Diterjemahkan dari bahasa Inggris ke bahasa Indonesia - www.onlinedoctranslator.com

awak kapal NOAA (NASIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION) MENYEBARKAN BUOY DART (DEEP-OCEAN ASSESSMENT AND REPORTING OFTSUNAMIS) DI PASIFIK UTARA.THE DESEMBER 2004 INDIAN OCEAN-GEMPA BUMI DARI

RATUSAN RIBU HIDUP. PERANGKAT PENDETEKSI TSUNAMI SEPERTI PANAH DAPAT MEMBANTU MENCEGAH KEHILANGAN BENCANA TIPE INI DENGAN MEMPERdiksi GELOMBANG RAKSASA AKAN MENEMBAK TANAH. ***(Atas perkenan NOAA dan Lembaga Oseanografi Cabang Pelabuhan.)***

CHAPTER 5

Gelombang Perjalanan

15-1 Gerakan Gelombang Sederhana
15-2 Gelombang Periodik
15-3 Gelombang dalam Gelombang
15-4 Tiga Dimensi Menghadapi
15-5 Hambatan Efek Doppler

? Mengapa gelombang tsunami bergerak jauh lebih cepat daripada gelombang permukaan laut? (Lihat Contoh 15-2.)

Saya n Bab 14, kita melihat gerakan osilasi dan hal-hal yang bergerak dengan pola berulang. Dalam bab ini, kita masih membahas tentang osilasi, tetapi kita mengeksplorasi fisika gelombang. Gelombang merambat melalui berbagai media, seperti air, udara, dan tanah, dan merambat melalui ruang di mana tidak ada medium untuk merambat. Pikirkan gelombang laut, musik, gempa bumi, dan sinar matahari. Ombak *melakukan* mengangkut energi dan momentum, tetapi tidak *bukan* masalah transportasi. Studi tentang gerakan gelombang telah menghasilkan banyak penemuan menarik. Senjata radar polisi dan pembuka pintu garasi keduanya menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mencapai tujuan yang sangat berbeda—menentukan kecepatan pengendara dan membuka pintu dari jarak beberapa meter. Peralatan sonografi, yang menggunakan gelombang ultrasonik, memungkinkan profesional medis untuk mendapatkan gambar yang luar biasa seperti janin dalam rahim ibunya. Pemahaman tentang bagaimana gelombang bertindak ketika dihadapkan dengan rintangan membantu arsitek aula pertunjukan untuk menciptakan pengaturan akustik terbaik untuk konser dan simfoni.

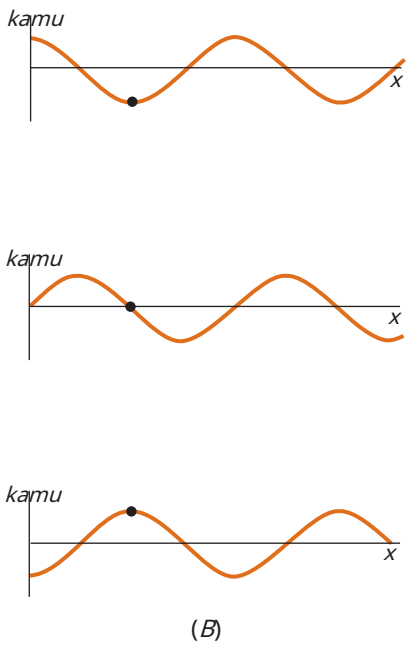
Dalam bab ini, kita membahas gerak gelombang sederhana. Kami memeriksa gelombang periodik, khususnya gelombang harmonik. Kami juga membahas bagaimana gelombang bergerak dalam tiga dimensi dan mengeksplorasi apa yang terjadi ketika gelombang menghadapi rintangan. Akhirnya, kita melihat efek Doppler dan mendiskusikan relevansinya dengan dunia di sekitar kita.

15-1 GERAK GELOMBANG SEDERHANA

GELOMBANG TRANSVERS DAN LONGITUDINAL

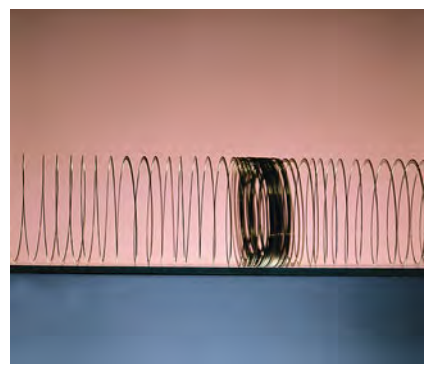
Gelombang mekanik disebabkan oleh gangguan dalam medium. Misalnya, ketika seutas tali dipetik, gangguan yang dihasilkan merambat sepanjang tali sebagai gelombang. Gangguan dalam hal ini adalah perubahan bentuk dawai dari bentuk setimbangnya. Perambatannya muncul dari interaksi setiap segmen string dengan segmen yang berdekatan. Segmen-segmen string bergerak dalam arah melintang ke (tegak lurus) string sebagai pulsa merambat bolak-balik sepanjang string. Gelombang seperti ini, di mana gerakan medium (dawai) tegak lurus terhadap arah rambat gangguan, disebut**melintang**gelombang (Gambar 15-1). Gelombang yang gerak mediumnya searah (sejajar) dengan arah rambat gangguan disebut**membujur** gelombang (Gambar 15-2). Gelombang bunyi merupakan contoh gelombang longitudinal. Ketika suara merambat melalui medium (gas, cairan, atau padatan) molekul medium berosilasi (bergerak maju mundur) sepanjang garis rambat, secara bergantian memampatkan dan memperhalus (memperluas) medium.

(A)



(*B*)

GAMBAR 1 5 - 1 (*A*) Pulsa gelombang transversal pada pegas. Gerak medium perambatan tegak lurus terhadap arah gangguan gerak. (*B*) Tiga penggambaran gelombang transversal berturut-turut pada seutas tali yang merambat ke kanan. Sebuah elemen tali (titik hitam) bergerak naik dan turun saat gelombang bergerak ke kanan.*(Richard Menga/Foto Fundamental.)*



ANGKA 1 5 - 2 Gelombang longitudinal pulsa pada pegas. Gangguan tersebut sejajar dengan arah gerak gelombang.*(Richard Menga/Fundamental Foto.)*

pulsa gelombang

Gambar 15-3*A* menunjukkan pulsa pada string pada waktu T - 0. Bentuk string saat ini dapat diwakili oleh beberapa fungsi y - f(x). Beberapa waktu kemudian (Gambar 15-3*B*), pulsa lebih jauh ke bawah string. Dalam sistem koordinat baru dengan asalHAI yang bergerak ke kanan dengan kecepatan yang sama dengan pulsa, pulsa itu diam. String dijelaskan dalam bingkai ini olehf(x) untuk semua waktu. NSx koordinat dari dua kerangka acuan dihubungkan oleh

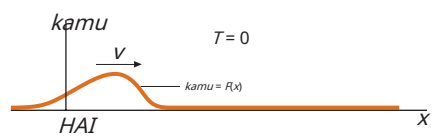
$$x - x - vt$$

jadi f(x) - f(x - vt). Jadi, bentuk tali pada kerangka aslinya adalah

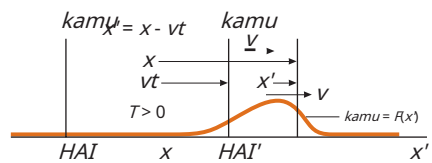
$$y - f(x - vt) \qquad \text{gelombang bergerak di x arah} \qquad 15\text{-}1$$

Garis penalaran yang sama untuk denyut nadi yang bergerak ke kiri mengarah ke

$$y - f(x\ vt) \qquad \text{gelombang bergerak di -x arah} \qquad 15\text{-}2$$



(*A*)



(*B*)

ANGKA 1 5 - 3

Dalam kedua ekspresi, v adalah kecepatan rambat gelombang. (Karenav adalah kecepatan dan bukan kecepatan, itu selalu merupakan kuantitas positif.) Fungsi y - f(x - vt) disebut **fungsi gelombang.** Untuk gelombang pada tali, fungsi gelombang menyatakan perpindahan transversal tali. Untuk gelombang suara di udara, fungsi gelombang dapat berupa perpindahan longitudinal molekul udara, atau tekanan udara. Fungsi gelombang ini adalah solusi dari persamaan diferensial yang disebut*persamaan gelombang,*yang dapat diturunkan dengan menggunakan hukum Newton.

KECEPATAN GELOMBANG

Sifat umum gelombang adalah bahwa kecepatannya relatif terhadap medium bergantung pada sifat medium, tetapi tidak bergantung pada gerakan sumber gelombang. Misalnya, kecepatan suara dari klakson mobil hanya bergantung pada sifat-sifat udara dan bukan pada gerak mobil.

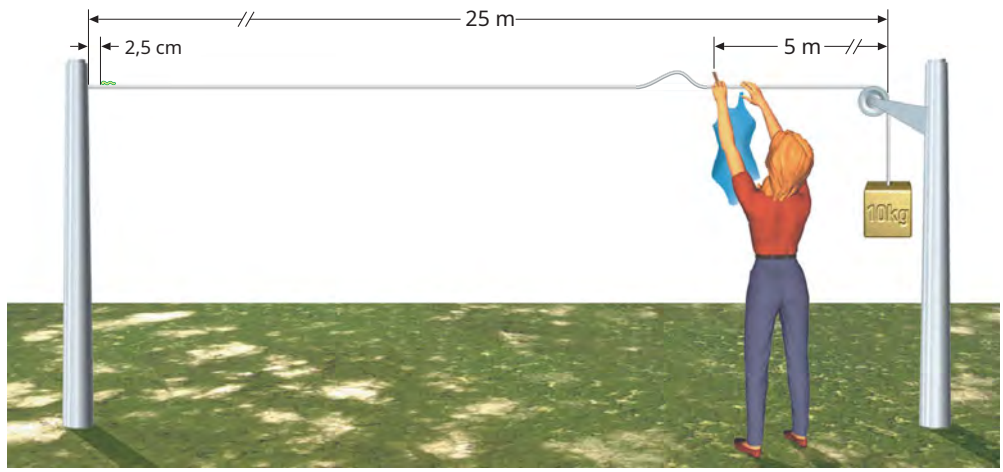
Untuk pulsa gelombang pada tali, kita dapat menunjukkan bahwa semakin besar tegangan, semakin cepat rambat gelombang. Selanjutnya, gelombang merambat lebih cepat di tali ringan daripada tali berat di bawah ketegangan yang sama. JikaF adalah tegangan (kami menggunakan Fdaripada T untuk F_T ketegangan karena kami menggunakan T untuk periode tersebut) dan M adalah rapat massa linier (massa per satuan panjang), maka cepat rambat gelombang adalah

$$v - \sqrt{\frac{F_T}{M}} \qquad 15\text{-}3$$

KECEPATAN GELOMBANG PADA SEBUAH STRING

Contoh 15-1 Inchy Berlari untuk Hidupnya

Inchy, seekor cacing inci, beringsut di sepanjang tali jemuran kapas (Gambar 15-4). Tali jemuran yang panjangnya 25 m memiliki massa 1,0 kg dan ditahan dalam keadaan tegang oleh sebuah benda gantung bermassa 10 kg, seperti pada gambar. Vivian sedang menggantung baju renangnya 5,0 m dari satu ujung ketika dia melihat Inchy 2,5 cm dari ujung yang berlawanan. Dia mencabut tali yang mengirimkan denyut nadi setinggi 3,0 cm yang menakutkan ke arah Inchy. Jika Inchy merangkak dengan kecepatan 1,0 in>s, apakah dia akan sampai ke ujung tali jemuran sebelum denyut nadi mencapainya?



GAMBAR 1 5 - 4

GAMBAR Kita butuh ke mengetahui seberapa cepat gelombang merambat. Untuk mencari cepat rambat gelombang kita menggunakan rumus$_{T}$ - 2F >M. Membiarkan *M* - 0,25 kg adalah massa tali dan *M* - 10 kg adalah massa benda yang digantung.

MENYELESAIKAN

1. Kecepatan denyut nadi berhubungan dengan tegangan F dan kepadatan massa M: $v - \sqrt{\frac{F_T}{M}}$

2. Nyatakan kerapatan massa dan tegangan dalam parameter yang diberikan: $M - \frac{M_S}{L}$ dan $F_T - mg$

3. Substitusikan nilai-nilai ini untuk menghitung kecepatan: $v - \sqrt{\frac{F_T}{M}} - \sqrt{\frac{mgL}{M_S}} - \sqrt{\frac{(10\ kg)(9{,}81\ m>s^2)(25\ m)}{1{,}0\ kg}}$

$- 49{,}5\ m>s$

4. Gunakan kecepatan ini untuk mencari waktu bagi pulsa untuk menempuh jarak 20 m ke ujung terjauh: $¢T - \frac{¢x}{v} - \frac{20\ m}{49{,}5\ detik} - 0{,}40\ detik$

5. Hitung waktu yang diperlukan Inchy untuk menempuh jarak 2,5 cm sampai akhir perjalanan di 1,0 di> s:

$$¢T - \frac{¢x}{v} - \frac{2{,}5\text{ cm}}{1\text{ di>s}}\ \frac{1\text{ inci}}{2{,}54\text{ cm}} - 0{,}98\text{ detik}$$

$¢T$ ¢*T* Inchy tidak mengalahkan denyut nadi.

MEMERIKSA Denyut nadi bergerak dengan kecepatan 49 m>s dan Inchy bergerak dengan kecepatan 1,0 in>s - 0,025 m>s. Denyut nadi bergerak hampir 2000 kali lebih cepat daripada cacing inci. Tidak heran Inchy tidak mengalahkan denyut nadi.

MASALAH LATIHAN 15-1 Tunjukkan bahwa satuan dari 2F >M adalah m>s ketika F dalam newton dan M dalam kg>m.

! Sementara pulsa gelombang pada Contoh 15-1 bergerak ke kiri pada 49 m>s, partikel-partikel yang membentuk tali tidak. Sebaliknya, mereka bergerak terlebih dahulu ke atas dan kemudian ke bawah saat denyut nadi melewati mereka.

