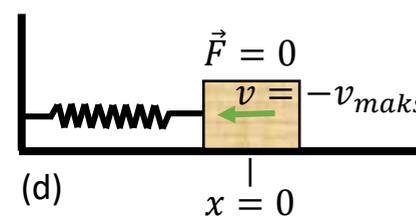
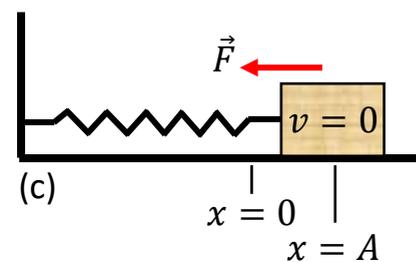
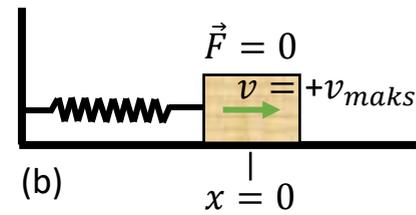
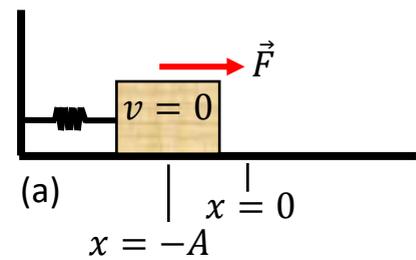


Benar atau salah?

- 1 Perpindahan pada pegas A dengan konstanta $2k$ akan lebih besar dari pada perpindahan pada pegas B dengan konstanta k ketika diberikan besar gaya F yang sama.

Perhatikan bahwa gaya F pada Pers. 5.1 *bukan* merupakan konstanta, tetapi berubah-ubah terhadap posisi. Dengan demikian, percepatan massa m juga tidak konstan alias berubah-ubah.

Mari kita analisis apa yang terjadi ketika pegas pada awalnya ditekan sampai jarak $x = -A$, seperti pada Gambar 5.2a, dan kemudian dilepaskan di atas permukaan licin tanpa gesekan. Pegas memberikan gaya pada massa yang mempercepatnya ke posisi setimbang dengan laju yang cukup tinggi. Memang pada posisi setimbang ini, gaya padanya turun sampai nol, tetapi lajunya adalah maksimum (Gambar 5.2b). Sementara massa bergerak lebih jauh ke kanan, gaya padanya bekerja untuk untuk memperlambat massa tersebut, dan menghentikannya sejenak pada $x = A$ (Gambar 5.2c). Massa kemudian mulai bergerak kembali ke arah yang berlawanan, dipercepat sampai melewati titik setimbang (Gambar 5.2d), kemudian melambat sampai mencapai laju nol pada titik awal asalnya, $x = -A$ (Gambar 5.2e). Gerak ke depan dan ke belakang ini terus berulang (berosilasi) antara $x = A$ dan $x = -A$.



Check My Understanding

- Sebuah massa berosilasi pada permukaan tanpa gesekan di ujung sebuah pegas horizontal. Dimanakah percepatan massa itu bernilai nol (lihat Gambar 5.2)?
 - Di $x = -A$
 - Di $x = 0$
 - Di $x = +A$
 - Di $x = -A$ dan di $x = A$

▲ **Gambar 5.2**
Sebuah objek berosilasi, menunjukkan gaya dan kecepatannya pada berbagai posisi dari siklus osilasinya

Amplitudo, periode, dan frekuensi gerak harmonik sederhana

Untuk membahas gerak harmonik sederhana, kita perlu mendefinisikan beberapa istilah:

- 1 **Perpindahan (x):** jarak massa dari titik setimbang
- 2 **Amplitudo (A):** perpindahan maksimum (jarak terjauh dari titik setimbang)
- 3 Satu **siklus (panjang gelombang):** gerak bolak-balik yang lengkap dari satu titik awal, kemudian kembali ke titik yang sama, katakanlah dari $x = A$ ke $x = -A$ kembali ke $x = A$
- 4 **Periode (T):** waktu yang dibutuhkan untuk satu siklus lengkap
- 5 **Frekuensi (f):** jumlah siklus lengkap per detik

Dari definisi-definisi tersebut, frekuensi dengan periode berbanding terbalik, dimana periode adalah waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan satu siklus (s), sedangkan frekuensi adalah jumlah siklus per satuan waktu (Hz).

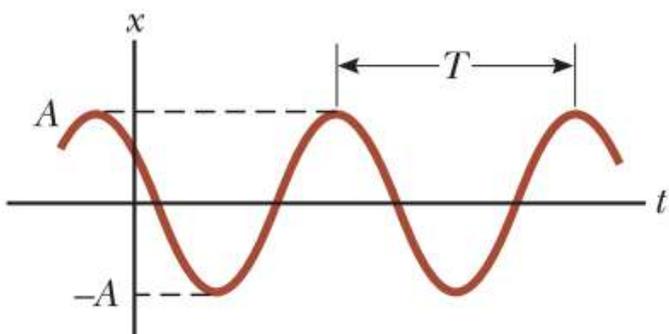
$$f = \frac{1}{T}$$

dan

$$T = \frac{1}{f}$$

(5.2)

Amplitudo dan periode pada grafik $x - t$ untuk massa yang mengalami gerak harmonik sederhana direpresentasikan pada Gambar 5.3.



◀ **Gambar 5.3** Grafik $x - t$ untuk massa yang mengalami gerak harmonik sederhana. Amplitudo gerak adalah A , dan periode adalah T



Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas mengenai istilah-istilah disamping.

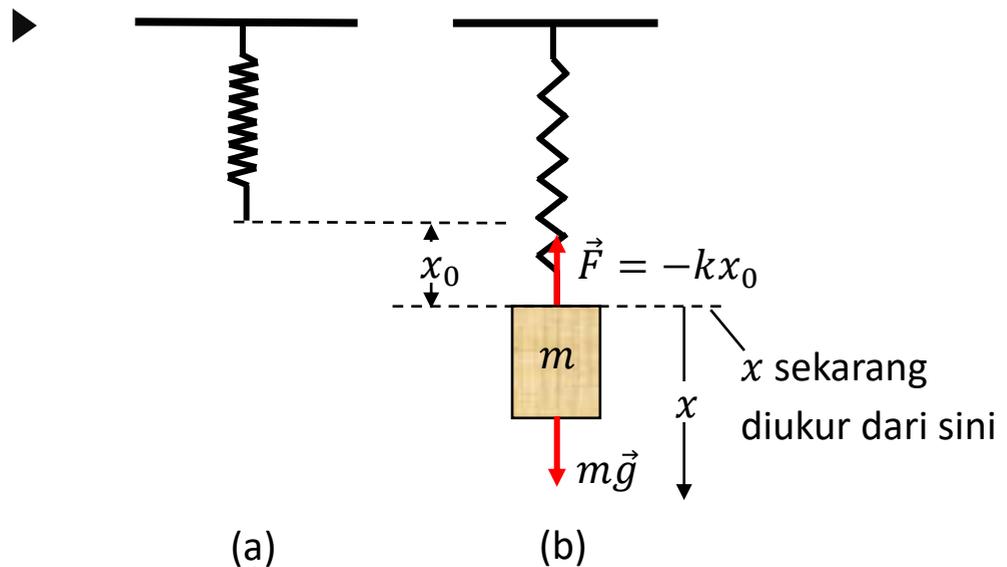


Check My Understanding



- 1 Jika sebuah massa yang berosilasi memiliki frekuensi 1,25 Hz, ia membuat 100 osilasi selama
(a) 12,5 s
(b) 125 s
(c) 80 s
(d) 8,0 s

Osilasi dari pegas yang tergantung vertikal pada dasarnya sama seperti pegas horizontal. Karena adanya gaya gravitasi, panjang pegas vertikal dalam posisi setimbang akan lebih panjang daripada ketika posisinya horizontal, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4. Pegas berada dalam keadaan setimbang ketika $\sum F = 0 = mg - kx_0$, sehingga pegas teregang dengan jarak tambahan $x_0 = mg/k$ agar setimbang. Jika x diukur dari posisi setimbang yang baru ini, Pers. 5.1 dapat digunakan langsung dengan nilai k yang sama. Dengan demikian, Pers. 5.1 berlaku untuk osilasi pegas pada arah horizontal maupun vertikal.



Gambar 5.4 (a) Pegas bebas digantung vertikal. (b) Massa m ditempatkan pada pegas itu di posisi setimbang yang baru, yang terjadi ketika $\sum F = 0 = mg - kx_0$



Application

Pegas mobil



Ford Motor Company

Gambar 5.5 Foto dari pegas mobil



Example

Ketika sebuah keluarga yang berjumlah empat orang dengan massa total 250 kg menaiki mobil yang bermassa 1200 kg, pegas mobil tertekan 3,0 cm (a) berapakah konstanta pegas dari mobil itu (Gambar 5.5)? (b) berapa jauh mobil akan tertekan jika dimuati 350 kg alih-alih 250 kg?

Penyelesaian (a) gaya tambahan sebesar $(250 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2) = 2450 \text{ N}$ menyebabkan pegas tertekan $3,0 \times 10^{-2} \text{ m}$. Dengan demikian, dari Pers. 5.1, konstanta pegasnya adalah

$$k = \frac{F}{x} = \frac{2450 \text{ N}}{3,0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 8,2 \times 10^4 \text{ N/m}$$

(b) Jika mobil termuati 350 kg,

$$x = \frac{F}{k} = \frac{(350 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)}{(8,2 \times 10^4 \text{ N/m})} = 4,2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Atau 4,2 cm

5.2 Energi pada gerak harmonik sederhana

Ketika gaya tidak konstan, seperti di dalam gerak harmonik sederhana ini, seringkali menggunakan pendekatan energi akan lebih memudahkan dan berguna. Untuk meregang dan menekan pegas, harus dilakukan usaha. Dengan demikian, energi potensial disimpan pada pegas yang teregang dan tertekan, yang dinyatakan dengan

$$EP = \frac{1}{2}kx^2$$

Energi mekanik total E merupakan energi kinetik dan potensial,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (5.3)$$

dimana v adalah kecepatan massa m ketika berjarak x dari posisi setimbang. Pada saat massa berosilasi bolak-balik, energi terus berubah dari energi potensial ke energi kinetik (Gambar 5.6). Pada titik ekstrim, $x = -A$ dan $x = A$ (Gambar 5.6 a, c), semua energi tersimpan pada pegas sebagai energi potensial dan massa berhenti sebentar sebelum berubah arah, sehingga $v = 0$ dan

$$E = \frac{1}{2}m(0)^2 + \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}kA^2 \quad (5.4a) \quad \blacktriangleleft$$

Dengan demikian, **energi mekanik total dari osilator harmonik sederhana sebanding dengan kuadrat amplitudo**. Pada titik setimbang, $x = 0$, semua energi merupakan energi kinetik:

$$E = \frac{1}{2}mv_{maks}^2 + \frac{1}{2}k(0)^2 = \frac{1}{2}mv_{maks}^2 \quad (5.4b) \quad \blacktriangleright$$



Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat penjelasan tambahan mengenai energi pada pegas.