Contoh 15-2 Kecepatan Gelombang Gravitasi Dangkal

Gelombang permukaan laut dimungkinkan karena gravitasi dan disebut *gelombang gravitasi.* Gelombang gravitasi disebut gelombang dangkal jika kedalaman air kurang dari setengah panjang gelombang. Kecepatan gelombang untuk gelombang gravitasi tergantung pada kedalaman dan diberikan olehv - 2gh, di mana H adalah kedalaman. Gelombang gravitasi di laut terbuka, di mana kedalamannya 5,0 km, memiliki panjang gelombang 100 km. (*A*) Berapakah cepat rambat gelombang tersebut? (*B*) Apakah gelombang tersebut merupakan gelombang dangkal?

GAMBAR Menggunakan $v - \sqrt{2gh}$ untuk menghitung kecepatan gelombang. Periksa untuk melihat apakah kedalamannya lebih besar dari setengah panjang gelombang yang ditentukan.

MENYELESAIKAN

(*A*) Menggunakan $v - \sqrt{2gh}$, menghitung kecepatan gelombang:

$$v - \sqrt{2gh} - \sqrt{4(9{,}81\ \text{m>s}_2)(5000\text{ m})} -$$

221 m>s - 797 km>j

(*B*) Gelombang adalah gelombang dangkal jika kedalamannya kurang dari setengah panjang gelombang yang ditentukan:

$$\frac{H}{\text{aku}} - \frac{5\text{ km}}{100\text{ km}} - \frac{1}{20}$$

Kedalaman sama dengan seperduapuluh panjang gelombang, sehingga gelombangnya adalah

pasti ombaknya dangkal.

MEMERIKSA Tsunami diketahui bergerak dengan kecepatan 800 km>j (-500 mi>h) di laut terbuka, jadi hasil kami masuk akal.

MENGAMBILNYA LEBIH LANJUT Misalkan tsunami disebabkan oleh gempa bumi yang mengangkat wilayah dasar laut selebar 50 km dengan ketinggian sekitar satu meter. Tsunami semacam itu akan memiliki panjang gelombang -100 km, dan ketinggian gelombang hanya sekitar satu meter di laut terbuka. Tsunami berjalan sangat cepat di lautan terbuka karena memiliki panjang gelombang yang lebih panjang dari kedalaman lautan. Gelombang laut yang khas memiliki panjang gelombang 100 m atau kurang, yang jauh lebih kecil daripada kedalaman laut terbuka. Gelombang ini adalah gelombang air dalam, dan gelombang air dalam bergerak jauh lebih lambat daripada gelombang air dangkal. Di perairan yang sangat dangkal, seperti air yang sangat dekat dengan pantai, faktor-faktor lain harus dipertimbangkan saat menghitung kecepatan gelombang.

Untuk gelombang suara dalam cairan seperti udara atau air, kecepatan v diberikan oleh

$$v - \sqrt{\frac{B}{AR}} \qquad 15\text{-}4$$

di mana R adalah kerapatan kesetimbangan medium dan B adalah modulus curah* (Persamaan 13-6). Membandingkan Persamaan 15-3 dan 15-4, kita dapat melihat bahwa, secara umum, kecepatan gelombang tergantung pada sifat elastis medium (tegangan untuk gelombang string dan modulus curah untuk gelombang suara) dan pada sifat inersia dari medium (kerapatan massa linier atau kerapatan massa volume).

* Modulus curah adalah rasio negatif dari perubahan tekanan dalam volume (Bab 13):

$$B - - \frac{¢P}{¢V>V}$$

Untuk gelombang suara dalam gas seperti udara, modulus curah* sebanding dengan tekanan, yang pada gilirannya sebanding dengan kerapatan R dan suhu mutlak T dari gas. RasioB>R dengan demikian tidak tergantung pada kepadatan dan hanya sebanding dengan suhu absolut T. Dalam Bab 17, kami menunjukkan bahwa, dalam hal ini, Persamaan 15-4 setara dengan

$$v - \sqrt{\frac{GRT}{B\,M}} \qquad 15\text{-}5$$

KECEPATAN SUARA DALAM GAS

Dalam persamaan ini, T adalah suhu absolut yang diukur dalam kelvin (K), yang terkait dengan suhu Celcius T oleh $_{C}$

$$T - t_{C} \quad 273{,}15 \qquad 15\text{-}6$$

Konstanta tak berdimensi G tergantung jenis gasnya. Untuk molekul diatomik, seperti O_2 dan N_2, G memiliki nilai 7>5. Karena O_2 dan N_2 terdiri dari 98 persen dari atmosfer, 7>5 juga G nilai untuk udara. (Untuk gas yang tersusun dari molekul monoatomik seperti He,G memiliki nilai 5>3.)[kan] Konstan R adalah konstanta gas universal

$$R - 8.3145\ J>(mol\ \#\ K) \qquad 15\text{-}7$$

dan M adalah massa molar gas (yaitu, massa satu mol gas), yang untuk udara adalah

$$M - 29.0 \quad 10^{-3}\ kg>mol$$

Contoh 15-3 Kecepatan Suara di Udara *Cobalah sendiri*

Musim semi trek di sebuah sekolah di Timur Laut dimulai pada awal April ketika suhu udara sekitar 13,0°C. Pada akhir musim, cuaca menghangat dan suhu saat itu sekitar 33,0°C. Hitung kecepatan suara saat meninggalkan pistol starter di udara pada (*A*) 13.0°C dan (*B*) 33.0°C. Tentu saja, pelari harus selalu meninggalkan balok saat melihat asap dari pistol, alih-alih menunggu suara tembakan mencapainya.

GAMBAR Kecepatan pada suhu tertentu dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 15-5, menggunakan 7>5 untuk nilai G (untuk gas diatomik), dan menggunakan 29,0 10^{-3} kg>mol untuk M.

MENYELESAIKAN

Tutup kolom di sebelah kanan dan coba ini sendiri sebelum melihat jawabannya.Langkah

Jawaban

(*A*) 1. Gunakan Persamaan 15-5 (v - 2GRT>M) dan nilai yang diberikan untuk memecahkan kecepatan pada 13.0°C. (Pastikan untuk mengubah suhu ke kelvin.)

$$v_A - \sqrt{\frac{GRT}{B\,M}}_A - \boxed{339\ m>s}$$

(*B*) 1. Dari Persamaan 15-5, kita dapat melihat bahwa v sebanding dengan 2T. Gunakan proporsionalitas ini untuk menyatakan rasio kecepatan pada 33.0°C dengan kecepatan pada 13.0°C:

$$\frac{v_B}{v_A} - \sqrt{\frac{T_B}{BT_A}}$$

2. Hitung v pada 33.0°C:

$$v_B - \boxed{351\ m>s}$$

MEMERIKSA Bagian (*B*) hasilnya lebih besar dari Bagian (*A*) hasil. Inilah yang diharapkan karena kecepatan suara meningkat dengan meningkatnya suhu.

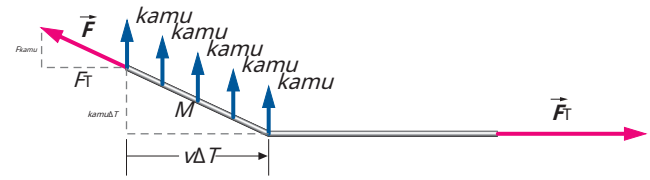
MENGAMBILNYA LEBIH LANJUT Kita melihat dari contoh ini bahwa kecepatan suara di udara adalah sekitar 343 m>s pada 20°C. (Suhu ini biasanya disebut sebagai suhu kamar.)

MASALAH LATIHAN 15-2 Untuk helium, M - 4.00 10^{-3} kg>mol dan G - 5>3. Apakah yang kecepatan gelombang suara dalam gas helium pada 20,0°C?

* NS **modulus curah isotermal,** yang menggambarkan perubahan yang terjadi pada suhu konstan, berbeda dari **modulus curah adiabatik,** yang menggambarkan perubahan yang tidak memiliki perpindahan panas. Untuk gelombang suara pada frekuensi yang dapat didengar, perubahan tekanan terjadi terlalu cepat untuk perpindahan panas yang cukup besar, sehingga modulus curah yang sesuai adalah modulus curah adiabatik.

[kan] Nilai-nilai ini dari G untuk gas monoatomik dan diatomik ditetapkan dalam Bagian 9 Bab 18.

Derivasi v untuk gelombang pada tali Persamaan 15-3 ($v = \sqrt{F/(M/L)}$) dapat diperoleh dengan menerapkan teorema impuls-momentum pada gerak tali. Misalkan Anda memegang salah satu ujung tali panjang yang tegang dengan tegangan F dan massa seragam per satuan panjang M. (Ujung tali yang lain menempel pada dinding yang jauh.) Tiba-tiba, Anda mulai menggerakkan tangan Anda ke atas dengan kecepatan konstan v_{kamu}. Setelah waktu yang singkat, string muncul seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15-5, dengan titik paling kanan dari segmen string yang miring bergerak ke kanan dengan kecepatan gelombang v dan seluruh segmen miring bergerak ke atas dengan kecepatan v_{kamu}. Dengan menerapkan teorema impuls-momentum ($\vec{F}\,\Delta t = \Delta \vec{p}$) ke string, kita peroleh



ANGKA 15-5 Saat ujung tali bergerak ke atas pada kecepatan tetap v_{kamu}, titik di mana tali berubah dari horizontal ke miring bergerak ke kanan dengan kecepatan gelombang v.

$$F_{kamu}\,\Delta t = mu - 0 \qquad 15\text{-}8$$

di mana F_{kamu} adalah komponen ke atas dari kekuatan tangan Anda pada tali, M adalah massa segmen miring, dan Δt adalah saat tangan Anda bergerak ke atas. Kedua segitiga pada gambar sebangun, jadi

$$\frac{F_{kamu}}{F_T} = \frac{v_{kamu}\,\Delta t}{v\,\Delta t} \quad \text{atau} \quad F_{kamu} = \frac{v_{kamu}}{v} F_T$$

Mengganti F_{kamu} dalam Persamaan 15-8 memberikan

$$\frac{v_{kamu}}{v} F\,\Delta t = (Mv\,\Delta t)u$$

di mana $Mv\,\Delta t$ telah diganti M. Memecahkan untuk v memberi

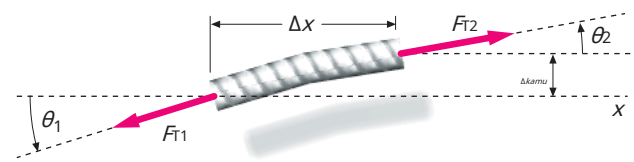
$$v = \sqrt{\frac{F_T}{M}}$$

yang merupakan ekspresi untuk kecepatan gelombang yang diberikan dalam Persamaan 15-3.

Dalam pembahasan berikut, kami menunjukkan bahwa hasil ini benar tidak hanya untuk pulsa gelombang yang berbentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15-5, tetapi juga untuk pulsa dengan berbagai bentuk.

* PERSAMAAN GELOMBANG

Kita dapat menerapkan hukum kedua Newton ke segmen string untuk memperoleh persamaan diferensial yang dikenal sebagai persamaan gelombang, yang menghubungkan turunan spasial dari $y(x,t)$ terhadap turunan waktunya. Gambar 15-6 menunjukkan satu segmen string. Kami hanya mempertimbangkan sudut kecil θ_{kamu} dan θ_{kamu}. Maka panjang segmen tersebut kira-kira Δx dan massanya adalah $M = M\,\Delta x$, di mana M adalah massa tali per satuan panjang. Pertama, kita tunjukkan bahwa, untuk perpindahan vertikal kecil, gaya horizontal bersih pada suatu segmen adalah nol dan tegangannya seragam dan konstan. Gaya total dalam arah horizontal adalah nol. Itu adalah,



ANGKA 15-6 Ruas tali yang diregangkan digunakan untuk turunan dari persamaan gelombang. Gaya vertikal bersih pada segmen adalah $F_{T2}\,\text{dosa}_{kamu} - F_{T1}\,\text{dosa}_{kamu}$, di mana F adalah tegangan di rangkaian. Persamaan gelombang diturunkan dengan menerapkan hukum kedua Newton pada segmen.

$$\Sigma F_x = F_{T2}\cos\theta_{kamu} - F_{T1}\cos\theta_{kamu} = 0$$

di mana θ_{kamu} dan θ_{kamu} adalah sudut yang ditunjukkan dan F adalah tegangan pada tali. Karena sudut dianggap kecil, kita dapat memperkirakan cosinus dengan 1 untuk setiap sudut. Kemudian, gaya horizontal bersih pada segmen dapat ditulis

$$\Sigma F_x = F_{T2} - F_{T1} = 0$$

Dengan demikian,

$$F_{T2} = F_{T1} = F_T$$

Segmen bergerak vertikal, dan gaya total dalam arah ini adalah

$$\Sigma F = F_{kamu}\,\text{dosa}_{kamu} - F_{kamu}\,\text{dosa}_{kamu}$$

Karena sudut dianggap kecil, kita dapat memperkirakan sinkamu oleh tankamu untuk setiap sudut. Maka gaya vertikal bersih pada ruas tali dapat ditulis

$$AF - F_{kamu}(dosakamu_1 - dosakamu_2) - F_1(tankamu_1 - tankamu_2)$$

Garis singgung sudut yang dibuat tali dengan horizontal adalah kemiringan garis singgung tali. lerengS adalah turunan pertama dari y(x,t) dengan hormatx untuk konstan T. Turunan fungsi dua variabel terhadap salah satu variabel dengan konstanta yang lain disebut a **turunan parsial.** Turunan parsial dari kamu dengan hormat x ditulis *kamu*> *x*. Dengan demikian, kita memiliki

$$S - tankamu - \frac{kamu}{x}$$

Kemudian

$$AF - F_{kamu}(S_1 - S_2) - F_T ¢S$$

di mana S_1 dan S_2 adalah kemiringan kedua ujung segmen string dan ¢*S* adalah perubahan kemiringan. Mengatur gaya bersih ini sama dengan massaM ¢*x* kali percepatan $_2$y> t_2 memberi

$$F_T ¢S - M¢x \frac{^2kamu}{T_2} \quad \text{atau} \quad F_T \frac{¢S}{¢x} - M\frac{^2kamu}{T_2} \qquad 15\text{-}9$$

Dalam batas sebagai ¢*x* S 0, kita punya

$$\lim_{¢x S 0} \frac{¢S}{¢x} - \frac{S}{x} - \frac{}{x}\frac{kamu}{x} - \frac{^2kamu}{x_2}$$

Jadi, dalam batas sebagai ¢*x* S 0, Persamaan 15-9 menjadi

$$\frac{^2kamu}{x_2} - \frac{M}{F_T}\frac{^2kamu}{T_2} \qquad 15\text{-}10A$$

Persamaan 15-10*A* adalah **persamaan gelombang** untuk tali yang kencang.

Kami sekarang menunjukkan bahwa persamaan gelombang dipenuhi oleh fungsi apa pun x - vt. Membiarkan A - x - vt dan pertimbangkan fungsi gelombang apa pun

$$y - y(x - vt) - y(A)$$

Kita gunakan kamu untuk turunan dari kamu dengan hormat A. Kemudian, dengan aturan rantai untuk turunan,

$$\frac{kamu}{x} - \frac{dy}{DA}\frac{A}{x} - \frac{A}{kamu}\frac{}{x} \quad \text{dan} \quad \frac{kamu}{T} - \frac{dy}{DA}\frac{A}{T} - \frac{A}{kamu}\frac{}{T}$$

Karena

$$\frac{A}{x} - \frac{(x - vt)}{x} - 1 \quad \text{dan} \quad \frac{A}{T} - \frac{(x - vt)}{T} - - v$$

kita punya

$$\frac{kamu}{x} - kamu \text{ dan } \frac{kamu}{T} - - vy$$

Mengambil turunan kedua, kita memperoleh

$$\frac{^2kamu}{x_2} - kamu \text{ dan } \frac{^2kamu}{T_2} - - v\frac{kamu}{T} - - v\frac{dy}{DA}\frac{A}{T} - v^2kamu$$

Dengan demikian,

$$\frac{^2kamu}{x_2} - \frac{1}{v_2}\frac{^2kamu}{T_2} \qquad 15\text{-}10B$$

GELOMBANG EQUAT ION

Hasil yang sama (Persamaan 15-10*B*) dapat diperoleh untuk setiap fungsi dari xdengan baik.vt sebagai Membandingkan Persamaans 15-10*A* dan 15-10*B*, kita melihat bahwa kecepatan rambat gelombang adalah v - 2F >M, yaitu Persamaan 15-3.

Contoh 15-4 Fungsi Gelombang Harmonik

Pada bagian berikut, gelombang harmonik didefinisikan oleh fungsi gelombang y(x,t)-Adosa(kx-vT),di mana v - v> k. Tunjukkan bahwa fungsi gelombang ini memenuhi Persamaan 15-10*B* dengan menghitung turunan kedua secara eksplisit.

GAMBAR Kita dapat menunjukkan ini dengan menghitung secara 2y> x2 dan 2y> t2, di mana eksplisity - A dosa(kx - vT), dan substitusikan ke Persamaan 15-10*B*.

MENYELESAIKAN

1. Hitung turunan parsial kedua dari kamu dengan hormat x:

$$\frac{kamu}{x} - \frac{}{x}[\text{A dosa(kx - vt)}] - \text{A karena(kx - vT)}\ \frac{\text{(kx - vT)}}{x} - \text{kA karena(kx - vT)}$$

$$\frac{\text{:kamu}}{x_2} - \frac{}{xx} - \frac{kamu}{}\text{kA karena(kx - vt)} - \text{-kA dosa(kx - vT)}x\frac{\text{(kx - vT)}}{x}$$

$$\text{- - } k_2\text{A dosa(kx - vT)}$$

2. Demikian pula, hitung turunan parsial kedua dari kamu dengan hormat T:

$$\frac{kamu}{T} - \frac{}{T}[\text{A dosa(kx - vt)}] - \text{A karena(kx - vT)}\ \frac{\text{(kx - vT)}}{T} - \text{ - }\ \text{vA karena(kx - vT)}$$

$$\frac{\text{:kamu}}{T_2} - \text{vA dosa(kx - vT)}\ \frac{kamu\text{(kx - vT)}}{T} - \text{ - }\ v_2\text{A dosa(kx - vT)}$$

3. Substitusikan hasil ini ke Persamaan 15-10*B* memberikan:

$$\text{- } k_2\text{A dosa(kx - vT) - }\frac{1}{v_2}[\text{-}v_2\text{A dosa(kx - vT)}]$$

$$\text{atau A dosa(kx - vT) - }\frac{v_2 > k_2}{v_2}\text{A dosa(kx - vT)}$$

4. Kedua sisi hasil langkah-3 sama satu sama lain, asalkan (v2>k2)>v2 - 1:

A dosa(kx - vT) adalah solusi untuk persamaan gelombang (Persamaan 15-9B),asalkan (v2>k2)>v2 - 1. Yaitu, asalkan v - v>k.

MEMERIKSA Setiap fungsi dari bentuk y(x - vt) memenuhi persamaan gelombang (Persamaan 15-10*B*). Fungsinyay - A dosa(kx - vT) berbentuk y(x - vt) asalkan v - v>k. Untuk menunjukkan bahwa fungsi ini dalam bentuk yang tepat, kami mengganti kv untuk v untuk memperoleh

$$y - \text{A dosa(kx - vt) - A dosa(kx - kvt) - A dosa(k[x - vt])}$$

yang berbentuk y(x - vt).

MASALAH LATIHAN 15-3 Tunjukkan bahwa sembarang fungsi v(T) memenuhi Persamaan 15-10*B,* y(kxasalkan v - v>k.

Derivasi v untuk gelombang suara Kecepatan suara diberikan oleh v - 2B>R(Persamaan 15-4), dimana B dan R adalah modulus curah dan kepadatan medium, masing-masing. Persamaan ini dapat diperoleh dengan menerapkan teorema impuls-momentum pada gerakan udara dalam silinder panjang (Gambar 15-7) dengan piston di salah satu ujungnya dan ujung lainnya terbuka ke atmosfer. Tiba-tiba, Anda mulai menggerakkan piston ke kanan dengan kecepatan konstankamu Setelah waktu yang singkat, ¢*T*, piston telah bergerak sejauh kamu ¢*T* dan semua udara dalam jarak v ¢*T* dari posisi awal piston bergerak ke kanan dengan kecepatan kamu Dengan menerapkan teorema impuls-momentum (***F*** ¢*T* - ¢***P*** s av s) ke udara di dalam silinder yang kita peroleh

$$F\ ¢T - mu - 0 \qquad 15\text{-}11$$

di mana M adalah massa udara yang bergerak dengan kecepatan kamu dan F adalah gaya total pada udara di dalam silinder. Udara pada awalnya dalam keadaan diam. Kekuatan bersihF berhubungan dengan

peningkatan tekanan ¢*P* udara di dekat piston yang bergerak dengan

$$F - A\,¢P$$

di mana A adalah luas penampang silinder.

Modulus curah udara diberikan oleh

$$B - - \frac{¢P}{¢V>V} \quad \text{jadi} \quad ¢P - -B\,\frac{¢V}{V} - - B\frac{- Au\,¢T}{Av\,¢T} - B\frac{\text{kamu}}{v}$$

di mana Au¢*T* adalah volume yang disapu oleh piston dan Av¢*T* adalah volume awal udara yang sekarang bergerak dengan kecepatan kamu Mengganti F dalam Persamaan 15-11 memberikan

$$A¢P¢T - mu \qquad \text{atau} \qquad AB\,\frac{\text{kamu}}{v}¢T - (RAv¢T)u$$

di mana RAv ¢*T* telah diganti M. Memecahkan untuk v memberi

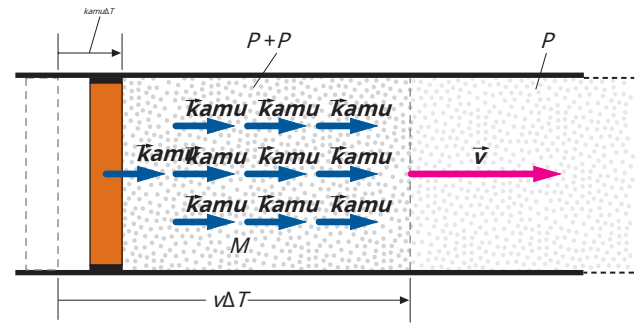
$$v - \frac{B}{AR}$$

yang sama dengan ekspresi untuk v dalam Persamaan 15-4.

Persamaan gelombang untuk gelombang suara dapat diturunkan dengan menggunakan hukum Newton. Dalam satu dimensi, persamaan ini adalah

$$\frac{{}_2S}{x_2} - \frac{1}{v_s^2}\frac{{}_2S}{T_2}$$

di mana S adalah perpindahan medium dalam x arah dan v adalah cepat rambat bunyi dalam medium.



GAMBAR 1 5 - 7 Udara di dekat piston bergerak ke kanan pada kecepatan konstan yang sama kamu sebagai pistonnya. Tepi kanan pulsa tekanan ini bergerak ke kanan dengan kecepatan gelombangv. Tekanan di dalam pulsa lebih tinggi daripada tekanan di bagian lain silinder dengan ¢ *P*.

15-2 GELOMBANG PERIODIK

Jika salah satu ujung tali panjang yang tegang digoyang maju mundur dengan gerak periodik, maka a **gelombang periodik** dihasilkan. Jika gelombang periodik merambat sepanjang tali yang tegang atau medium lain, setiap titik di sepanjang medium berosilasi dengan periode yang sama.

GELOMBANG HARMONIS

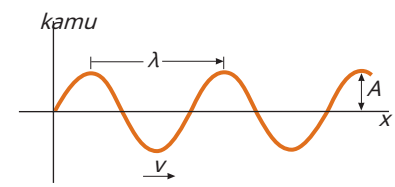
Gelombang harmonik adalah jenis gelombang periodik yang paling dasar. Semua gelombang, baik periodik maupun tidak, dapat dimodelkan sebagai superposisi gelombang harmonik. Akibatnya, pemahaman tentang gerak gelombang harmonik dapat digeneralisasi untuk membentuk pemahaman tentang semua jenis gerak gelombang. Jika sebuah**gelombang harmonik** bergerak melalui medium, setiap titik medium berosilasi dalam gerak harmonik sederhana.

Jika salah satu ujung seutas tali diikatkan pada garpu tala yang bergetar yang bergerak naik turun dengan gerak harmonik sederhana, suatu rangkaian gelombang sinusoidal merambat sepanjang senar. Kereta gelombang ini merupakan gelombang harmonik. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15-8, bentuk string adalah fungsi sinusoidal. Jarak minimum setelah gelombang berulang (jarak antara puncak, misalnya) dalam gambar ini disebut**panjang gelombang** l.

Saat gelombang merambat di sepanjang tali, setiap titik pada tali bergerak ke atas dan ke bawah—tegak lurus dengan arah rambat—dalam gerak harmonik sederhana dengan frekuensi F dari garpu tala. Selama satu periode *T* dari gerakan ini gelombang bergerak sejauh satu panjang gelombang, sehingga kecepatannya diberikan oleh

$$v - \frac{\text{aku}}{T} - \text{Faku} \qquad 15\text{-}12$$

di mana kita telah menggunakan relasi T - 1>F.



ANGKA 1 5 - 8 Gelombang harmonik di beberapa instan dalam waktu. A adalah amplitudo dan aku adalah panjang gelombang. Untuk gelombang pada seutas tali, angka ini dapat diperoleh dengan mengambil bidikan foto berkecepatan tinggi dari senar.

Karena hubungannya v - faku muncul hanya dari definisi panjang gelombang dan frekuensi, itu berlaku untuk semua gelombang periodik.

Fungsi sinus yang menggambarkan perpindahan pada Gambar 15-8 adalah

$$y(x) - A\ dosaA2P\ \frac{x}{aku}\ DB$$

di mana A adalah amplitudo, aku adalah panjang gelombang, dan D adalah konstanta fase yang bergantung pada pilihan titik asal (di mana x - 0). Persamaan ini dinyatakan lebih sederhana sebagai

$$y(x) - A\ dosa(kx \quad D) \qquad 15\text{-}13$$

di mana k, disebut **nomor gelombang,** diberikan oleh

$$k - \frac{2P}{aku} \qquad 15\text{-}14$$

Perhatikan bahwa k memiliki dimensi m^{-1}. (Karena sudut harus dalam radian, kita terkadang menulis satuank sebagai rad>m.) Ketika berhadapan dengan gelombang harmonik tunggal, kita biasanya memilih lokasi asal sehingga D - 0.

Untuk gelombang yang merambat dalam arah naik x dengan kecepatan v, mengganti x dalam Persamaan 15-13 dengan x - vt (lihat “Pulsa Gelombang” di Bagian 15-1). DenganD sama dengan nol, ini memberikan

$$y(x,t) - A\ dosak(x - vt) - A\ dosa(kx - kvt)$$

atau

$$y(x,t) - A\ dosa(kx - vT) \qquad 15\text{-}15$$

FUNGSI GELOMBANG HARMONIS

di mana

$$v - kv \qquad 15\text{-}16$$

adalah frekuensi sudut, dan argumen fungsi sinus, (kx - vT),disebut **fase.** Frekuensi sudut berhubungan dengan frekuensi F dan titik T oleh

$$v - 2PF - \frac{2P}{T} \qquad 15\text{-}17$$

Mengganti v - 2PF ke dalam Persamaan 15-16 dan menggunakan k - 2p>l, kita peroleh

$$2Pf - kv - \frac{2P}{aku}v$$

atau v - faku, yaitu Persamaan 15-12.

Jika gelombang harmonik yang merambat sepanjang tali dijelaskan oleh: y(x,t) - A dosa(kx - vT), kecepatan suatu titik pada tali pada nilai tetap x adalah

$$v_{kamu} - \frac{kamu}{T} - \frac{}{T}[A\ dosa(kx - vT)] - -vA\ karena(kx - vT) \qquad 15\text{-}18$$

KECEPATAN TRANSVERS

Percepatan titik ini diberikan oleh $_2y> t_2$.

Contoh 15-5 Gelombang Harmonic pada String

fungsi gelombang y(x,t) - (0,030 m) dosa[(2,2 m^{-1})x - (3,5 $detik^{-1}$)T] adalah untuk gelombang harmonik pada Sebuah benang. (*A*) Ke arah mana gelombang ini merambat dan berapa kecepatannya? (*B*) Tentukan panjang gelombang, frekuensi, dan periode gelombang tersebut. (*C*) Berapa perpindahan maksimum setiap titik pada tali? (*D*) Berapakah kecepatan maksimum setiap titik pada tali?

GAMBAR (*A*) Untuk mencari arah perjalanan, nyatakan y(x,t) sebagai fungsi dari (x-vt) atau sebagai fungsi dari (xvt) dan gunakan Persamaan 15-1 dan 15-2. Untuk menemukan kecepatan gelombang, gunakanv - kv(Persamaan 15-16). (*B*) Panjang gelombang, frekuensi, dan periode dapat ditemukan dari bilangan gelombang k dan frekuensi sudut v. (*C*) Perpindahan maksimum suatu titik pada tali adalah amplitudo A. (*D*) Kecepatan suatu titik pada tali adalah *kamu*> *T*.