► Energi total dari osilator harmonik sederhana

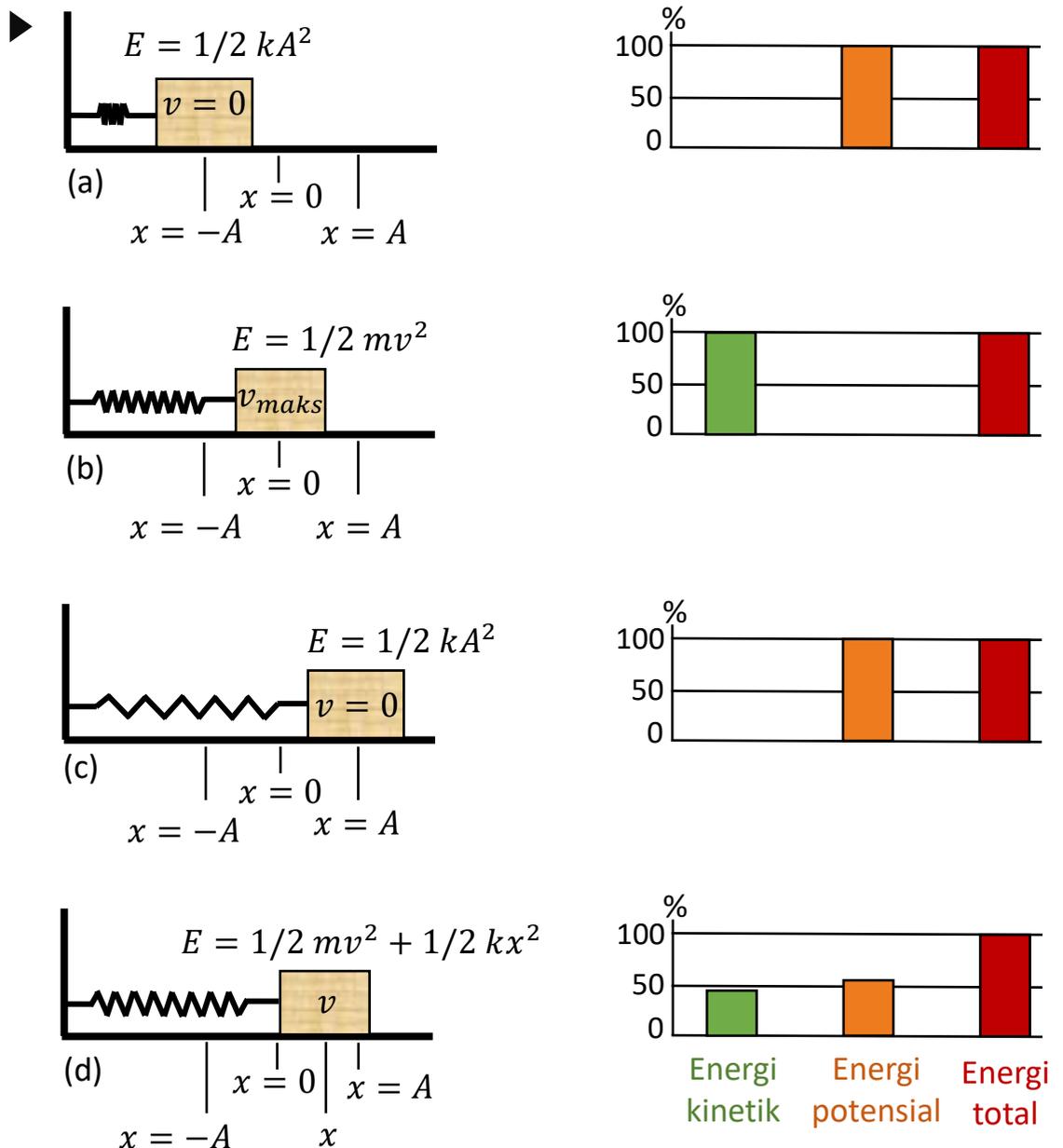
dimana v_{maks} adalah kecepatan maksimum (saat $x = 0$). Pada titik-titik pertengahan, sebagian energi berbentuk energi kinetik dan sebagian lagi energi potensial,

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

Kemudian diperoleh nilai v_{maks} dan v (kecepatan benda di semua posisi x ,

$$v_{maks} = \sqrt{\frac{k}{m}}A \quad \text{dan} \quad v = \pm v_{maks}\sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}} \quad (5.5)$$

Gambar 5.6 Energi berubah dari energi kinetik menjadi energi potensial dan kembali lagi saat pegas berosilasi. Grafik batang energi ditunjukkan disebelah kanan, yang menunjukkan bahwa jumlah dari energi kinetik dan energi potensial haruslah 100% (hukum kekekalan energi mekanik).





Example

Sebuah pegas meregang 0,100 m ketika massa 0,300 kg digantungkan padanya. Pegas dan massa tersebut kemudian dipasang horizontal pada meja tanpa gesekan. Massa itu ditarik sehingga pegasnya teregang 0,200 m dari titik setimbang ini, dan dilepaskan.

- Tentukan konstanta kekakuan pegas k
- Amplitudo osilasi horizontal A
- Magnitudo kecepatan maksimum v_{maks}
- Magnitudo kecepatan v ketika massa berada 0,150 m dari kesetimbangan, dan
- Magnitudo percepatan maksimum a_{maks} massa tersebut

Penyelesaian

- Karena pegas teregang 0,100 m ketika 0,300 kg digantungkan padanya, maka

$$k = \frac{F}{x_0} = \frac{mg}{x_0} = \frac{(0,300 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2)}{0,100 \text{ m}} = 29,4 \text{ N/m}$$

- Pegasnya sekarang horizontal (di atas meja). Pegas itu diregangkan 0,200 dari titik setimbang dan tidak diberi laju awal, $A = 0,200 \text{ m}$

- Kecepatan maksimum, v_{maks} didapatkan ketika massa melewati titik setimbang dimana semua energi merupakan energi kinetik. Dengan membandingkan total energi (lihat Pers. 5.3) pada kondisi kesetimbangan terhadap kondisi teregang penuh, maka

$$\frac{1}{2}mv_{maks}^2 + 0 = 0 + \frac{1}{2}kA^2,$$

di mana $A = 0,200 \text{ m}$. Denga menyelesaikan untuk v_{maks} , kita dapatkan

$$v_{maks} = A\sqrt{\frac{k}{m}} = (0,200 \text{ m})\sqrt{\frac{29,4 \text{ N/m}}{0,300 \text{ kg}}} = 1,98 \text{ m/s}$$

- Kita gunakan Pers. 5.5 , sehingga

$$v = v_{maks}\sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}} = \left(1,98 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\sqrt{1 - \frac{(0,150 \text{ m})^2}{(0,200 \text{ m})^2}} = 1,31 \text{ m/s}$$

- Berdasarkan hukum kedua Newton $F = ma$. Jadi percepatan maksimum terjadi di titik di mana gaya paling besar, yaitu ketika $x = A = 0,200 \text{ m}$. Sehingga

$$a_{maks} = \frac{F_{maks}}{m} = \frac{kA}{m} = \frac{(29,4 \text{ N/m})(0,200 \text{ m})}{0,300 \text{ kg}} = 19,6 \text{ m/s}^2$$

Check My

Understanding



Untuk osilator harmonik sederhana dari contoh disamping, tentukan

- Energi total
- Energi kinetik dan potensial pada setengah amplitudo ($x = \pm A/2$)

5.3 Analisis gerak harmonik sederhana

Posisi sebagai fungsi waktu – $x(t)$

Untuk mendapatkan persamaan $x(t)$ atau persamaan simpangan benda, kita gunakan hukum kedua Newton untuk mendapatkan persamaan diferensial gerak benda:

$$F = -kx$$

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

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x, \text{ dengan } \frac{k}{m} = \omega^2, \text{ maka:}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2x \quad (5.6)$$

Sekarang kita cari solusi matematika untuk Pers. 5.6, yaitu fungsi $x(t)$ (posisi sebagai fungsi waktu) yang memenuhi persamaan diferensial ini. Solusi yang biasa digunakan adalah

$$x(t) = A \cos \omega t \quad (5.7)$$

Dengan A dan ω adalah konstanta, dimana A adalah amplitudo dan ω adalah frekuensi sudut (satuan rad/s). ω adalah ukuran seberapa cepat osilasi terjadi; semakin banyak osilasi per satuan waktu, semakin tinggi nilai ω . Frekuensi sudut ω , dinyatakan:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.8)$$

Spotlight

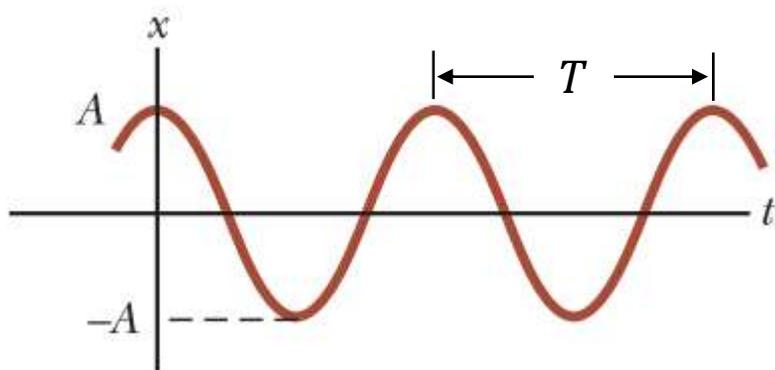
Kunjungi link berikut untuk mendapatkan pemahaman lebih jauh bagaimana persamaan simpangan diperoleh



Posisi sebagai fungsi waktu

Frekuensi sudut

Jika Pers. 5.7 diproyeksikan ke dalam grafik x sebagai fungsi t maka terlihat seperti pada Gambar 5.7.