MENYELESAIKAN

(*A*) 1. Fungsi gelombang yang diberikan berbentuk y(x,t) - A dosa(kx - vT). Menggunakan v - kv (Persamaan 15-16), tuliskan fungsi gelombang sebagai fungsi dari x - vt. Kemudian, gunakan Persamaan 15-1 dan 15-2 untuk mencari arah perjalanan:

y(x,t) - A dosa(kx - vT) dan v - kv
jadi y(x,t) - A dosa(kx - kvt) - A dosa[k(x - vt)]
Gelombang merambat di x arah.

2. Karena bentuknya adalah y - A dosa(kx - vT), kita tahu A serta keduanya v dan k. Gunakan ini untuk menghitung kecepatan:

$$v - \frac{aku}{T} - \frac{aku}{2P}\frac{2P}{T} - \frac{v}{k} - \frac{3,5\ detik^{-1}}{2,2\ m^{-1}} - 1,59\ m>s$$

$$- \boxed{1,6\ m>s}$$

(*B*) panjang gelombang aku berhubungan dengan bilangan gelombang k, dan periodeT dan frekuensi F berhubungan dengan v:

$$aku - \frac{2P}{k} - \frac{2P}{2,2\ m^{-1}} - 2,86\ m - \boxed{2,9\ m}$$

$$T - \frac{2P}{v} - \frac{2P}{3,5\ detik^{-1}} - 1,80\ detik - \boxed{1,8\ detik}$$

$$F - \frac{1}{T} - \frac{1}{1,80\ detik} - 0,557Hz - \boxed{0,56Hz}$$

(*C*) Perpindahan maksimum segmen string adalah amplitudo A:

$$A - \boxed{0,030\ m}$$

(*D*) 1. Hitung *kamu*> *T* untuk mencari kecepatan suatu titik pada tali:

$$v_{kamu} - \frac{kamu}{T} - (0,030\ m)\ \frac{[dosa(2,2\ m^{-1}x - 3,5\ detik^{-1}T)]}{T}$$

$$- (0,030\ m)(-3,5\ dtk^{-1})\ co(2.2\ m^{-1}x - 3,5\ detik^{-1}T)$$

$$- - (0,105\ m>s)\ cos(2,2\ m^{-1}x - 3,5\ detik^{-1}T)$$

2. Kecepatan transversal maksimum terjadi ketika fungsi kosinus bernilai 1:

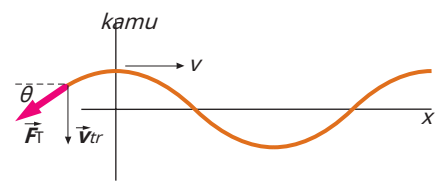
$$v_{y,\ maksimal} - 0,105\ m>s - \boxed{0,11\ m>s}$$

MEMERIKSA Kami telah menyertakan unit secara eksplisit untuk menunjukkan bagaimana mereka bekerja. Mereka berfungsi sebagai pemeriksaan yang masuk akal. Seringkali kita akan menghilangkan unit untuk singkatnya.

Perpindahan energi melalui gelombang pada tali Perhatikan kembali seutas tali yang dilekatkan pada garpu tala. Saat garpu bergetar, garpu mentransfer energi ke segmen tali yang menempel padanya. Misalnya, ketika garpu bergerak ke atas dari posisi setimbangnya, garpu itu sedikit meregangkan segmen tali yang berdekatan—meningkatkan energi potensial elastisnya. Selain itu, garpu melambat saat bergerak ke atas dari keseimbangannya, sehingga memperlambat segmen string yang paling dekat dengannya. Ini mengurangi energi kinetik segmen. Saat gelombang bergerak di sepanjang tali, energi ditransfer dari satu segmen ke segmen berikutnya dengan cara yang sama.

Daya adalah laju perpindahan energi. Kita dapat menghitung daya dengan mempertimbangkan kerja yang dilakukan oleh gaya yang diberikan oleh satu segmen tali pada segmen tetangga. Laju kerja yang dilakukan oleh gaya ini adalah daya. Gambar 15-9 menunjukkan gelombang harmonik bergerak ke kanan sepanjang segmen string. Artinya, kita asumsikan fungsi gelombang dari bentuk

$$y(x,t) - A\ dosa(kx - vT) \qquad 15\text{-}19$$



ANGKA 15 - 9 Kekuatan ketegangan $\vec{F}$ memiliki komponen dalam arah kecepatan transversal $\vec{v}_{tr}$ jadi saat ini gaya sedang bekerja bekerja pada ujung string yang memiliki nilai positif.

Kekuatan ketegangan $\vec{F}_T$ di ujung kiri segmen diarahkan bersinggungan dengan string, seperti yang ditunjukkan. Untuk menghitung daya yang ditransfer oleh gaya ini, kami menggunakan rumus $P_T = \vec{F}_T \cdot \vec{v}_{tr}$ (Persamaan 6-16), dimana F_T adalah tegangan dan $\vec{v}_{tr}$, kecepatan transversal, adalah kecepatan akhir segmen. Untuk mendapatkan ekspresi pangkat, pertama-tama kita ekspresikan vektor-vektornya dalam bentuk komponen. Itu adalah, $\vec{F} = F_T \vec{i} + F_{Tkamu} \vec{j}$ dan $\vec{v}_{tr} = v_{Tx} \vec{i} + v_{Tkamu} \vec{j}$. Mengambil produk skalar memberikan $P = F_T v_{Tx} + F_{Tkamu} v_{Tkamu}$. Kami memperoleh v dengan membedakan Persamaan 15-18. Dari gambar, kita melihat bahwa $F_{Tkamu} = -F_T$ tankamu, di mana kita telah menggunakan pendekatan sudut kecil sin = tankamu Karena tankamu adalah kemiringan garis singgung tali, kita memiliki tankamu = $\partial y / \partial x$. Dengan demikian

$$P = F_T v_{Ty} = -F_T v \tan\text{kamu} = -F_T \frac{\partial y}{\partial x} \qquad 15\text{-}20$$

Menerapkan Persamaan 15-20 ke gelombang harmonik (dengan mengambil turunan dari Persamaan 15-19) memberikan

$$P = -F_T [-vA \cos(kx - vt)][kA \cos(kx - vt)] = F_T vkA^2 \cos^2(kx - vT)$$

Menggunakan $v = \sqrt{F_T / M}$ (Persamaan 15-3) dan $v = v/k$ (Persamaan 15-16), kami menggantiF dan terkemuka k untuk memperoleh

$$P = Mvv^2A^2 \cos^2(kx - vT) \qquad 15\text{-}21$$

di mana v adalah kecepatan gelombang. Daya rata-rata di lokasi mana punx maka

$$P_{av} = \tfrac{1}{2} Mvv^2A^2 \qquad 15\text{-}22$$

karena nilai rata-rata dari $\cos^2(kx - vT)$ adalah $\tfrac{1}{2}$. Rata-rata ini adalah diambil selama seluruh periode T gerak dengan x dipertahankan konstan.

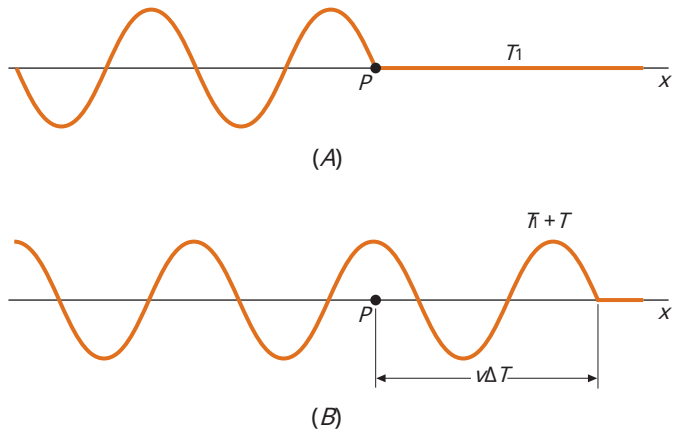
Energi merambat sepanjang tali yang tegang dengan kecepatan rata-rata sama dengan kecepatan gelombang v, jadi energi rata-rata (ΔE) mengalir melewati titik P_1 selama waktu ΔT (Gambar 15-10*A* dan Gambar 15-10*B*) adalah

$$(\Delta E)_{av} = P_{av} \Delta T = \tfrac{1}{2} Mvv^2A^2 \Delta T$$

Energi ini didistribusikan sepanjang $\Delta x = v \Delta T$, jadi energi rata-rata panjangnya Δx adalah

$$(\Delta E)_{av} = \tfrac{1}{2} mv^2A^2 \Delta x \qquad 15\text{-}23$$

Perhatikan bahwa seperti daya rata-rata, energi rata-rata per satuan panjang sebanding dengan kuadrat amplitudo gelombang.



GAMBAR 1 5 - 1 0 Gelombang telah mencapai titik P pada waktu T_1. Selama waktu ΔT, gelombang maju melewati titik P sebuah jarak $v \Delta T$.

Contoh 15-6 Rata-rata Energi Total aWave pada String

Sebuah gelombang harmonik dengan panjang gelombang 25 cm dan amplitudo 1,2 cm bergerak sepanjang segmen tali sepanjang 60 m sepanjang 15 m yang memiliki massa 320 g dan tegangan 12 N. (*A*) Berapa kecepatan dan frekuensi sudut gelombang? (*B*) Berapakah energi total rata-rata gelombang?

GAMBAR Kecepatan gelombang adalah $v = \sqrt{F_T / M}$, di mana F diberikan dan M = m>L. Kami menemukan v dari $v = 2P$ F, di mana f = v>l. Energi ditemukan dengan menggunakan $(\Delta E)_{av} = \tfrac{1}{2} mv^2A^2 \Delta x$ (Persamaan 15-23).

MENYELESAIKAN

(*A*) 1. Kecepatan berhubungan dengan tegangan dan rapat massa:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{M}} \quad \text{dan} \quad M = \frac{M}{L}$$

2. Hitung kecepatan gelombang:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{M}} = \sqrt{\frac{(12\ \text{N})(60\ \text{M})}{(0{,}32\text{kg})}} = 47{,}4\ \text{m>s} = \boxed{47\ \text{m>s}}$$

3. Frekuensi sudut ditemukan dari frekuensi, yang ditemukan dari kecepatan dan panjang gelombang:

$$v = 2\pi f \quad \text{dan} \quad v = f\lambda,$$

$$\text{jadi} \quad v = 2\pi f = 2\pi \frac{v}{\lambda} = \frac{47{,}4 \text{ m/s}}{0{,}25 \text{ m}} = 1190 \text{ rad/s}$$

$$= \boxed{1200 \text{ rad/s}}$$

(*B*) Energi total rata-rata gelombang harmonik pada tali diberikan oleh $(\Delta E)_{av} = \frac{1}{2} m v^2 A^2 \Delta x$ (Persamaan 15-23):

$$(\Delta E)_{av} = \frac{1}{2} m v^2 A^2 \Delta x = \frac{1}{2} \frac{M}{L} v^2 A^2 \Delta x$$

$$= \frac{1}{2} \frac{0{,}32 \text{ kg}}{60 \text{ m}} (1190 \text{ detik}^{-1})^2 (0{,}012 \text{ m})^2 (15 \text{ m})$$

$$= 8.19 \text{ J} = \boxed{8.2 \text{ J}}$$

MEMERIKSA Satuan untuk energi rata-rata di Bagian-(*B*) hasilnya diberikan oleh

$$1 \frac{\text{kg} \cdot \text{S}^{-2}\text{M}^3}{\text{M}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{M}^2}{\text{S}^2} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J}$$

di mana kami telah menggunakan 1 N = 1 kg · m/s^2. Unit bekerja, jadi Bagian-(*B*) hasilnya masuk akal.

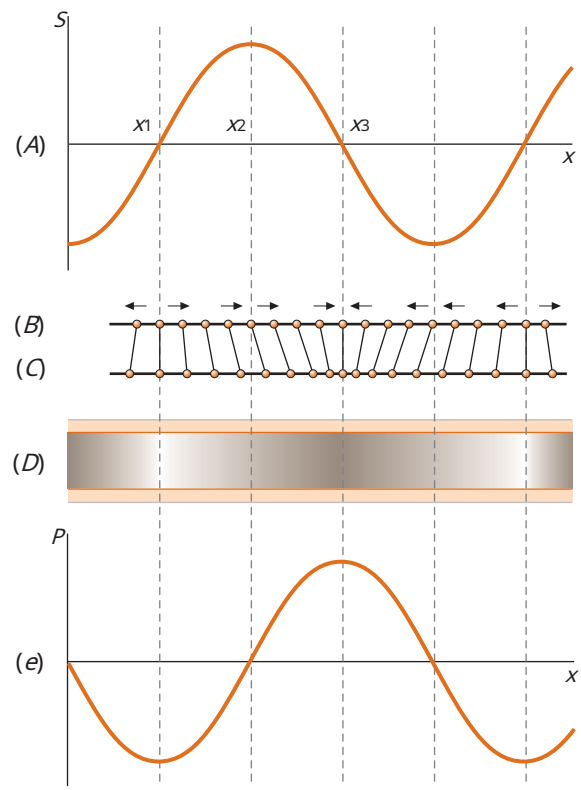
MASALAH LATIHAN 15-4 Hitung laju rata-rata energi yang ditransmisikan sepanjang tali.

GELOMBANG SUARA HARMONIS

Gelombang bunyi harmonik dapat dihasilkan oleh garpu tala atau pengeras suara yang digetarkan dengan gerak harmonik sederhana. Sumber yang bergetar menyebabkan molekul udara di sebelahnya berosilasi dengan gerakan harmonik sederhana tentang posisi kesetimbangannya. Molekul-molekul ini bertabrakan dengan molekul tetangga, menyebabkan mereka berosilasi, yang pada gilirannya bertabrakan dengan molekul tetangga mereka, menyebabkan mereka berosilasi, dan seterusnya, sehingga menyebarkan gelombang suara. Persamaan 15-15 menggambarkan gelombang suara harmonik jika fungsi gelombang $y(x,t)$ digantikan oleh $s(x,t)$, yang menunjukkan perpindahan molekul dari posisi kesetimbangannya. Dengan demikian,

$$s(x,t) = s_0 \cos(kx - \omega t) \qquad 15\text{-}24$$

Perpindahan ini berada di sepanjang arah rambat gelombang, dan menyebabkan variasi densitas dan tekanan udara. Gambar 15-11 menunjukkan perpindahan molekul udara dan perubahan densitas yang disebabkan oleh gelombang suara pada waktu tertentu. Karena tekanan dalam gas sebanding dengan densitasnya, maka tekanannya maksimum



GAMBAR 15-11 (*A*) Perpindahan dari kesetimbangan molekul udara dalam gelombang suara harmonik versus posisi pada suatu saat. x_0 dan x_3 adalah titik perpindahan nol. (*B*) Beberapa molekul representatif dengan jarak yang sama pada posisi kesetimbangannya 1>4 siklus sebelumnya. Panah menunjukkan arah kecepatan mereka pada saat itu. (*C*) Molekul dekat titik x_1, x_2, dan x_3 setelah gelombang suara tiba. Tepat di sebelah kiri x_1, perpindahannya negatif, menunjukkan bahwa molekul gas dipindahkan ke kiri, menjauh dari titik x_1, pada saat ini. Tepat di sebelah kanan x_1, perpindahannya positif, menunjukkan bahwa molekul dipindahkan ke kanan, yang lagi-lagi menjauh dari titik x_1. Jadi pada titik x_1, densitasnya minimum karena molekul gas di kedua sisi dipindahkan dari titik itu. Pada titik x_2, densitasnya maksimum karena molekul-molekul di kedua sisi titik itu dipindahkan ke arah titik x_2. Pada titik x_3, densitasnya tidak berubah karena molekul gas pada kedua sisi titik tersebut memiliki perpindahan yang sama dalam arah yang sama. (*D*) Kepadatan udara saat ini. Kepadatan maksimum pada x_2 dan minimal di x_1, yang keduanya merupakan titik perpindahan nol. Ini sama dengan nilai keseimbangan di titik x_3, yang merupakan perpindahan maksimum. (*e*) Perubahan tekanan, yang sebanding dengan perubahan densitas, versus posisi. Perubahan tekanan dan perpindahan (perubahan posisi) adalah 90 ° keluar dari fase.

dimana densitasnya maksimum. Kita melihat dari gambar ini bahwa gelombang kerapatan, dan dengan demikian gelombang tekanan, berbeda fase 90° dengan gelombang perpindahan. (Dalam argumen fungsi sinus atau kosinus, kami akan selalu menyatakan sudut fase dalam radian. Namun, dalam deskripsi verbal, kami biasanya mengatakan bahwa "dua gelombang berbeda fase 90°" daripada "dua gelombang keluar fase olehp>2 rad.") Dimana perpindahan S adalah nol, densitas, dan dengan demikian tekanan, adalah maksimum atau minimum, dan di mana perpindahan adalah maksimum atau minimum, densitas, dan dengan demikian tekanan, adalah nol. Gelombang perpindahan yang diberikan oleh Persamaan 15-24 dengan demikian menyiratkan gelombang tekanan yang diberikan oleh

$$p - p_0 \text{dosa} Akx - vT - \frac{P}{2} B - -P_0 \text{karena}(kx - vT) \qquad 15\text{-}25$$

di mana P singkatan dari tekanan dikurangi tekanan kesetimbangan lokal, dan P_0, nilai maksimum dari P, disebut amplitudo tekanan. Dapat ditunjukkan bahwa amplitudo tekananP_0 berhubungan dengan amplitudo perpindahan S_0 oleh

$$P_0 - rvvs_0 \qquad 15\text{-}26$$

di mana v adalah kecepatan rambat dan R adalah densitas kesetimbangan gas. Jadi, ketika gelombang suara harmonik merambat melalui udara, perpindahan molekul udara, tekanan, dan densitas semuanya berubah secara sinusoidal dengan frekuensi sumber getar.

MASALAH LATIHAN 15-5

Suara dengan frekuensi dari sekitar 20 Hz hingga sekitar 20.000 Hz dapat didengar oleh manusia (walaupun banyak orang memiliki pendengaran yang agak terbatas di atas 15.000 Hz). Jika cepat rambat bunyi di udara adalah 343 m>s, berapa panjang gelombang yang sesuai dengan frekuensi bunyi tertinggi dan terendah?

Energi gelombang suara Energi rata-rata gelombang suara harmonik dalam elemen volume ¢*V* diberikan oleh Persamaan 15-23 dengan A digantikan oleh S dan M ¢*x*, ulang-ditempatkan oleh R ¢*V*, di mana R adalah kerapatan kesetimbangan medium.

$$(¢E)_{av} - \tfrac{1}{2} rv^2 S^2_0 ¢V \qquad 15\text{-}27$$

Energi per satuan volume adalah kerapatan energi rata-rata H_{av}:

$$H_{av} - \frac{¢E_{av}}{¢V} - \frac{1}{2} rv^2 S^2_0 \qquad 15\text{-}28$$

di mana H adalah huruf kecil Yunani eta.

GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

Gelombang elektromagnetik termasuk cahaya, gelombang radio, sinar X, sinar gamma, dan gelombang mikro, antara lain. Berbagai jenis gelombang elektromagnetik hanya berbeda dalam panjang gelombang dan frekuensi. Tidak seperti gelombang mekanik, gelombang elektromagnetik tidak membutuhkan media untuk merambat. Mereka melakukan perjalanan melalui ruang hampa dengan kecepatanC, yang merupakan konstanta universal, $C - 3{,}00\ 10^8$ m>s. Fungsi gelombang untuk gelombang elektromagnetik adalah medan listrik $\boldsymbol{E}(x, T)$ berhubungan dengan gelombang. (Medan listrik diperkenalkan di Bab 21. Persamaan gelombang, mirip dengan gelombang string dan gelombang suara, diturunkan dari hukum listrik dan magnet di Bab 30.) Medan listrik tegak lurus dengan arah rambat, jadi elektromagnetik gelombang adalah gelombang transversal.

Gelombang elektromagnetik dihasilkan ketika muatan listrik bebas dipercepat atau ketika elektron yang terikat pada atom dan molekul melakukan transisi ke keadaan energi yang lebih rendah. Gelombang radio, yang memiliki frekuensi sekitar 1 MHz untuk AM dan 100 MHz untuk FM, dihasilkan oleh arus listrik makroskopik yang berosilasi di antena radio. Frekuensi gelombang yang dipancarkan sama dengan frekuensi osilasi

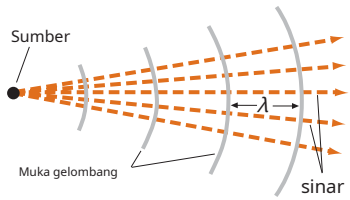
biaya. Gelombang cahaya, yang memiliki frekuensi orde 10^{14} Hz, umumnya dihasilkan oleh transisi atom atau molekul yang melibatkan elektron terikat. Spektrum gelombang elektromagnetik dibahas dalam Bab 31.

(David Sacks/ The Image Bank/ Getty.)

15-3 GELOMBANG DALAM TIGA DIMENSI

Gambar 15-12 menunjukkan gelombang melingkar dua dimensi di permukaan air dalam tangki riak. Gelombang ini dihasilkan oleh tetesan air yang mengenai permukaan. Puncak gelombang membentuk lingkaran konsentris yang disebut**muka gelombang.** Untuk sumber suara titik, gelombang bergerak dalam tiga dimensi, dan muka gelombang adalah permukaan bola konsentris.

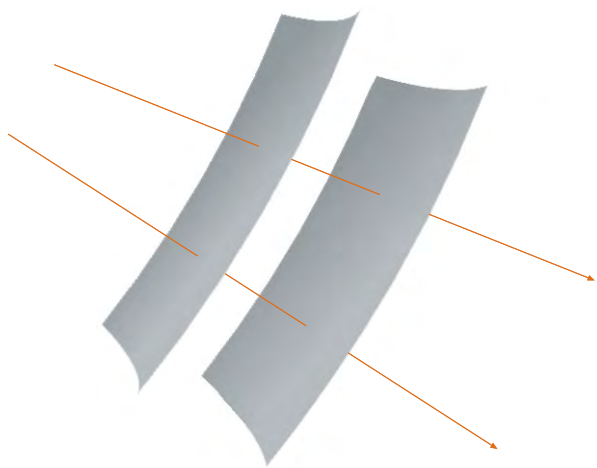
GAMBAR 1 5 - 1 2 Muka gelombang melingkar menyimpang dari sumber titik dalam tangki riak. *(PhotoDisc/Getty Images.)*



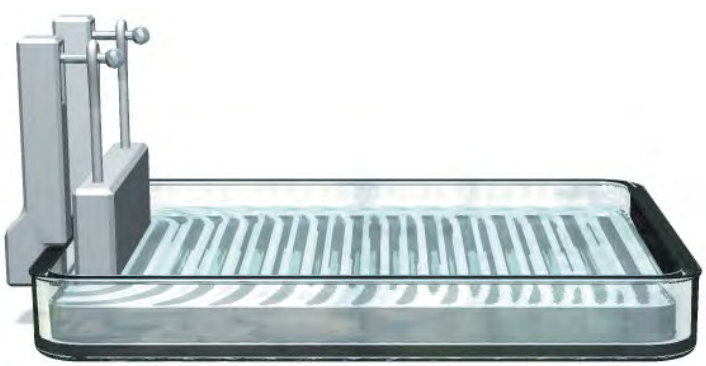
GAMBAR 1 5 - 1 3 Gerak muka gelombang dapat direpresentasikan dengan sinar yang ditarik tegak lurus terhadap muka gelombang. Untuk sumber titik, sinar adalah garis radial yang menyimpang dari sumbernya.

Pergerakan setiap himpunan muka gelombang dapat ditunjukkan oleh sinar-sinar, yang merupakan garis-garis berarah tegak lurus terhadap muka gelombang (Gambar 15-13). Untuk gelombang melingkar atau bola, sinarnya adalah garis radial.

Dalam media homogen, seperti udara dengan kerapatan konstan, muka gelombang bergerak dalam garis lurus ke arah sinar, seperti berkas partikel. Pada jarak yang sangat jauh dari sumber titik, bagian muka gelombang yang cukup kecil dapat didekati dengan permukaan datar (bidang), dan sinar-sinarnya kira-kira merupakan garis sejajar; gelombang seperti itu disebut**gelombang pesawat** (Gambar 15-14). Analog dua dimensi dari gelombang bidang adalah*gelombang garis,* yang merupakan bagian kecil dari muka gelombang melingkar pada jarak yang sangat jauh dari sumbernya. Gelombang garis juga dapat dihasilkan dalam tangki riak oleh sumber garis, seperti pada Gambar 15-15.



GAMBAR 1 5 - 1 4 Gelombang pesawat. Pada jarak yang sangat jauh dari sumber titik, muka gelombang kira-kira bidang paralel, dan sinar kira-kira garis sejajar tegak lurus muka gelombang.



GAMBAR 1 5 - 1 5 Sebuah analog dua dimensi dari gelombang bidang dapat dihasilkan dalam tangki riak oleh papan datar yang berosilasi ke atas dan ke bawah di dalam air untuk menghasilkan muka gelombang, yang merupakan garis lurus.

INTENSITAS GELOMBANG

Jika sebuah sumber titik memancarkan gelombang secara seragam ke segala arah, maka energinya pada suatu jarak R dari sumber didistribusikan secara merata pada permukaan bola dengan radius Rdan daerah A - 4PR2. JikaP adalah daya rata-rata yang dipancarkan oleh sumber, maka daya rata-rata per satuan luas pada jarak R dari sumbernya adalah P >(4PR2). Daya rata-rata per satuan luas yang tegak lurus terhadap arah rambat disebut**intensitas:**

$$\text{SAYA} - \frac{P_{av}}{A} \qquad 15\text{-}29$$

INTENS ITY DEF INED

Satuan SI untuk intensitas adalah watt per meter persegi (W>m2). Di kejauhanR dari sumber titik, intensitasnya adalah

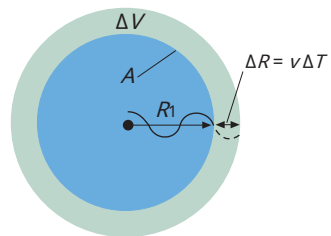
$$\text{SAYA} - \frac{P_{av}}{4PR^2} \qquad 15\text{-}30$$

INTENSITAS KARENA SUMBER TITIK

Intensitas gelombang tiga dimensi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari sumber titik.

Ada hubungan sederhana antara intensitas gelombang dan kerapatan energi dalam medium yang dilaluinya. Gambar 15-16 menunjukkan gelombang bola yang baru saja mencapai radiusR . Volume di dalam radius Rmengandung energi, karena partikel-partikel di daerah itu berosilasi. Wilayah luarR tidak mengandung energi karena gelombang belum mencapainya. Setelah waktu yang singkat¢*T*, gelombang bergerak keluar jarak pendek ¢*R* - v ¢*T* masa lalu R . Energi rata-rata dalam kulit bola dari luas permukaan A, ketebalan v ¢*T*, dan volume¢*V* - A ¢*R* - Av ¢*T* adalah

$$(¢E)_{av} - H_{av}\, ¢V - H A v_{av}\, ¢T$$



Volume kulit = $V = A\,\Delta R = Av\,\Delta T$

GAMBAR 1 5 - 1 6

Laju perpindahan energi adalah daya yang masuk ke dalam kulit. Kekuatan insiden rata-rata adalah

$$P_{av} - \frac{(¢E)}{¢T_{av}} - H A v_{av}$$

dan intensitas gelombang adalah

$$\text{SAYA} - \frac{P_{av}}{A} - H_{av} v \qquad 15\text{-}31$$

Dengan demikian, intensitas sama dengan produk dari kecepatan gelombang v dan kepadatan energi rata-rata H . Mengganti H $_{av} - \frac{1}{2} rv^2 S^2_0$ dari Persamaan 15-28 untuk kerapatan energi dalam gelombang bunyi harmonik, diperoleh

$$\text{SAYA} - H_{av} v - \frac{1}{2} rv^2 S^2_0 v - \frac{1}{2} \frac{P_a}{Rv} \qquad 15\text{-}32$$

di mana kita telah menggunakan s - p >(rvv) dari Persamaan 15-26. Hasil ini—bahwa intensitas gelombang suara sebanding dengan kuadrat amplitudo—adalah sifat umum gelombang harmonik.