► **Gambar 5.7** Grafik $x - t$ untuk benda yang bergerak harmonik sederhana

Nilai A pada Gambar 5.7 disebut dengan amplitudo. **Amplitudo** dari sebuah benda yang berosilasi merupakan jarak terbesar yang ditempuh dari posisi kesetimbangan. **Periode** T adalah waktu yang dibutuhkan benda saat berosilasi untuk kembali ke posisi semula, atau waktu yang dibutuhkan untuk satu osilasi penuh. Secara matematis dapat dituliskan

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

(5.9) ◀ ▶ Periode osilasi

Kebalikan dari periode adalah frekuensi. Frekuensi adalah jumlah osilasi tiap detik yang dilakukan benda. Secara matematis dapat dituliskan

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

(5.10) ◀ ▶ Frekuensi osilasi

Dari Pers. 5.10 diperoleh

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

(5.11) ◀ ▶ Frekuensi sudut

Kecepatan dan percepatan sebagai fungsi waktu – $v(t)$ dan $a(t)$

Kita dapat memperoleh kecepatan dan percepatan sebagai fungsi waktu dari Pers. 5.7, dengan melakukan diferensial satu kali untuk kecepatan dan diferensial dua kali untuk percepatan.

Kecepatan sebagai fungsi waktu

$$\left\langle \right\rangle v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin \omega t \quad (5.12)$$

Percepatan sebagai fungsi waktu

$$\left\langle \right\rangle a = \frac{dx^2}{dt^2} = -\omega^2 A \cos \omega t \quad (5.13)$$

Dari Pers. 5.12 kita melihat bahwa karena fungsi sinus dan kosinus berosilasi antara ± 1 , maka nilai maksimum untuk kecepatan v_{maks} adalah ωA (lihat Pers. 5.5). Demikian pula, persamaan 5.13 menunjukkan bahwa nilai maksimum untuk percepatan a_{maks} adalah $\pm \omega^2 A$. Sehingga nilai maksimum untuk kecepatan dan percepatan adalah

Kecepatan dan percepatan maksimum

$$\left\langle \right\rangle v_{maks} = \omega A = \sqrt{\frac{k}{m}} A ; a_{maks} = \omega^2 A = \frac{k}{m} A \quad (5.14)$$

Example

Benda dengan massa 400 g dihubungkan dengan pegas ($k = 10,00 \text{ N/m}$) diatas bidang datar yang licin. Benda kemudian ditarik sejauh 10,00 cm dari titik setimbang dan dilepaskan, tentukan kecepatan dan percepatan maksimum dari benda tersebut.

Penyelesain Kita gunakan Persamaan 5.14. Pertama kita cari dahulu nilai ω :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{10,00 \text{ N/m}}{400 \times 10^{-3} \text{ kg}}} = 5,00 \text{ rad/s}$$

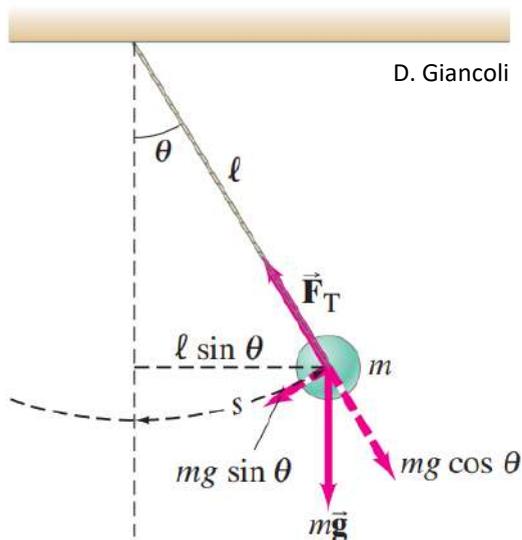
Sehingga:

$$v_{maks} = \omega A = (5,00 \text{ rad/s})(10,00 \times 10^{-2} \text{ m}) = 0,5 \text{ m/s}$$

$$a_{maks} = \omega^2 A = (5,00 \text{ rad/s})^2(10,00 \times 10^{-2} \text{ m}) = 2,5 \text{ m/s}^2$$

5.4 Pendulum sederhana

Bandul sederhana adalah contoh lain yang menunjukkan gerak periodik. Pendulum sederhana terdiri dari sebuah bandul dengan massa m yang digantungkan di ujung tali ringan dengan panjang ℓ , seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8.



◀ **Gambar 5.8**
Pendulum sederhana, dan diagram benda bebas.

Ketika bandul ditarik ke samping dan dilepaskan, bandul pendulum tersebut berosilasi sepanjang busur lingkaran dengan amplitudo yang sama di kedua sisi titik kesetimbangannya, dan saat melewati titik kesetimbangan, kecepatannya adalah maksimum.

Gaya yang bekerja pada bandul adalah gaya T yang bekerja di sepanjang tali dan gaya gravitasi mg . Vektor komponen gaya gravitasi yang bersinggungan dengan lintasan lengkung bandul dengan besar $mg \sin \theta$ yang mengarah ke $\theta = 0$, berlawanan dengan perpindahan bandul dari posisi terendah. Oleh karena itu, gaya gravitasi merupakan gaya pemulih, yaitu

$$F = -mg \sin \theta$$

(5.15) ◀ ▶ Gaya pemulih bandul

Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas mengenai osilasi pada pendulum sederhana.



Check My Understanding



- 1 Sebuah jam pendulum jika dibawa ke dalam stasiun ruang angkasa dan jauh dari benda-benda ruang angkasa, maka
- (a) Jarum jam bergerak lebih cepat
 - (b) Jarum jam tidak bergerak
 - (c) Jam berfungsi lebih akurat
 - (d) Pendulum berayun lebih lambat

Jika gaya pemulih sebanding dengan s atau θ , gerakannya akan harmonik sederhana. Karena F sebanding dengan $\sin\theta$ dan bukan θ itu sendiri, maka gerakannya bukan harmonik sederhana. Namun, jika θ kecil, maka $\sin\theta \approx \theta$, sehingga

$$F = -mg \sin \theta \approx -mg\theta$$

Dengan mensubstitusi $s = \ell\theta$ (panjang busur lintasan bandul), atau $\theta = s/\ell$, didapatkan

$$F = -\frac{mg}{\ell}s$$

Konstantan gaya efektif adalah $k = mg/\ell$, jika kita substitusikan ke Pers. 5.9, maka diperoleh periode dan frekuensi pendulum sederhana:

Periode pendulum



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

(5.16)

Frekuensi pendulum



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

(5.17)

Application

Jam pendulum



Walmart.com

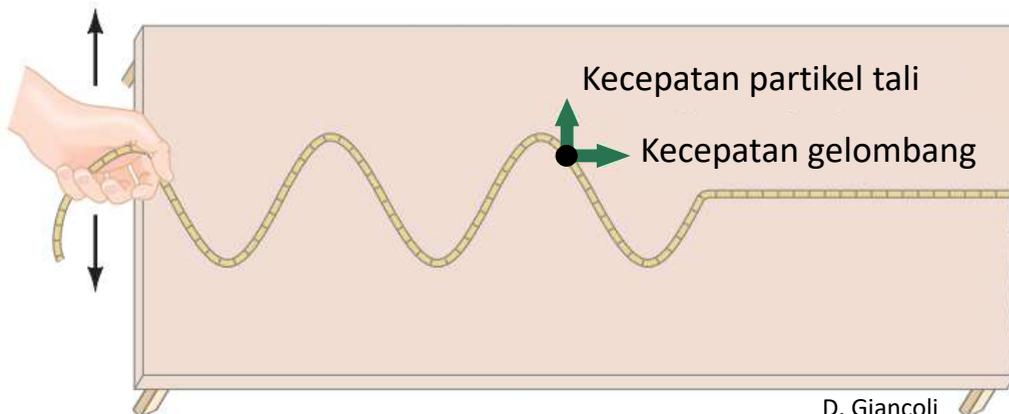
Gambar 5.9 Foto jam pendulum

Massa m dari bandul pendulum tidak muncul pada Pers. 5.16 dan 5.17. Dengan demikian, kita memiliki hasil yang mengejutkan bahwa periode dan frekuensi pendulum sederhana tidak bergantung pada massa bandulnya. Dari Pers. 5.16 juga dapat dilihat bahwa periode pendulum tidak bergantung pada amplitudo, selama nilai θ kecil.

5.5 Gerak gelombang

Jika kita melempar batu ke kolam air, maka akan terbentuk gelombang melingkar dan bergerak menyebar. Gelombang juga akan melakukan perjalanan sepanjang tali yang direntangkan lurus di atas meja jika kita menggetarkan satu ujungnya bolak-balik (lihat Gambar 5.10). Gelombang air dan gelombang pada tali adalah dua contoh umum **gelombang mekanik**, yang merambat sebagai osilasi materi (memerlukan media untuk merambat). Sebaliknya, gelombang elektromagnetik adalah jenis gelombang lain yang tidak memerlukan medium untuk merambat (akan dibahas pada subbab terkahir).

Jika kita menyaksikan gelombang laut yang bergerak menuju pantai, mungkin kita pernah berpikir bahwa gelombang itu membawa air dari jauh di laut lepas ke pantai. Padahal tidak demikian. Gelombang air bergerak dengan kecepatan tertentu, tetapi masing-masing partikel (molekul) dari air itu hanya berosilasi di sekitar titik kesetimbangan. Gelombang terdiri dari osilasi yang bergerak tanpa membawa materi bersamanya.



◀ **Gambar 5.10**
Gelombang berjalan pada sebuah tali. Partikel dari tali itu berosilasi naik turun di atas meja, sementara gelombang itu berjalan ke arah kanan sepanjang talinya.

Spotlight

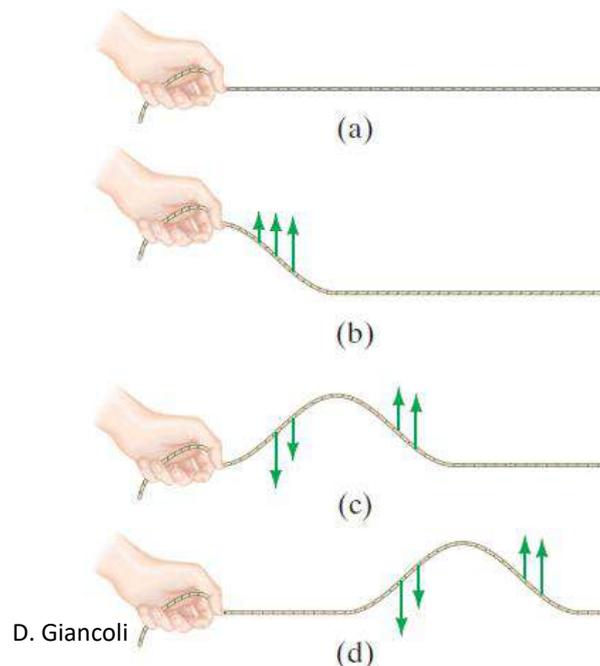
Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas mengenai gerak gelombang air.