Gelombang suara dari handset telepon menyebar di udara. Gelombang telah dibuat terlihat dengan menyapu ruang di depan handset dengan sumber cahaya yang kecerahannya dikendalikan oleh mikrofon.*(Dari Winston E. Kock, Lasers and Holography, 1978, Dover Publications, New York.)*

Telinga manusia dapat menampung berbagai macam intensitas gelombang suara, dari sekitar 10-12 P>m2 (yang biasanya dianggap sebagai ambang pendengaran) hingga sekitar 1 W>m2 (intensitas yang cukup besar untuk merangsang rasa sakit pada kebanyakan orang). Tekanan

amplitudo yang sesuai dengan intensitas ekstrim ini sekitar 3 10^{-5} untuk ambang pendengaran dan 30 Pa untuk ambang nyeri. (Ingat bahwa pascal adalah newton per meter persegi.) Variasi tekanan yang sangat kecil ini menambah atau mengurangi tekanan atmosfer normal sekitar 101,3 kPa.

Contoh 15-7 Pengeras Suara

Diafragma loudspeaker berdiameter 30 cm bergetar pada 1,0 kHz dengan amplitudo 0,020 mm. Dengan asumsi bahwa molekul udara di sekitarnya memiliki amplitudo getaran yang sama, tentukan (*A*) amplitudo tekanan tepat di depan diafragma, (*B*) intensitas suara tepat di depan diafragma, dan (*C*) daya akustik yang dipancarkan. (*D*) Jika bunyi diradiasikan secara merata ke belahan depan, tentukan intensitasnya pada jarak 5,0 m dari pengeras suara.

GAMBAR (*A*) dan (*B*) Amplitudo tekanan dihitung langsung dari P - rvvs (Persamaan 15-26), dan intensitas dari SAYA - 1 2 rv S2y (Persamaan 15-32). (*C*) Radiasi daya ated adalah intensitas kali luas diafragma. (*D*) Luas belahan bumi yang berjari-jariR adalah 2PR2. Kita dapat menggunakan Persamaan 15-29 denganA - 2PR2.

MENYELESAIKAN

(*A*) Persamaan 15-26 menghubungkan amplitudo tekanan dengan amplitudo perpindahan, frekuensi, kecepatan gelombang, dan kerapatan udara:

$$P_0 - rvvs - (1{,}29\ kg/m^3)2P(10^3\ Hz)(343\ m/s)(2.0\ \ 10^{-5}\ M)$$
$$- 55.6\ N/m^2 - \boxed{56\ Pa}$$

(*B*) Persamaan 15-32 menghubungkan intensitas dengan besaran-besaran yang diketahui sama ini:

$$SAYA - \tfrac{1}{2} rv^2 S^2 y - \tfrac{1}{2}(1{,}29\ kg/m^3)[2P(1{,}0\ kHz)]^2(2.0\ \ 10^{-5}\ M)^2(343\ m/s)$$
$$- 3{,}494\ W/m^2 - \boxed{3{,}5\ W/m^2}$$

(c) Daya adalah intensitas dikalikan luas diafragma:

$$P_{av} - IA - (3{,}494\ W/m^2)P(0{,}15\ m)^2 - 0{,}247\ W - \boxed{0{,}25\ W}$$

(*D*) Hitung intensitas di R - 5,0 m, dengan asumsi radiasi seragam ke belahan depan:

$$SAYA - \frac{P_{av}}{A} - \frac{0{,}247\ W}{2P(5{,}0\ m)^2} - 1.57\ 10^{-3}\ P/m^2 - \boxed{1{,}6\ mW/m^2}$$

MEMERIKSA Bagian-(*D*) hasilnya lebih kecil dari Bagian-(*B*) hasil, seperti yang diharapkan. (Kami mengharapkan intensitas paling tinggi tepat di depan diafragma.)

MENGAMBILNYA LEBIH LANJUT Asumsi radiasi seragam di belahan depan tidak terlalu baik karena panjang gelombang dalam hal ini [aku - v/f - (343 m/s)/(1000 s^{-1}) - 34,3 cm] tidak besar dibandingkan dengan diameter speaker. Ada juga beberapa radiasi di arah belakang, seperti yang dapat diamati jika Anda berdiri di belakang pengeras suara.

Pengeras suara di konser rock dapat mengeluarkan lebih dari 100 kali lebih banyak daya daripada pembicara dalam contoh ini.

* ***Tingkat intensitas dan kenyaringan*** Persepsi kita tentang kenyaringan tidak sebanding dengan intensitasnya. Namun, persepsi kita tentang kenyaringan bervariasi secara logaritmik dengan intensitas hingga perkiraan yang baik. Oleh karena itu kami menggunakan skala logaritmik untuk menggambarkan **tingkat intensitas** B gelombang bunyi yang diukur dalam **desibel** (dB) dan didefinisikan oleh

$$B - (10\ dB)\log\frac{Saya}{Saya_0} \qquad 15\text{-}33$$

DEF INIT ION—TINGKAT INTENSITAS DALAM dB

di mana *catatan* mengacu pada logaritma basis-10. Desibel adalah bilangan tak berdimensi, seperti radian. Biasanya, kita menulis Persamaan 15-33 tanpa secara eksplisit menuliskan satuannya. Artinya, kami menulisnya sebagaiB - 10 log(saya > saya0). Di Sini Saya adalah intensitas suara dan Saya adalah 0

Lihat **MatematikaTutorial** *untuk lebih informasi tentang*
Eksponen dan logaritma

tingkat referensi, yang biasanya dianggap sebagai ambang pendengaran:

$$\text{SAYA} - 10^{-12}\ \text{P>m}^2 \qquad \text{15-34}$$

$_0$

ambang pendengaran

Pada skala ini, ambang pendengaran (SAYA - 10^{-12} P>m^2) sesuai dengan tingkat intensitas B - 10 log(10^{-12}>10^{-12}) - 0 dB dan ambang nyeri (SAYA - 1 W>m^2) sesuai dengan B - 10 log(1>10^{-12}) - 10 log 10^{12} - 120dB. Jadi, kisaran intensitas suara dari 10^{-12} P>m^2 ke 1 W>m^2 sesuai dengan tingkat intensitas dari 0 dB hingga 120 dB. Tabel 15-1 mencantumkan tingkat intensitas beberapa suara umum.

Tabel 15-1 Intensitas dan Tingkat Intensitas Beberapa Suara Umum (*Saya* $_0$ 10^{-12} W/m^2)

Sumber	*Saya*/*Saya*$_0$	dB	Keterangan
	10^0	0	Ambang pendengaran
Pernapasan normal	10^1	10	Hampir tidak terdengar
Daun gemerisik	10^2	20	
Bisikan lembut (pada 5 m)	10^3	30	Sangat tenang
Perpustakaan	10^4	40	
Kantor yang tenang	10^5	50	Diam
Percakapan normal (pada 1 m) Lalu	10^6	60	
lintas sibuk	10^7	70	
Kantor yang bising dengan mesin; rata-rata pabrik	10^8	80	
truk berat (pada 15 m); air terjun Niagara	10^9	90	Paparan konstan membahayakan pendengaran
Kereta bawah tanah tua	10^{10}	100	
Kebisingan konstruksi (pada 3 m)	10^{11}	110	
Konser rock dengan amplifier (pada 2 m); lepas landas jet (pada 60 m)	10^{12}	120	Ambang nyeri
Pneumatic riveter; senapan mesin	10^{13}	130	
Lepas landas jet (dekat)	10^{15}	150	
Mesin roket besar (di dekatnya)	10^{18}	180	

Contoh 15-8 kedap suara

Penyerap suara melemahkan suara *tingkat intensitas* sebesar 30 dB. Dengan faktor apa *intensitas* berubah?

GAMBAR Periksa Tabel 15-1 untuk melihat perubahan intensitas untuk setiap 10-dB perubahan tingkat intensitas. Dapatkah Anda membedakan polanya?

MENYELESAIKAN

1. Dari Tabel 15-1, kita dapat melihat bahwa untuk setiap penurunan 10-dB pada tingkat intensitas, intensitasnya berubah dengan faktor 1>10.

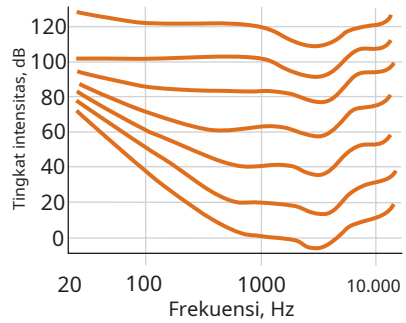
Jadi, jika tingkat suara berkurang 30 dB, maka intensitasnya berubah dengan faktor 10^{-1} 10^{-1} 10^{-1} - 10^{-3}.

MEMERIKSA Kita dapat membandingkan hasil ini dengan hasil yang diperoleh dengan langsung menggunakan Persamaan 15-33. Itu adalah,b - b - 10 log(saya$_2$> saya$_1$) - 10 log(saya$_2$> saya$_0$) - 10 log(saya$_1$> saya$_0$). Memecahkan untuk Sayamemberi SAYA - $10^{(B2-B1)/10}$SAYA . Mengganti -30 untuk b - b memberi SAYA$_2$ - 10^{-3}SAYA$_1$, sehingga memverifikasi hasil kami sebelumnya.

KONSEP PERIKSA 15-1

Ketika radionya rusak, Chuck membeli yang baru yang menghasilkan daya akustik dua kali lebih banyak dari yang lama. Harapannya adalah radio barunya akan terdengar dua kali lebih keras dari radio lamanya. Apakah dia akan kecewa? Menjelaskan.

Sensasi kenyaringan tergantung pada frekuensi serta intensitas suara. Gambar 15-17 adalah plot tingkat intensitas versus frekuensi untuk suara dengan kenyaringan yang sama dengan telinga manusia. (Pada gambar ini, frekuensi diplot pada skala logaritmik untuk menampilkan rentang frekuensi yang luas dari 20 Hz hingga 10 kHz.) Kami mengamati dari plot ini bahwa telinga manusia paling sensitif pada sekitar 4 kHz untuk semua tingkat intensitas.



GAMBAR 15-17 tingkat intensitas versus frekuensi untuk suara yang dianggap memiliki kenyaringan yang sama. Kurva terendah berada di bawah ambang batas pendengaran semua kecuali sekitar satu persen dari populasi. Kurva terendah kedua adalah kira-kira ambang pendengaran untuk sekitar 50 persen populasi.

Contoh 15-9 Anjing menggonggong

Seekor anjing menggonggong menghasilkan sekitar 1,0 mW daya akustik. (*A*) Jika daya ini terdistribusi secara merata ke segala arah, berapakah tingkat intensitas bunyi pada jarak 5,0 m? (*B*) Berapakah tingkat intensitas dua anjing, masing-masing 5,0 m jauhnya, menggonggong pada saat yang sama jika masing-masing memberikan daya 1,0 mW?

GAMBAR Tingkat intensitas ditemukan dari intensitas, yang ditemukan dari Aku - P >(4PR$_{av}$). Untuk dua anjing, intensitasnya ditambahkan.

MENYELESAIKAN

(*A*) 1. Tingkat intensitas B berhubungan dengan intensitas SAYA. Jadi, pertama-tama kita harus menghitung intensitasnya SAYA:

$$B - 10 \log \frac{Saya}{Saya_0}$$

2. Menggunakan Aku - P >(4PR$_{av}$), hitung intensitas pada R - 5,0 m:

$$SAYA_1 - \frac{P_{1\,av}}{4PR^2} - \frac{1.0\ 10^{-3}\ W}{4P(5{,}0\ m)^2} - 3.18\ 10^{-6}\ P>m^2$$

3. Gunakan hasil Anda untuk menemukan tingkat intensitas pada 5 m:

$$B_1 - 10 \log \frac{Saya_1}{Saya_0} - 10 \log \frac{3.18\ 10^{-6}}{1\ 10^{-12}} - \boxed{65{,}0\ dB}$$

(*B*) Jika Saya adalah intensitas gonggongan satu anjing, intensitas gonggongan dua anjing adalah SAYA - 2SAYA :

$$B_2 - 10 \log \frac{Saya_2}{Saya_0} - 10 \log \frac{2Saya_1}{Saya_0} - 10A\log 2 \quad \text{catatan: } B_0 \quad \frac{Saya}{Saya_0}$$

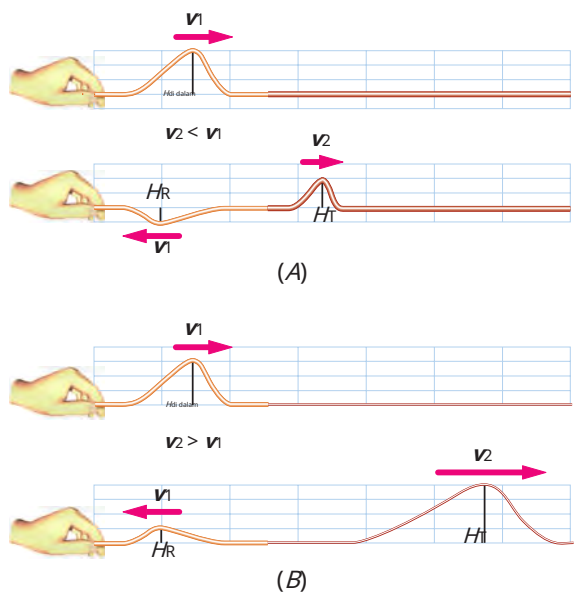
$$- 10 \log 2 \quad B_1 - 3.01 \quad 65{,}0 - \boxed{68{,}0\ dB}$$

MEMERIKSA Jika Bagian-(*B*) hasilnya benar maka setiap kali intensitasnya digandakan, tingkat intensitasnya meningkat sebesar -3 dB. Untuk melihat apakah ini sesuai, kita bagi 65 dB dengan 3 dB untuk mendapatkan 21,7, jadi menggandakan intensitas ambang 21,7 kali harus memberikan intensitas SAYA - 3 10^{-6} P>m^2. Artinya, 2$^{21.7}$Saya harus sama sekitar 3 10^{-6} P>m^2. Mengalikan 1 10^{-12} P>m^2 oleh 2$^{21.7}$ memberikan 3,4 10^{-6} P>m^2, jadi Bagian kita-(*B*) hasilnya masuk akal.

15-4 GELOMBANG MENGHADAPI Hambatan

REFLEKSI, TRANSMISI, DAN REFRAKSI

Ketika gelombang datang pada batas yang memisahkan dua daerah dengan kecepatan gelombang yang berbeda, sebagian dari gelombang dipantulkan dan sebagian ditransmisikan. Gambar 15-18*A* menunjukkan pulsa pada string ringan yang melekat pada string yang lebih berat (satu dengan kecepatan gelombang lebih lambat). Dalam hal ini, pulsa yang dipantulkan pada batas dibalik. Jika senar kedua lebih ringan dari yang pertama (Gambar 15-18*B*), maka pulsa pantul tegak. (Yang kami maksud dengan tegak adalah



GAMBAR 15-18 Tepi terdepan dari pulsa lebih curam daripada tepi belakang karena ujung senar dinaikkan lebih cepat daripada yang diturunkan. (*A*) Pulsa gelombang yang merambat pada seutas tali yang diikatkan pada tali yang lebih besar dengan kecepatan gelombang setengahnya. Pulsa yang dipantulkan dibalik, sedangkan pulsa yang ditransmisikan tidak. (*B*) Sebuah pulsa gelombang yang merambat pada seutas tali yang diikatkan pada seutas tali yang kurang masif di mana cepat rambat gelombangnya dua kali lebih besar. Dalam hal ini, pulsa yang dipantulkan tidak dibalik.

ia memiliki orientasi yang sama dengan pulsa datang.) Pulsa yang ditransmisikan ke string kedua selalu tegak. Seutas tali yang dilekatkan pada suatu titik tetap sama dengan seutas tali yang dilekatkan pada tali kedua dengan massa yang sangat besar per satuan panjang, jadi untuk pulsa datang pada seutas tali yang dilekatkan pada titik tetap, pulsa pantul dibalik. Sebaliknya, jika tali diikatkan pada tali yang massanya dapat diabaikan per satuan panjang, pulsa pantulnya tegak. Ketinggian pulsa datang, ditransmisikan, dan dipantulkan, ditunjukkan pada Gambar 15-18, adalah:H $_{di\ dalam}$, H_T, dan H $_R$masing-masing. NS**koefisien refleksi kuno** R adalah tinggi pulsa pantul dibagi dengan tinggi pulsa datang, dan **koefisien transmisi** T adalah tinggi pulsa yang ditransmisikan dibagi dengan tinggi pulsa datang. Itu adalah,r - h >h dan T - h_R> h_{Saya}dimana ketinggian h_{Saya} $h_{di\ dalam}$, dan H ditunjukkan pada Gambar 15-18. Ekspresi untukR dan T, adalah

$$R - \frac{v_2 - v_1}{v_2 \quad v_1} \quad \text{dan} \quad T - \frac{2v_2}{v_2 \quad v_1} \qquad 15\text{-}35$$

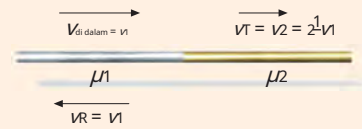
REFLECT ION DAN TRANSMI SS ION COEFF ICI ENTS

Ekspresi ini untuk koefisien refleksi dan transmisi R dan T dikenal sebagai *hubungan Fresnel.* Mereka dapat diturunkan dengan mensyaratkan bahwa tegangan, tinggi tali dan kemiringan tali semua tetap kontinu pada titik di mana massa per satuan panjang tidak kontinu. (Hukum ketiga Newton mensyaratkan bahwa kemiringan harus kontinu.) Perhatikan bahwaT tidak pernah negatif dan itu R negatif jika v_T. Ini berarti pulsa yang ditransmisikan tidak pernah terbalik dan pulsa pantul dibalik jika v $_2$ v_1.

Contoh 15 Dua Kabel Solder

Dua kabel dengan kerapatan massa linier yang berbeda disolder bersama-sama ujung ke ujung dan kemudian diregangkan di bawah tegangan F_T(tegangannya sama pada kedua kawat). Cepat rambat gelombang pada kawat pertama adalah dua kali lipat dari kawat kedua. Gelombang harmonik yang merambat pada kawat pertama datang pada pertemuan kedua kawat tersebut. (*A*) Jika amplitudo gelombang datang adalah A, berapakah amplitudo gelombang pantul dan gelombang pancar? (*B*) Berapa rasionya? m > m rapat massa kawat? (*C*) Berapa fraksi dari daya rata-rata yang datang yang dipantulkan di persimpangan dan berapa fraksi yang ditransmisikan?

GAMBAR Untuk menghitung amplitudo gelombang yang dipantulkan dan ditransmisikan, gunakan A - rA dan A - TA, di mana $A_R$dan A adalah amplitudo gelombang yang dipantulkan dan ditransmisikan, dan R dan T adalah koefisien refleksi dan transmisi yang diberikan dalam Persamaan 15-35. Setiap kekuatan diekspresikan menggunakanP_{av} - $\frac{1}{2}$Mvv^{2}A^2 (Persamaan 15-22). Peristiwa itu, tercermin dan trans- gelombang yang dipancarkan semua berbagi frekuensi yang sama. Karena gelombang pantul dan gelombang datang berada dalam medium yang sama, mereka memiliki kecepatan gelombang yang samav . Kami diberikan bahwa kecepatan gelombang v pada kawat kedua adalah $_1$ z v (Gambar 15-19).



GAMBAR 1 5 - 1 9

MENYELESAIKAN

(*A*) 1. Nyatakan amplitudo yang dipantulkan dan ditransmisikan dalam bentuk amplitudo datang dan koefisien refleksi dan transmisi (Persamaan 15-35):

A_R rA dan A_T TA

2. Gunakan relasi yang diberikan v $_2$2v untuk memecahkan koefisien refleksi dan transmisi:

$$R - \frac{v_2 - v}{v_2 \quad v_1} - \frac{v_2 - 2v_2}{v_2 \quad 2v_2} - - \frac{1}{3}$$

$$T - \frac{2v_2}{v_2 \quad v_1} - \frac{2v_2}{v_2 \quad 2v_2} - \frac{2}{3}$$

jadi A_R - $\boxed{-\frac{1}{3}A}$ dan A_T $\boxed{\frac{2}{3}A}$

(*B*) 1. Untukbanyakhubungan rapat massa dengan cepat rambat gelombang adalah v - 2F >M (Persamaan 15-3). F adalah sama di kedua sisi persimpangan. Selesaikan untukM dan M :

$$v_1 - \frac{F_T}{M_1} \quad \text{dan} \quad v_2 - \frac{F_T}{M_2}$$

$$\text{jadi } M_1 - \frac{F_T}{v_1^2} \quad \text{dan} \quad M_2 - \frac{F}{v_2^2}$$

2. Bagi M oleh M_1 dan menggunakan informasi yang diberikan bahwa $v_1 - 2v_2$: $\frac{M_2}{M_1} - \frac{v_2}{v_2} - \frac{(2v_2)^2}{v_2^2} - \boxed{4}$

(*C*) 1. Tulis ekspresi untuk kejadian, pantulan, dan daya yang ditransmisikan menggunakan $P_{av} - \frac{1}{2}Mv v_2 A_2$ (Persamaan 15-22):

$P_{di\,av} - \frac{1}{2}m_1 v_2 A_2 v_1$

$P_{r\,av} - \frac{1}{2}m_1 v_2 A_2 v_{r\,1}$

$P_{t\,av} - \frac{1}{2}m_2 v_2 A_2 v_{T\,2}$

2. Ganti Bagian-(*A*) menghasilkan ekspresi untuk daya yang dipantulkan dan ditransmisikan:

$P_{r\,av} - \frac{1}{2}m_1 v_2 A - \frac{1}{3}AB^2 v_1 - \frac{1}{18}m_1 v_2 A_2 v_1$

$P_{t\,av} - \frac{1}{2}m_2 v_2 A\,\frac{2}{3}AB^2 v - m_2 v_2 A_2 \frac{2}{9}v_2$

3. Dapatkan ekspresi untuk $P_R > P$ dan untuk $P_T > P$: $\frac{P_{r\,av}}{P_{di\,av}} - \frac{\frac{1}{18}M_1 v_2 A_2 v_1}{\frac{1}{2}m_1 v_2 A_2 v_1 \text{ sebuah } v} - \boxed{\frac{1}{9}}$

$\frac{P_{t\,av}}{P_{di\,av}} - \frac{\frac{2}{9}m_2 A_2 v}{\frac{1}{2}m_1 A_2 v_1^2} - \frac{4}{9}\frac{M_2}{M_1}\frac{v_2}{v_1}$

4. Sederhanakan menggunakan Bagian-(*B*) hasil dan hubungan yang diberikan $v_1 - 2v_2$: $\frac{P_{t\,av}}{P_{di\,av}} - \frac{4}{9}4\frac{v_2}{2v_2} - \boxed{\frac{8}{9}}$

MEMERIKSA Daya pecahan yang dipantulkan ditambah daya pecahan yang ditransmisikan sama dengan satu, seperti yang diharapkan.

MENGAMBILNYA LEBIH LANJUT Gelombang yang dipantulkan terbalik relatif terhadap gelombang datang, sehingga 180 ° keluar dari fase dengannya. Amplitudo negatif sesuai dengan pergeseran fasa 180 °.

MASALAH LATIHAN 15-6 Ulangi Contoh 15-10 kecuali dengan $v - 2v_2$.

Konservasi energi memberikan hubungan lain antara koefisien refleksi dan transmisi. Hubungan ini, yang ditetapkan dalam Soal 15-70 diberikan oleh

$$1 - R_2 \quad \frac{v_1}{v_2} T_2 \qquad 15\text{-}36$$

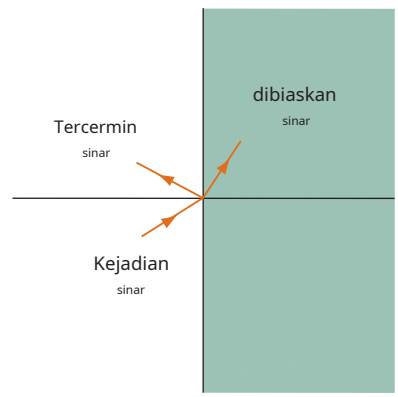
di mana R_2 adalah fraksi dari daya datang yang dipantulkan dan $(v > v)T_2$ adalah pecahan yang ditransmisikan.

MASALAH LATIHAN 15-7

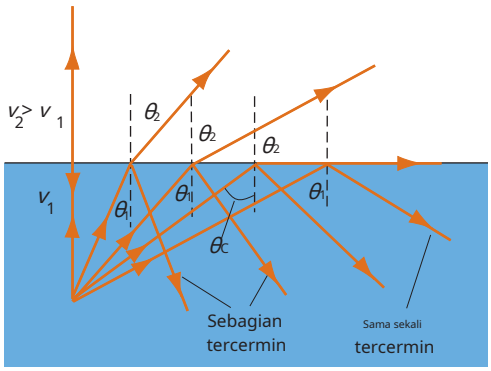
Tunjukkan bahwa nilai R dan T untuk kabel dalam Contoh 15-10 memenuhi Persamaan 15-36.

Dalam tiga dimensi, batas antara dua daerah dengan kecepatan gelombang yang berbeda adalah permukaan. Gambar 15-20 menunjukkan insiden sinar pada permukaan batas seperti itu. Contoh ini dapat berupa gelombang suara di udara yang mengenai permukaan padat atau cair. Sinar pantul membuat sudut dengan normal ke permukaan sama dengan sinar datang, seperti yang ditunjukkan.

Sinar yang ditransmisikan dibelokkan menuju atau menjauhi garis normal—bergantung pada apakah cepat rambat gelombang di medium kedua lebih kecil atau lebih besar daripada di medium datang. Pembengkokan sinar yang ditransmisikan disebut **pembiasan.** Jika cepat rambat gelombang di medium kedua lebih besar daripada di medium datang (seperti yang terjadi ketika gelombang cahaya di kaca atau air dibiaskan ke udara), sinar



ANGKA 15-20 Gelombang menghantam permukaan batas antara dua media di mana kecepatan gelombang berbeda. Sebagian dari gelombang dipantulkan dan sebagian ditransmisikan. Perubahan arah sinar yang ditransmisikan (dibiaskan) disebut pembiasan.



GAMBAR 15-21 Cahaya dari sumber di dalam air dibelokkan menjauhi garis normal ketika memasuki udara. Untuk sudut datang di atas sudut kritiskamu,tidak ada sinar yang $_C$ ditransmisikan, suatu kondisi yang dikenal sebagai pemantulan internal total.

menggambarkan arah rambat yang dibelokkan menjauhi garis normal, seperti terlihat pada Gambar 15-21. Ketika sudut datang diperbesar, sudut bias meningkat, sampai sudut datang kritis tercapai di mana sudut biasnya adalah 90°. Untuk sudut datang yang lebih besar dari sudut kritis, tidak ada sinar bias, fenomena yang dikenal sebagai**refleksi internal total.**

Jumlah energi yang dipantulkan dari permukaan tergantung pada permukaan. Dinding datar yang kaku, lantai, dan langit-langit merupakan reflektor yang baik untuk gelombang suara, sedangkan bahan berpori dan kurang kaku, seperti kain di gorden dan penutup furnitur, menyerap banyak suara yang datang. Pantulan gelombang suara memainkan peran penting dalam desain ruang kuliah, perpustakaan, atau auditorium musik. Jika ruang kuliah memiliki banyak permukaan pantul yang datar, ucapan sulit dipahami karena banyaknya gema yang secara bersamaan tiba di telinga pendengar. Bahan penyerap sering ditempatkan di dinding dan langit-langit untuk mengurangi pantulan tersebut. Di ruang konser, cangkang pemantul ditempatkan di belakang orkestra, dan panel pemantul digantung di langit-langit untuk memantulkan dan mengarahkan suara kembali ke pendengar.

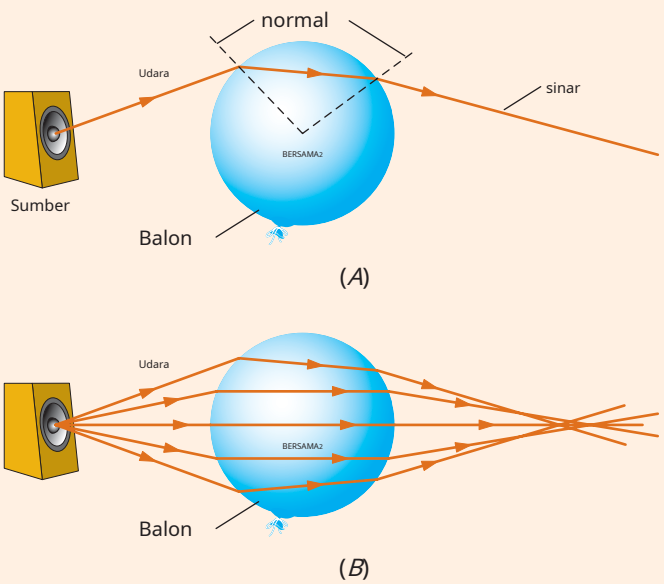
(Courtesy of Davies Symphony Hall.)