Gelombang membawa energi dari satu tempat ke tempat lain. Tangan yang berosilasi pada Gambar 5.10 mentransfer energi ke tali, dan energi itu diangkut sepanjang tali dan dapat ditransfer ke obyek di ujung yang satu lagi. Semua bentuk gelombang berjalan akan membawa energi.

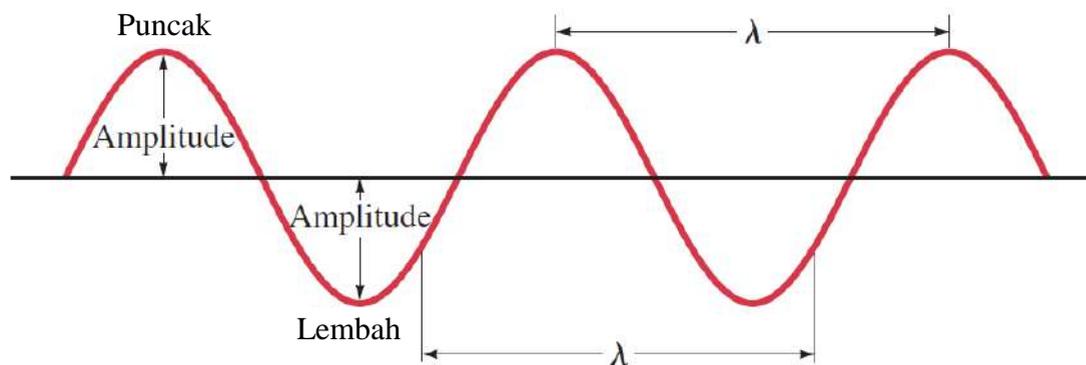
Bagaimana gelombang terbentuk dan bagaimana ia menjadi “berjalan”? Ini dimulai dari tangan yang menarik salah satu ujung tali ke atas dan menyebabkan setiap bagian berikutnya dari tali itu bergerak ke atas, puncak gelombang bergerak ke kanan, (lihat Gambar 5.11) sepanjang kabel tersebut dengan kecepatan tertentu. Tali adalah medium yang dilalui pulsa gelombang. Gambar 5.11 menunjukkan puncak pulsa gelombang yang bergerak.

Gambar 5.11 Sebuah pulsa gelombang yang dihasilkan dengan tangan dengan menggerakannya naik-turun satu kali. Panah-panah menunjukkan kecepatan partikel-partikel tali itu.



Sebuah gelombang kontinu atau gelombang periodik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.10, memiliki sumber gangguan yang kontinu dan berosilasi; artinya, sumbernya adalah getaran atau osilasi. Contoh lainnya adalah gelombang air yang dapat dihasilkan oleh tangan kita yang bergetar di permukaan.

Sumber gelombang apapun, maka adalah getaran, dan gelombang adalah getaran yang merambat ke luar. Gambar 5.12 menunjukkan beberapa kuantitas penting yang digunakan untuk menggambarkan gelombang periodik. **Amplitudo**, A , adalah ketinggian puncak atau kedalaman maksimum dari kesetimbangan. **Panjang gelombang**, λ , adalah jarak antara dua puncak berurutan. **Frekuensi**, f , adalah jumlah gelombang – siklus lengkap yang melewati sebuah titik tertentu per satuan waktu. **Periode**, T , sama dengan $1/f$ adalah waktu yang berlalu ketika dua puncak berturut-turut melewati titik yang sama pada ruang



▲ **Gambar 5.12** Karakteristik dari gelombang kontinu berfrekuensi sama yang bergerak sepanjang ruang

Laju gelombang, v , adalah laju dimana puncak gelombang (atau titik tetap lainnya pada bentuk gelombang) bergerak maju. Sebuah puncak gelombang bergerak sejauh satu panjang gelombang, λ , dalam waktu yang sama dengan satu periode, T . Sehingga besar laju gelombang itu (dalam satuan m/s) adalah

$$v = \lambda f$$

(5.18) ◀ ▶ Laju gelombang

Check My Understanding



Benar atau salah?

- 1 Kamu melihat gelombang air melewati ujung dermaga, dengan sekitar 0,5 s di antara puncak-puncaknya. Oleh karena itu periode gelombangnya adalah 0,5 s.
- 2 Sebuah gelombang merambat dengan kecepatan 300 m/s, panjang gelombangnya 75 m. Maka frekuensi gelombang tersebut adalah 2 Hz.

5.6 Gelombang transversal dan gelombang longitudinal

Spotlight

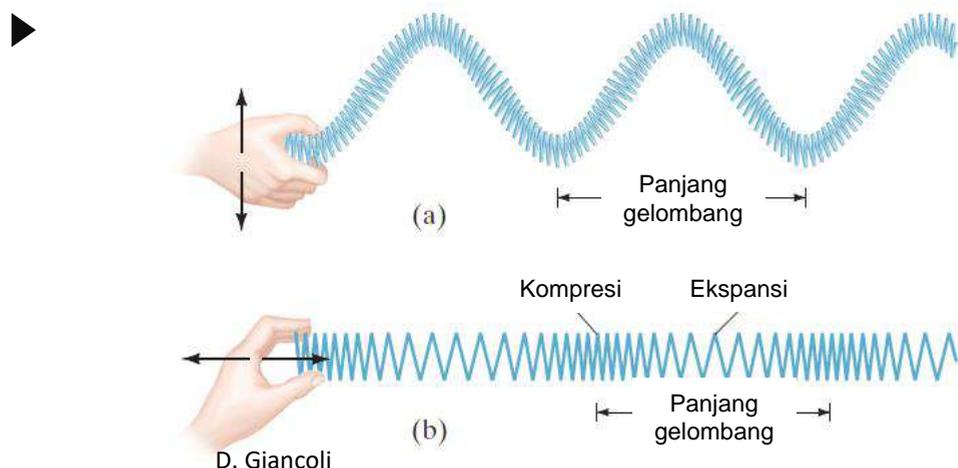
Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas perbedaan antara gelombang transversal dan longitudinal



Gelombang yang bergerak pada tali (Gambar 5.10), disebut **gelombang transversal**. Pada gelombang ini, gelombang bergerak sepanjang tali dari kiri ke kanan, sementara partikel tali bergetar bolak-balik dalam arah melintang (tegak lurus) terhadap gerakan gelombang itu sendiri. Jenis gelombang mekanis lain yaitu **gelombang longitudinal**, di mana getaran partikel medium adalah *sepanjang* arah gerak gelombang. Contohnya yaitu gelombang yang terbentuk pada pegas atau *slinky* yang dibentangkan dengan mengkompresi dan mengekspansi salah satu ujungnya secara bergantian.

Perbedaan gelombang transversal dan longitudinal ditunjukkan pada Gambar 5.13. Serangkaian kompresi (kumparannya sesaat berdekatan) dan ekspansi (kumparannya sesaat berjauhan) berjalan sepanjang pegas. Panjang gelombang adalah jarak antara kompresi berurutan (atau antara ekspansi berturut-turut), dan frekuensi adalah jumlah kompresi yang melewati suatu titik tertentu per detik. Laju gelombang adalah kecepatan di mana masing-masing kompresi tampak bergerak, $v = \lambda f$

Gambar 5.13 (a) Gelombang transversal, (b) gelombang longitudinal



Laju gelombang transversal

Laju gelombang tergantung pada sifat mediumnya, misalnya kecepatan gelombang transversal pada tali tergantung pada ketegangan tali, F_T , dan massa per satuan panjang dari tali, μ ($\mu = m/\ell$). Untuk gelombang amplitudo kecil, Laju gelombang adalah

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

(5.19) ◀ ▶ Laju gelombang transversal pada tali

Artinya, semakin besar tegangan tali, semakin besar kelajuannya; sebaliknya, semakin besar massa per satuan panjang (semakin berat tali), semakin lambat gelombang akan menyebar.



Example

Gelombang yang panjang gelombangnya 0,25 m merambat di tali sepanjang 200 m yang massa totalnya 10 kg. Jika tali berada di bawah ketegangan 1000 N, berapa kecepatan dan frekuensi gelombang tersebut?

Penyelesaian

Kita gunakan persamaan 5.19 untuk mencari kecepatannya

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \sqrt{\frac{1000 \text{ N}}{(10 \text{ kg})/(200 \text{ m})}} = \sqrt{\frac{100 \text{ N}}{0,05 \text{ kg/m}}} = 140 \text{ m/s}$$

Frekuensi gelombangnya adalah

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{140 \text{ m/s}}{0,25 \text{ m}} = 560 \text{ Hz}$$

Laju gelombang longitudinal

Laju gelombang longitudinal memiliki wujud yang mirip dengan laju gelombang transversal pada tali, yaitu

$$v = \sqrt{\frac{\text{faktor gaya elastis}}{\text{faktor inersia}}}$$

Untuk gelombang longitudinal yang berjalan sepanjang batang panjang solid, lajunya adalah

Laju gelombang longitudinal pada batang panjang

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5.20a)$$

di mana E adalah modulus elastisitas dari materialnya dan ρ adalah densitasnya. Sementara untuk gelombang longitudinal yang berjalan di medium cairan atau gas adalah

Laju gelombang longitudinal di fluida

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (5.20b)$$

di mana B adalah modulus bulk dan ρ adalah densitas.



Application

Echolocation

Persepsi gelombang oleh hewan (seperti kelelawar, lumba-lumba, dan paus bergigi) dengan menggunakan pulsa suara (gelombang longitudinal).



Example

Gelombang *echolocation* hewan laut dapat memiliki frekuensi sekitar 100.000 Hz. (a) Perkirakan panjang gelombang *echolocation* hewan laut itu. (b) jika rintangan berada 150 m dari hewan, berapa lama setelah hewan memancarkan gelombang pantulannya akan terdeteksi? (modulus bulk dan densitas air laut berturut-turut adalah $2,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan $1,025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

Penyelesaian

a) Cari terlebih dahulu laju gelombang suara (longitudinal)

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2}{1,025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}} = 1,4 \times 10^3 \text{ m/s}$$

kemudian panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{(1,4 \times 10^3 \text{ m/s})}{(1,0 \times 10^5 \text{ Hz})} = 14 \text{ mm}$$

b) Waktu tempuh perjalanan bolak-balik di antara hewan dan objek adalah

$$t = \frac{\text{jarak}}{\text{laju}} = \frac{2(150 \text{ m})}{1,4 \times 10^3 \text{ m/s}} = 0,21 \text{ s}$$



Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat penjelasan lebih detail mengenai *echolocation* (khususnya pada lumba-lumba)



5.7 Pemantulan dan transmisi gelombang

Gelombang berjalan menggambarkan gelombang yang berjalan melalui medium seragam tanpa berinteraksi dengan apa pun di sepanjang mediumnya. Sekarang kita pertimbangkan bagaimana gelombang berjalan ketika menghadapi perubahan media. Misalnya, perhatikan pulsa gelombang yang berjalan pada tali yang ditetapkan/dimatikan pada sebuah penopang pada salah satu ujungnya, seperti pada Gambar 5.14 a. Ketika pulsa mencapai ujung tetap itu, pulsa gelombang mengalami **pemantulan**; yaitu, pulsa bergerak kembali sepanjang tali ke arah yang berlawanan secara terbalik. Hal ini terjadi karena ketika ujungnya ditetapkan pada sebuah penopang, pulsa yang mencapai ujung tetap itu

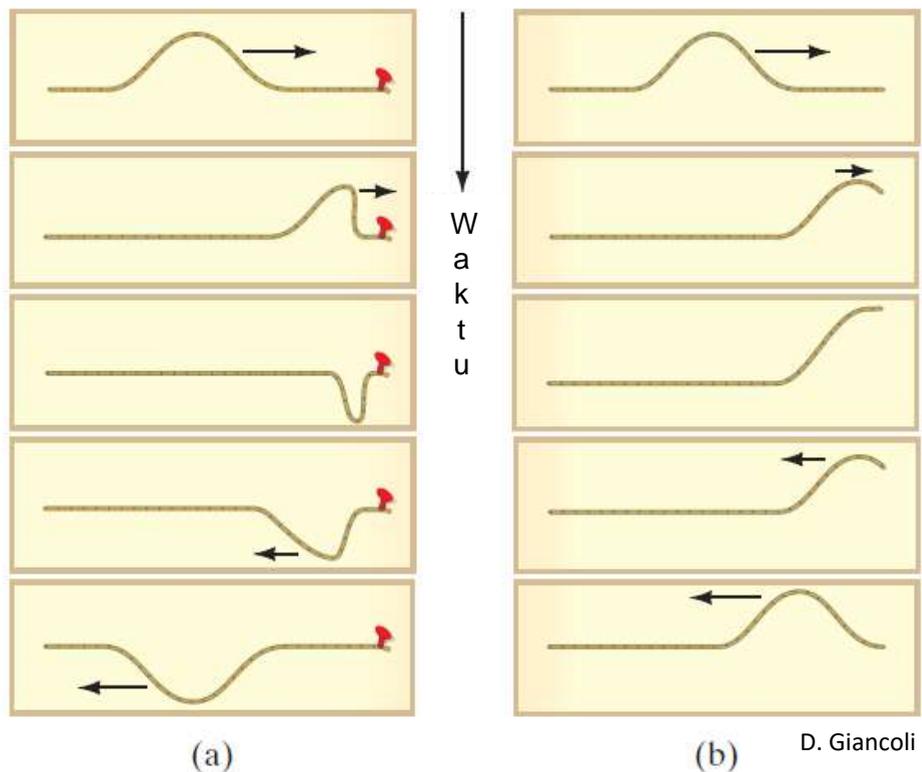


Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas bagaimana pemantulan gelombang terjadi



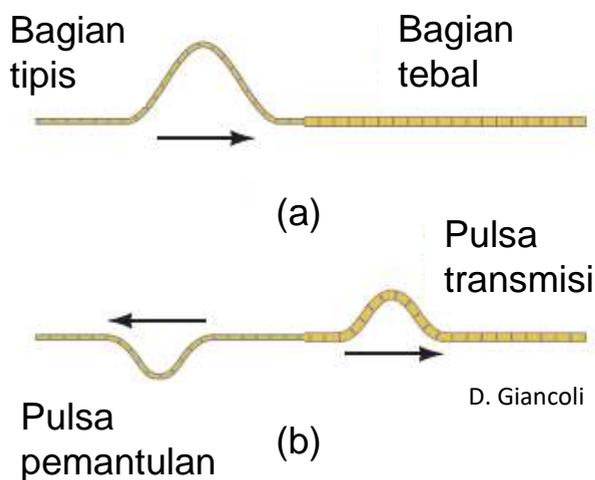
memberikan gaya (ke atas) pada penopang itu. Penopang kemudian mengerahkan kekuatan yang sama tetapi berlawanan ke bawah terhadap tali (hukum ketiga Newton) yang menyebabkan pulsa terpancung terbalik. Namun, jika ujung tali bebas bergerak seperti pada Gambar 5.14b, maka pulsa gelombang tersebut berjalan kembali sama tegak tanpa terbalik. Pada kasus ini, tegangan pada ujung tali yang bebas dipertahankan dan tali bebas meluncur vertikal ke atas, di mana saat mencapai ujung, pulsa memberikan gaya pada ujung tali yang bebas dan menyebabkan tali bergerak ke atas. Ujung tali yang bebas ini naik setinggi pulsa yang masuk, dan kemudian komponen gaya tegangan yang menurun menarik ujung tali kembali ke bawah. Gerakan ujung tali ini menghasilkan pulsa yang dipantulkan tidak terbalik dan memiliki amplitudo yang sama dengan pulsa yang masuk.



D. Giancoli

▲ **Gambar 5.14** Pemantulan sebuah pulsa gelombang yang berjalan sepanjang tali (a) ujung adalah tetap pada penopang, (b) ujung tali bebas bergerak

Berikutnya pertimbangkan pulsa yang bergerak disepanjang tali dengan dua sisi yang berbeda. Dalam kasus ini, sebagian energi pulsa yang datang dipantulkan dan sebagian mengalami transmisi; yaitu, sebagian energi melewati batas antara dua bagian itu. Misalnya, seutas tali terdiri dari bagian lebih tipis dan bagian yang tebal (Gambar 5.15). Ketika pulsa yang bergerak pada tali tipis mencapai batas antara dua bagian ini, sebagian pulsa dipantulkan dan dibalikkan dan sebagian ditransmisikan ke tali yang lebih tebal.



▲ **Gambar 5.15** (a) Ketika sebuah pulsa gelombang berjalan ke arah kanan sepanjang tali tipis (b) ia mengalami diskontinuitas di mana kabel itu menjadi lebih tebal dan berat, sehingga sebagian dipantulkan dan sebagian ditransmisikan

Pulsa yang dipantulkan memiliki amplitudo yang lebih kecil daripada pulsa yang datang. Energi yang dibawa oleh gelombang terkait dengan amplitudonya. Menurut prinsip kekekalan energi, ketika pulsa terpecah (dipantulkan dan ditransmisikan), jumlah energi kedua pulsa ini harus sama dengan energi pulsa yang datang. Untuk kasus kedua, ketika pulsa yang bergerak pada tali yang lebih tebal mengenai batas antara tali yang tebal dan tali yang tipis, sebagian dipantulkan dan sebagian lagi ditransmisikan. Dalam kasus ini, pulsa yang dipantulkan tidak terbalik.



Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas mengenai gelombang yang berjalan dari tali yang lebih tipis ke tali yang lebih tebal dan sebaliknya (dari tali yang lebih tebal ke tali yang lebih tipis)



5.8 Interferensi gelombang

Banyak fenomena gelombang yang unik dan tidak bisa dijelaskan dengan hanya satu gelombang yang berjalan. Melainkan kita harus menganalisis fenomena ini dalam bentuk kombinasi gelombang yang berjalan satu sama lain. Seperti yang kita tahu bahwa gelombang memiliki perbedaan yang mencolok dari partikel karena gelombang dapat digabungkan di daerah ruang yang sama. Untuk menganalisis kombinasi gelombang tersebut, kita menggunakan prinsip superposisi:

Prinsip
superposisi
gelombang



Jika dua atau lebih gelombang berjalan melalui suatu medium, nilai resultan fungsi gelombang pada setiap titik adalah jumlah aljabar dari nilai fungsi gelombang masing-masing.

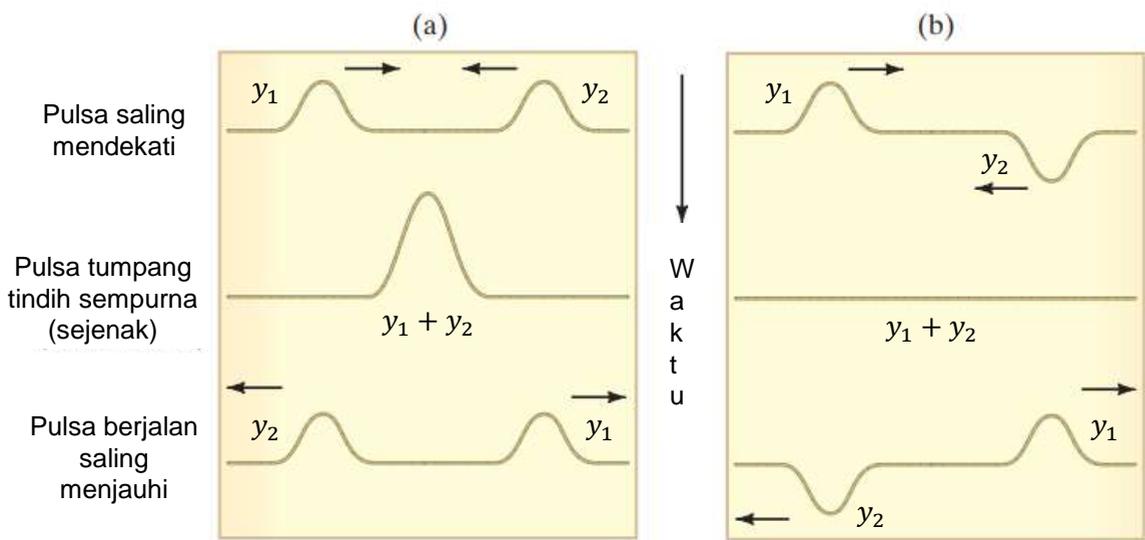


Application

Noise-cancelling headphones

Dengan menghasilkan gelombang suara dengan fase yang berlawanan dengan noise yang tidak diinginkan, kedua gelombang tersebut dapat saling meniadakan, sehingga menghasilkan keheningan.

Salah satu konsekuensi dari prinsip superposisi adalah bahwa dua gelombang yang berjalan dapat melewati satu sama lain tanpa hancur atau bahkan berubah. Perhatikan, misalnya, dua pulsa gelombang pada tali yang berjalan menuju satu sama lain seperti ditunjukkan pada Gambar 5.16. Fungsi gelombang untuk pulsa yang bergerak ke kanan adalah y_1 , dan fungsi gelombang untuk pulsa yang bergerak ke kiri adalah y_2 . Pulsa memiliki kecepatan yang sama tetapi bentuk yang berbeda. Ketika gelombang saling tumpang tindih, fungsi gelombangnya menjadi $y_1 + y_2$, dan kemudian pulsa akhirnya terpisah dan terus bergerak ke arah aslinya. Perhatikan bahwa bentuk pulsa tetap tidak berubah setelah berinteraksi, seolah-olah kedua pulsa tidak pernah bertemu. Kombinasi gelombang di ruang yang sama pada waktu yang sama untuk menghasilkan gelombang resultan disebut **interferensi**.



D. Giancoli

▲ **Gambar 5.16** Dua pulsa gelombang saling melewati. Di mana kedua pulsa ini tumpang-tindih, muncul interferensi (a) konstruktif dan (b) dekonstruktif.

Untuk dua pulsa yang ditunjukkan pada Gambar 5.16a, perpindahannya berada dalam arah y positif untuk kedua pulsa, dan pulsa resultan (yang dihasilkan ketika pulsa-pulsa tunggal saling tumpang tindih) menunjukkan amplitudo yang lebih besar daripada masing-masing pulsa. Karena perpindahan yang disebabkan oleh dua pulsa berada dalam arah yang sama, kita menyebut superposisi ini sebagai **interferensi konstruktif**.

Sekarang perhatikan dua pulsa dengan perpindahan yang berlawanan (Gambar 5.16b). Ketika pulsa-pulsa ini saling tumpang tindih, pulsa yang dihasilkan menjadi nol, karena nilai y_1 positif dan y_2 negatif. Karena perpindahan yang disebabkan oleh kedua pulsa berada dalam arah yang berlawanan, kita menyebut superposisi ini sebagai **interferensi destruktif**. Prinsip superposisi merupakan inti dari model analisis yang disebut **gelombang dalam interferensi**. Dalam banyak situasi, baik dalam akustik maupun optik, gelombang bergabung menurut prinsip ini.



Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas mengenai interferensi konstruktif dan destruktif

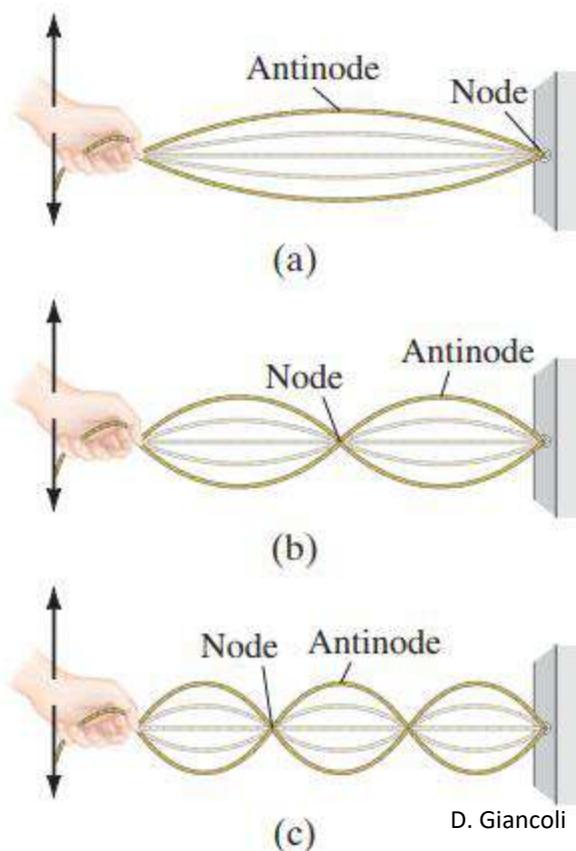


5.9 Gelombang stasioner

Jika kita menggoyangkan salah satu ujung tali sementara ujung lainnya tetap diam, gelombang akan terus bergerak menuju ujung yang diam dan kemudian dipantulkan kembali dengan arah terbalik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.14a. Saat kita terus mengosilasi tali, gelombang akan bergerak ke dua arah, dan gelombang yang menjauh dari tangan kita akan berinterferensi dengan gelombang yang dipantulkan. Hal ini biasanya menghasilkan banyak kekusutan. Namun, jika kita mengosilasi tali dengan frekuensi yang tepat, dua gelombang yang berjalan akan berinterferensi sedemikian rupa sehingga menghasilkan **gelombang stasioner** (*standing wave*) dengan amplitudo besar, seperti yang terlihat pada Gambar 5.17.

Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat gambaran lebih jelas mengenai terbentuknya gelombang stasioner pada tali



▲ **Gambar 5.17** Gelombang stasioner dengan tiga frekuensi resonansi

Gelombang ini disebut gelombang stasioner karena tidak terlihat bergerak. Tali tampak memiliki bagian yang berosilasi naik dan turun dalam pola yang tetap. Titik-titik di mana interferensi destruktif terjadi, sehingga tali tidak bergerak, disebut **simpul** (*node*). Sebaliknya, titik-titik di mana interferensi konstruktif terjadi, sehingga tali berosilasi dengan amplitudo maksimum, disebut **antisimpul** (*antinode*). Simpul dan antisimpul ini tetap berada di posisi yang sama pada frekuensi tertentu.

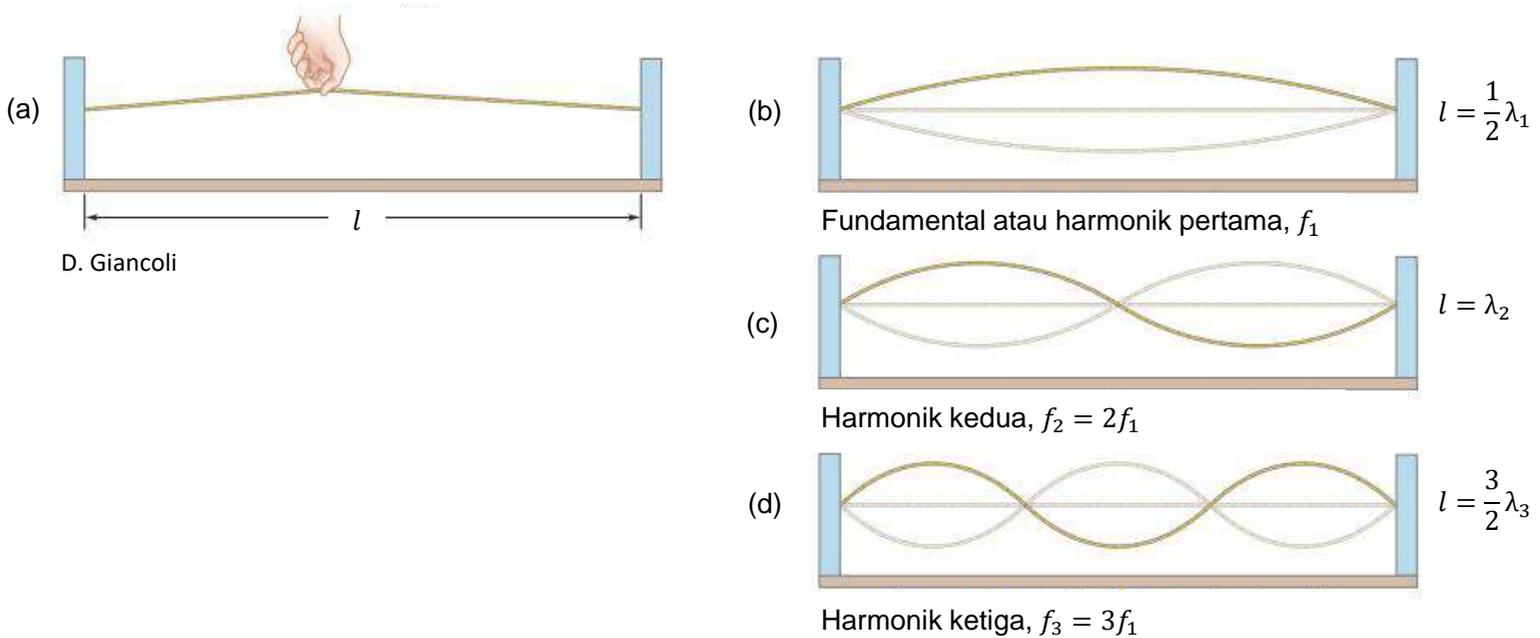
Gelombang stasioner dapat muncul pada beberapa frekuensi. Frekuensi terendah yang menghasilkan gelombang stasioner menciptakan pola yang terlihat pada Gambar 5.17a. Gelombang stasioner yang ditampilkan pada Gambar 5.17b dan 5.17c masing-masing dihasilkan pada dua kali dan tiga kali frekuensi terendah. Tali ini juga bisa berosilasi dengan empat loop (empat antisimpul) pada empat kali frekuensi terendah, dan seterusnya. Frekuensi yang menghasilkan gelombang stasioner disebut **frekuensi alami** atau **frekuensi resonansi** dari tali tersebut, dan pola gelombang stasioner yang berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 5.17 mencerminkan berbagai "modus resonansi getaran."

Sekarang, mari kita perhatikan tali yang membentang antara dua penopang, seperti dawai gitar atau biola, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.18a. Gelombang dengan berbagai frekuensi akan bergerak ke kedua arah sepanjang tali, dipantulkan di ujungnya, dan kemudian kembali ke arah yang berlawanan. Sebagian besar gelombang ini akan saling menginterferensi dan segera menghilang. Namun, gelombang yang sesuai dengan frekuensi resonansi tali tersebut akan tetap ada.

Check My Understanding

- 1 Jika sebuah dawai bergetar sebagai sebuah gelombang stasioner dalam tiga loop, adakah tempat di mana Anda dapat menyentuhnya dengan bilah pisau tanpa mengganggu gerakannya?

Beberapa modus resonansi yang mungkin dari getaran (gelombang stasioner) ditampilkan pada Gambar 5.18b,c, dan d. Secara umum, gerakannya merupakan kombinasi dari berbagai modus resonansi, tetapi hanya frekuensi yang sesuai dengan frekuensi resonansi yang akan terdeteksi.



▲ **Gambar 5.18** (a) Sebuah dawai dipetik, mode getaran tali membentuk (b) harmonik pertama, (c) harmonik kedua, dan (d) harmonik ketiga.

Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat penjelasan lebih detail mengenai gelombang stasioner pada tali.



Untuk menentukan frekuensi resonansi, kita perlu memperhatikan bahwa panjang gelombang dari frekuensi stasioner memiliki hubungan yang sederhana dengan panjang dawai l . Frekuensi terendah, yang dikenal sebagai **frekuensi fundamental**, sesuai dengan satu antisimpul (atau loop). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.18b, di mana panjang total dawai sama dengan setengah panjang gelombang. Dengan demikian, $l = \frac{1}{2}\lambda_1$, di mana λ_1 adalah panjang gelombang untuk frekuensi fundamental. Frekuensi alami lainnya disebut **overtone**; untuk dawai yang bergetar, frekuensi ini merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental, sehingga juga disebut harmonik, dengan frekuensi fundamental disebut **harmonik pertama**.

Mode getaran berikutnya yaitu **harmonik kedua** dengan panjang gelombang λ_2 (Gambar 5.18c), terjadi ketika panjang dawai sama dengan satu panjang gelombang, yaitu, ketika $\lambda_2 = l$. Dalam mode ini, kedua bagian dawai bergerak ke arah yang berlawanan pada saat tertentu, dan terkadang kita mengatakan bahwa terjadi dua putaran. Mode getaran berikutnya (Gambar 5.18d) adalah **harmonik ketiga** yang terjadi ketika panjangnya $l = \frac{3\lambda}{2}$; oleh karena itu, $\lambda_3 = \frac{2l}{3}$. Secara umum, panjang gelombang dari berbagai mode getaran dituliskan sebagai

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

(5.21a) ◀ ▶ Panjang gelombang getaran

Bilangan bulat n menandai nomor harmonik: $n = 1$ untuk fundamental, $n = 2$ untuk harmonik kedua, dan seterusnya.

Untuk menemukan frekuensi f dari setiap getaran kita memakai persamaan $f = v/\lambda$, sehingga

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2l} = n f_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(5.21b) ◀ ▶ Frekuensi getaran

Di mana $f_1 = v/\lambda_1 = v/2l$ adalah frekuensi fundamental. Kita melihat bahwa setiap frekuensi adalah hasil kali bilangan bulat dari frekuensi fundamental pada dawai yang bergetar.

Gelombang stasioner tampak diam di tempat. Istilah gelombang “stasioner” juga berarti dari sudut pandang energi. Karena dawai tidak bergerak pada simpul, tidak ada energi yang mengalir melewati titik ini. Oleh karenanya energi tidak ditransmisikan sepanjang dawai tapi “stasioner” di tempatnya pada dawai.

Check My Understanding

- 1 Jika dawai biola bergetar pada 440 Hz sebagai frekuensi fundamentalnya, berapa frekuensi empat harmonik pertamanya?

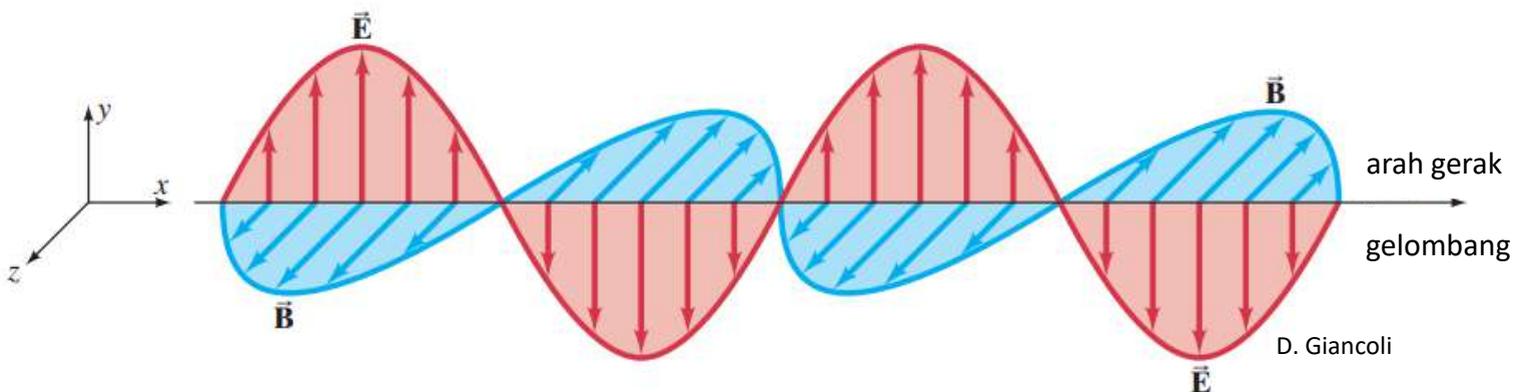
5.10 Gelombang elektromagnetik

Spotlight

Kunjungi link berikut untuk mendapat penjelasan lebih detail bagaimana gelombang elektromagnetik dapat merambat



Jika gelombang mekanik memerlukan medium untuk merambat (seperti gelombang suara), maka gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium untuk merambat. Gelombang elektromagnetik dapat menjelajahi angkasa yang vakum (hampa udara). Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang berosilasi. Kedua medan ini saling tegak lurus satu sama lain dan juga terhadap arah perambatan gelombang (Perhatikan Gambar 5.19). Contoh gelombang elektromagnetik adalah cahaya.

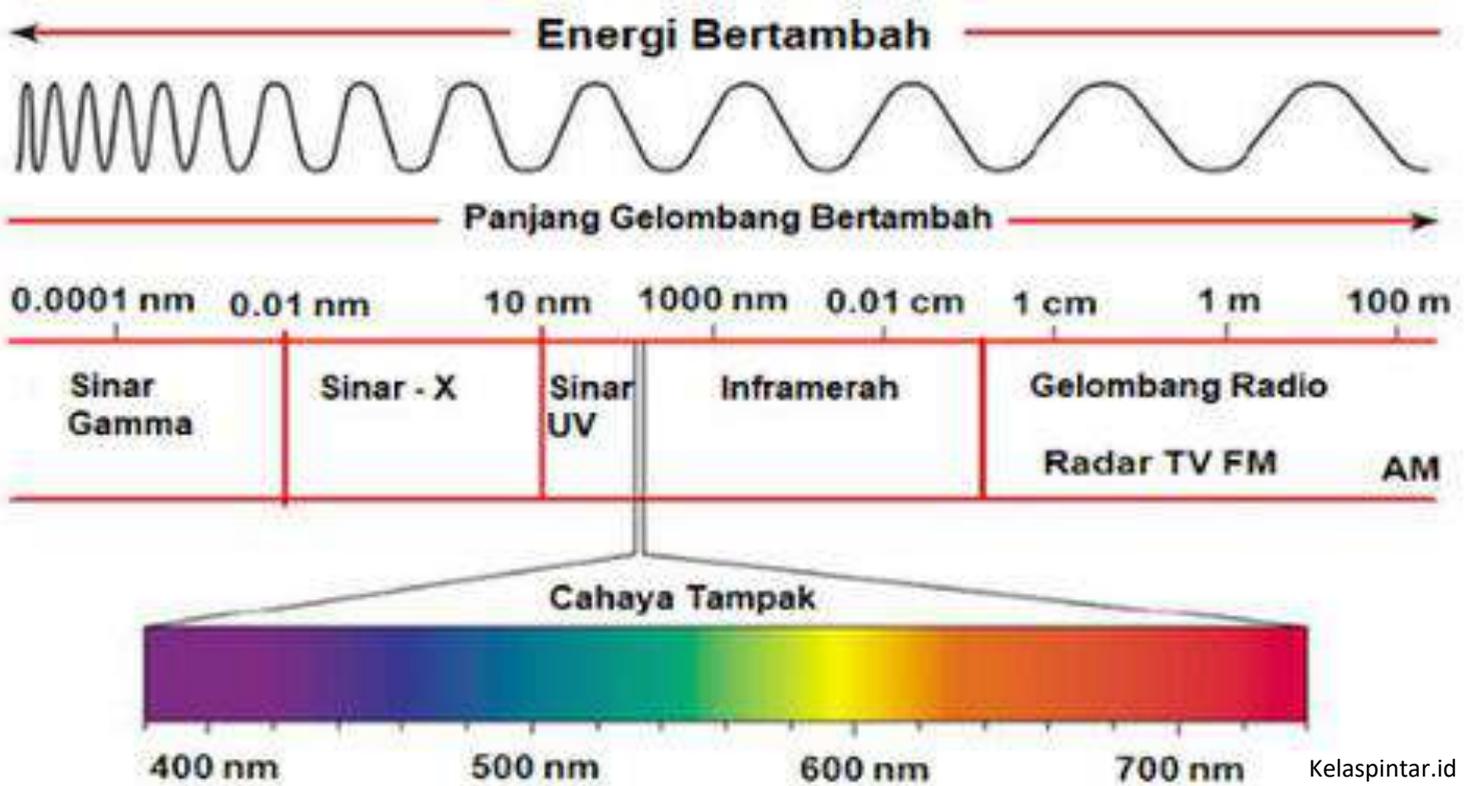


- ▲ **Gambar 5.19** Medan Listrik (\vec{E}) dan medan magnet (\vec{B}) pada gelombang elektromagnetik yang saling tegak lurus. Seluruh pola bergerak pada arah yang tegak lurus

Di ruang hampa (tanpa medium), gelombang elektromagnetik dapat bergerak bebas tanpa hambatan. Hal ini karena medan listrik dan medan magnet yang membentuk gelombang elektromagnetik saling menginduksi satu sama lain, sehingga memungkinkan gelombang tersebut untuk terus bergerak ke depan. Dalam ruang hampa, laju perambatan gelombang elektromagnetik adalah kecepatan cahaya yang bernilai sekitar 299,792,458 meter per detik (m/s)

Spektrum gelombang elektromagnetik

Spektrum elektromagnetik mencakup semua panjang gelombang dari gelombang elektromagnetik, dari yang terpanjang seperti gelombang radio hingga yang terpendek seperti sinar gamma. Gelombang elektromagnetik terdeteksi dalam interval yang lebar dan biasanya dikelompokkan seperti pada Gambar 5.20. ini dinamakan spektrum elektromagnetik.



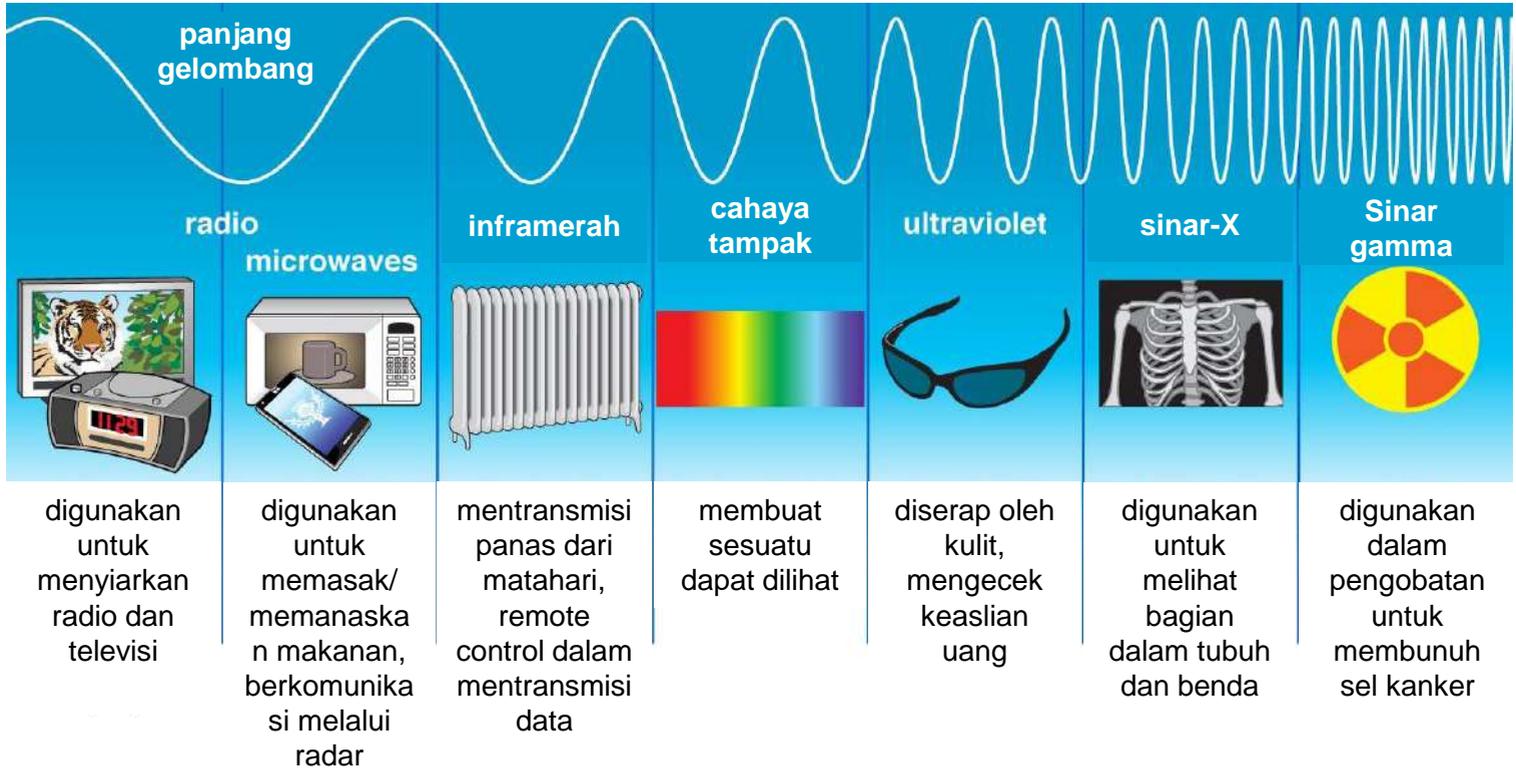
Kelaspintar.id

▲ **Gambar 5.20** Spektrum gelombang elektromagnetik

Seluruh spektrum gelombang elektromagnetik, dari panjang gelombang terpanjang hingga terpendek (dari frekuensi terendah hingga tertinggi), mencakup gelombang radio, radiasi inframerah, cahaya tampak, radiasi ultraviolet, sinar-X, dan sinar gamma. Rentang gelombang sebagian besar tidak terlihat oleh mata kita. Mata kita hanya melihat cahaya tampak, yang mencakup warna merah hingga ungu. Warna yang berbeda mewakili panjang gelombang yang berbeda.

Spektrum gelombang elektromagnetik tersebut dari gelombang radio hingga sinar gamma memiliki manfaat dalam kehidupan kita sehari-hari seperti ditunjukkan pada Gambar 5.21.

Britannica.com



▲ **Gambar 5.21** Manfaat dari tiap kelompok gelombang elektromagnetik

Cahaya yang biasa kita lihat (cahaya tampak) adalah gelombang elektromagnetik dan panjang gelombangnya bernilai antara 400 nm hingga 750 nm (1 nm = 10^{-9} m). Frekuensi dari gelombang dapat dihitung dengan

Frekuensi gelombang

$$\leftarrow \blacktriangleright \quad c = \lambda f \quad (5.22)$$

Di mana f dan λ adalah frekuensi gelombang dan panjang gelombang. Di sini c adalah laju cahaya, $3,00 \times 10^8$ m/s; digunakan simbol c karena sifatnya yang universal untuk seluruh gelombang elektromagnetik di ruang vakum. Persamaan di atas mengatakan kepada kita bahwa frekuensi cahaya tampak bernilai antara $4,0 \times 10^{14}$ Hz hingga $7,5 \times 10^{14}$ Hz.



Example

Hitung panjang gelombang dari

- Gelombang elektromagnetik 60 Hz
- Gelombang radio FM 93,3 MHz
- Berkas sinar tampak berwarna merah berfrekuensi $4,74 \times 10^{14}$ Hz dari laser

Penyelesaian

$$\text{a) } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{60 \text{ s}^{-1}} = 5,0 \times 10^6 \text{ m}$$

atau 5000 km. 60 Hz adalah frekuensi arus ac di Amerika Serikat, dan, seperti kita lihat di sini, satu panjang gelombang dapat dibentangkan di atas Amerika Serikat.

$$\text{b) } \lambda = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{9,3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 3,22 \text{ m}$$

$$\text{c) } \lambda = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{4,74 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 6,33 \times 10^{-7} \text{ m atau } 633 \text{ nm}$$

Check My Understanding



- Sebuah gelombang elektromagnetik memiliki frekuensi $7,14 \times 10^{14}$ Hz. Berapa panjang gelombangnya, dan ke mana kita dapat mengklasifikasannya?



Problems

- 1 Sebuah benda mengalami gerak harmonik sederhana. Jika jarak antara puncak dengan lembah adalah 0,25 m, berapa besar nilai satu panjang gelombangnya, λ ?
- 2 Pegas dari mobil 1700 kg terkompresi 7,0 mm ketika sopir 65 kg berada di kursi pengemudi. Jika mobil berjalan di atas gundukan, berapa frekuensi osilasinya?
- 3 Sebuah massa m di ujung sebuah pegas berosilasi dengan frekuensi 0,76 Hz. Ketika ditambahkan massa 800 g terhadap massa m maka frekuensinya 0,50 Hz. Berapakah nilai m ?
- 4 Sebuah massa 1,15 kg berosilasi menurut persamaan $x = 0,650 \cos(8,40t)$ di mana x dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan (a) amplitudo, (b) frekuensi, dan (c) total energi
- 5 Harus berapa panjangkah sebuah pendulum sederhana agar membuat tepat satu ayunan per sekon? (Artinya, satu osilasi lengkap memerlukan tepat 2,0 s)
- 6 Berapakah periode dari sebuah pendulum sederhana yang panjangnya 50 cm di Bumi?
- 7 Seorang nelayan memperhatikan bahwa puncak gelombang melewati haluan perahunya yang tertambat setiap 2,0 s. Ia mengukur jarak antar dua puncak adalah 5,0 m. Seberapa cepatkah gelombang-gelombang itu bergerak?
- 8 Sebuah dawai bergetar dalam empat loop pada frekuensi 240 Hz. Berikan sekurang-kurangnya tiga frekuensi lain di mana ia juga akan bergetar. Apa nama dari masing-masingnya?
- 9 Berapa frekuensi gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang 1,50 cm?
- 10 Berapa panjang gelombang sinyal radar $22,75 \times 10^9$ Hz? Berapa frekuensi sinar-X yang memiliki panjang gelombang 0,12 nm?

Sebuah objek yang berosilasi akan mengalami **gerak harmonik sederhana** jika gaya pemulihnya adalah proporsional terhadap perpindahannya,

$$F = -kx \quad (5.1)$$

Perpindahan maksimum dari kesetimbangan disebut sebagai **amplitudo**, A .

Periode, T , adalah waktu yang diperlukan untuk satu siklus osilasi, dan **frekuensi**, f , adalah jumlah siklus per sekon; keduanya saling berkaitan,

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.2)$$

Selama gerak harmonik sederhana, total energinya

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (5.3)$$

Periode osilasi dari sebuah massa m pada ujung sebuah pegas ditentukan menurut

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.9)$$

Sebuah pendulum sederhana pada amplitudo kecil, periodenya

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5.16)$$

Laju gelombang (seberapa cepat gerakan sebuah puncak) adalah

$$v = \lambda f \quad (5.18)$$

Pada **gelombang transversal**, osilasinya tegak lurus terhadap arah gerak gelombangnya. Contohnya adalah gelombang pada sebuah tali.

Pada **gelombang longitudinal**, osilasinya sepanjang (paralel terhadap) geraknya. Contohnya adalah suara.

ketika dua gelombang melewati daerah yang sama pada saat yang sama, mereka saling **berinterferensi**.

Ketika sebuah tali diosilasi dengan frekuensi yang tepat, dua gelombang yang berjalan akan berinterferensi sedemikian rupa dan menghasilkan **gelombang stasioner**.

Medan listrik dan medan magnet pada gelombang elektromagnetik saling tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Hubungan antara panjang gelombang, frekuensi, dan kecepatannya,

$$c = \lambda f \quad (5.22)$$



References

- Giancoli, Douglas C. (2014). *Fisika: Prinsip dan Aplikasi Jilid 1*. Erlangga: Medan.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (1990). *FISIKA Jilid 1* (Edisi 3). Erlangga: Jakarta.
- Serway, R.A. & Jewett, J.W. (2013). *Principles of Physics* (5th Edition). Brooks/Cole: United States.
- Sihombing, Y. A., (2022). *Mekanika Klasik Jilid 1*. Merdeka Kreasi: Medan.
- Tipler, Paul A. (1998). *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid 1*. Erlangga: Jakarta
- Young, Hugh D., Freedman, Roger A., Ford, Albert L. (2004). *Sears dan Zemansky FISIKA UNIVERSITAS Jilid 1* (Edisi 10). Erlangga: Jakarta



Answers

- 1 0,5 m
- 2 6 Hz
- 3 2,34 kg
- 4 (a) 0,65 m
(b) 1,34 Hz
(c) 17,1 J
- 5 1 m
- 6 1,4 s
- 7 2,5 m/s
- 8 $f_1 = 60$ Hz; harmonik pertama
 $f_2 = 120$ Hz; harmonik kedua
 $f_3 = 180$ Hz; harmonik ketiga
- 9 2×10^9 Hz
- 10 1,32 cm; $2,5 \times 10^{18}$ Hz