Contoh 15-11 Alat Bantu Dengar Balon

Konseptual

Demonstrasi fisika populer menggunakan balon cuaca yang diisi dengan karbon dioksida. Jika Anda meletakkan balon di antara Anda dan sumber suara, suaranya akan semakin keras. Mengapa demikian?

GAMBAR Massa molar karbon dioksida lebih besar daripada massa molar efektif udara. Dengan demikian, suara bergerak lebih cepat di udara daripada di karbon dioksida pada tekanan atmosfer. Untuk "melihat" mengapa suara menjadi lebih keras ketika balon berada di antara Anda dan sumber suara, gambarlah diagram sinar suara saat melewati balon. Sinar akan dibiaskan (dibelokkan) ketika ditransmisikan melalui permukaan di mana kecepatan suara berubah.



ANGKA 15-22

MENYELESAIKAN

1. Menelusuri sinar dari sumber suara melalui bagian atas balon (Gambar 15-22*A*). Sinar akan dibiaskan mendekati garis normal saat memasuki balon, dan menjauhi garis normal saat keluar dari balon:

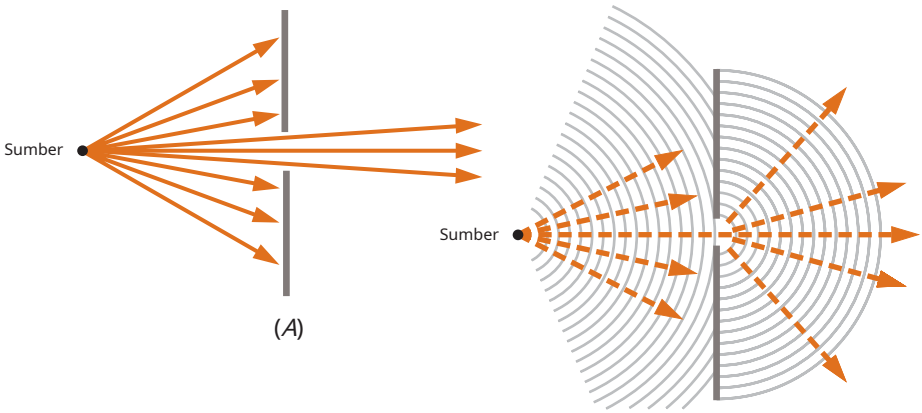
2. Ulangi langkah 1 untuk empat atau lima sinar tambahan, termasuk beberapa yang melewati bagian bawah balon (Gambar 15-22*B*).

3. Gunakan diagram untuk menjelaskan mengapa suara lebih keras ketika balon berada di antara Anda dan sumber suara: Suara paling keras di daerah di mana sinar berpotongan.

MEMERIKSA Balon itu berbunyi seperti kaca pembesar untuk menyalakan. Di kaca, cahaya merambat lebih lambat daripada di udara, sama seperti di CO_2 suara bergerak lebih lambat daripada di udara.

DIFRAKSI

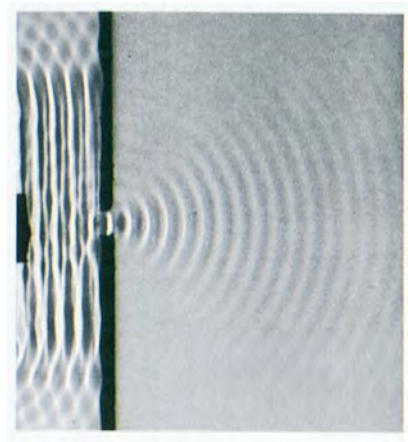
Jika muka gelombang terhalang sebagian oleh rintangan, bagian muka gelombang yang tidak terhalang akan ditekuk di belakang rintangan. Pembengkokan muka gelombang ini disebut **difraksi.** Hampir semua difraksi terjadi untuk bagian muka gelombang yang lewat dalam beberapa panjang gelombang dari tepi penghalang. Untuk bagian muka gelombang yang melewati lebih jauh dari beberapa panjang gelombang dari tepi, difraksi diabaikan dan gelombang merambat dalam garis lurus ke arah sinar datang. Ketika muka gelombang menghadapi penghalang dengan bukaan (lubang) hanya beberapa panjang gelombang, bagian dari muka gelombang yang melewati bukaan semuanya lewat dalam beberapa panjang gelombang dari sebuah tepi. Dengan demikian, muka gelombang datar menekuk dan menyebar dan menjadi bola atau lingkaran (Gambar 15-23). Sebaliknya, untuk seberkas *partikel* jatuh pada penghalang dengan lubang, bagian dari balok yang melewati lubang melakukannya tanpa mengubah arah partikel (Gambar 15-24). Difraksi adalah salah satu karakteristik utama yang membedakan gelombang dari partikel. Kita akan membahas bagaimana difraksi muncul ketika kita mempelajari interferensi dan difraksi cahaya pada Bab 35.



Meskipun gelombang yang melewati celah selalu membengkok, atau berdifraksi, sampai batas tertentu, jumlah difraksi tergantung pada apakah panjang gelombangnya kecil atau besar relatif terhadap ukuran bukaan. Jika panjang gelombang relatif besar terhadap bukaan, seperti pada Gambar 15-25, efek difraksinya besar, dan gelombang menyebar saat melewati celah—seolah-olah gelombang berasal dari sumber titik. Di sisi lain, jika panjang gelombang relatif kecil terhadap bukaan, efek difraksi kecil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15-23. Di dekat tepi bukaan, muka gelombang terdistorsi dan gelombang tampak sedikit menekuk. Untuk sebagian besar, bagaimanapun, muka gelombang tidak terpengaruh dan gelombang merambat dalam garis lurus, seperti berkas partikel. **pendekatan sinar.** Muka gelombang terdistorsi *di dekat* tepi rintangan yang menghalangi bagian dari muka gelombang. Oleh *di dekat* kami maksudkan dalam beberapa panjang gelombang dari tepi.

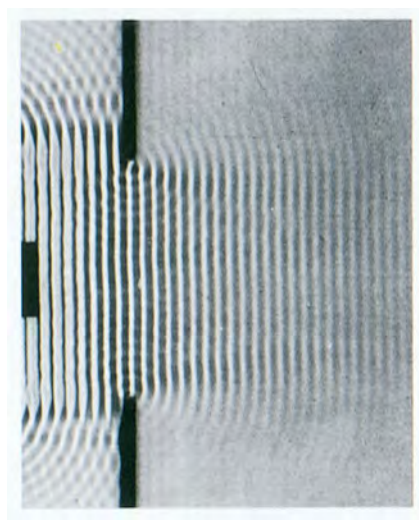
Karena panjang gelombang suara yang dapat didengar (yang berkisar dari beberapa sentimeter hingga beberapa meter) umumnya besar dibandingkan dengan lubang dan penghalang (pintu atau jendela, dan orang, misalnya), difraksi gelombang suara adalah fenomena yang sering diamati. Di sisi lain, panjang gelombang cahaya tampak 4 10^{-7} ke 7 10^{-7} m) sangat kecil dibandingkan dengan ukuran objek dan lubang biasa sehingga difraksi cahaya tidak mudah terlihat; cahaya tampak merambat lurus. Namun demikian, difraksi cahaya merupakan fenomena penting, yang kita pelajari secara rinci di Bab 35.

Difraksi membatasi seberapa akurat objek kecil dapat ditemukan dengan memantulkan gelombang darinya dan seberapa baik detail objek dapat diselesaikan. Gelombang tidak cukup dipantulkan dari objek yang lebih kecil dari panjang gelombang, sehingga detail tidak dapat diamati pada skala yang lebih kecil dari panjang gelombang yang digunakan. Jika gelombang dengan panjang gelombangaku digunakan untuk menemukan suatu objek, maka posisinya hanya dapat diketahui dalam ketidakpastian satu panjang gelombang.



ANGKA 1 5 - 2 3 Gelombang pesawat dalam riak tangki bertemu penghalang dengan bukaan yang lebarnya hanya beberapa panjang gelombang. Di luar penghalang adalah gelombang melingkar yang konsentris tentang bukaan, seolah-olah ada sumber titik di bukaan. *(Fotografer Dasar.)*

GAMBAR 1 5 - 2 4 Perbandingan partikel dan gelombang yang melewati celah sempit di penghalang. (*A*) Partikel yang ditransmisikan adalah terbatas pada balok sudut sempit. (*B*) Gelombang yang ditransmisikan menyebar (memancar luas) dari aperture, yang bertindak seperti sumber titik gelombang melingkar.



GAMBAR 1 5 - 2 5 Gelombang bidang dalam tangki riak bertemu penghalang dengan lebar bukaan yang besar dibandingkan dengan l. Gelombang berlanjut ke arah depan, dengan hanya sedikit menyebar ke daerah di kedua sisi bukaan. *(Fotografer Dasar.)*

Gelombang bunyi yang frekuensinya di atas 20.000 Hz disebut **gelombang ultrasonik.**Karena panjang gelombangnya yang sangat kecil, berkas gelombang ultrasonik yang sempit dapat dikirim keluar dan dipantulkan dari benda-benda kecil. Kelelawar dapat memancarkan dan mendeteksi frekuensi hingga sekitar 120 kHz, sesuai dengan panjang gelombang 2,8 mm, yang mereka gunakan untuk menemukan mangsa kecil seperti ngengat. Sistem ekolokasi, yang disebut sonar (dari *jadi* dan *tidak* vigasi *R*Anging), digunakan untuk mendeteksi garis besar objek terendam dengan gelombang suara. Frekuensi yang digunakan oleh pencari ikan yang tersedia secara komersial berkisar antara 25 hingga 200 kHz, dan lumba-lumba menghasilkan klik ekolokasi dalam rentang frekuensi yang sama. Dalam kedokteran, gelombang ultrasonik digunakan untuk tujuan diagnostik. Gelombang ultrasonik dilewatkan melalui tubuh manusia dan informasi tentang frekuensi dan intensitas gelombang yang ditransmisikan dan dipantulkan diproses untuk membangun gambar tiga dimensi interior tubuh, yang disebut sonogram.

(Sistem Medis GE/Peneliti Foto, Inc.)

15-5 EFEK DOPPLER

Jika sumber gelombang dan penerima bergerak relatif satu sama lain, frekuensi yang diterima tidak sama dengan frekuensi sumber. Jika mereka bergerak lebih dekat bersama-sama, frekuensi yang diterima lebih besar dari frekuensi sumber; dan jika mereka bergerak lebih jauh, frekuensi yang diterima lebih kecil dari frekuensi sumber. Ini disebut**Efek Doppler.** Contoh yang umum adalah penurunan nada suara klakson mobil yang mendekat saat mobil lewat—dan kemudian surut.

Dalam diskusi berikut, semua gerakan relatif terhadap medium. Pertimbangkan sumber bergerak dengan kecepatankamu, ditunjukkan pada Gambar 15-26*A* dan *B*, dan penerima stasioner. Sumber memiliki frekuensiF (dan titik T - 1>F), frekuensi yang diterima F , jumlah puncak gelombang yang melewati penerima per satuan waktu, terkait dengan panjang gelombang aku (jarak antara puncak yang berurutan) dan kecepatan gelombang relatif v oleh

$$F_R = \frac{v}{\text{aku}} \quad \text{(penerima stasioner)} \qquad 15\text{-}37$$

Puncak gelombang meninggalkan sumbernya pada waktunya T (Gambar15-26*C*) dan puncak gelombang berikutnya meninggalkan sumber pada waktunya T . Waktu antara kedua peristiwa tersebut adalah T - t - t , dan selama waktu ini sumber dan lambang meninggalkan sumber pada waktunya T perjalanan di-tances kamu T dan vT, masing-masing. Akibatnya, pada waktu T , jarak antara sumber dan puncak berangkat pada waktu T sama dengan panjang gelombang l. Di belakang sumber II - (v u)T, dan di depan sumbernya II - (v - u)T, asalkan kamu v. (Jika kamu tekan keduanya aku sebagai v, tidak ada muka gelombang yang mencapai daerah di depan sumbernya.) Kita dapat memperluas aku

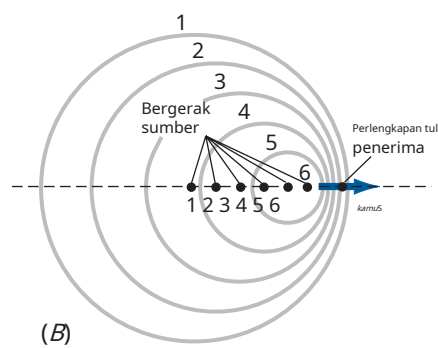
$$\text{aku} = (v \mp \text{kamu}_s)T = \frac{v \mp \text{kamu}_s}{F_s} \qquad 15\text{-}38$$

di mana tanda minus digunakan jika II dan tanda plus digunakan jika II . Kami telah mengganti 1> F untuk T. Mengganti aku dalam Persamaan 15-37 dan penataan ulang memberikan

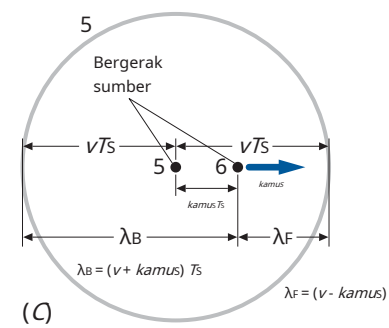
$$F_R = \frac{v}{\text{aku}} F_s = \frac{v}{v \mp \text{kamu}_s} F_s \quad \text{(penerima stasioner)} \qquad 15\text{-}39$$

ANGKA 15-26 (*A*) Gelombang dalam riak tangki yang dihasilkan oleh sumber titik yang bergerak ke kanan. Muka gelombang lebih dekat di depan sumber dan lebih jauh di belakang sumber. (*B*) Muka gelombang berurutan yang dipancarkan oleh sumber titik yang bergerak dengan kecepatan kamu ke kanan. Jumlah muka gelombang sesuai dengan posisi sumber ketika gelombang dipancarkan. (*C*) Sumber bergetar satu siklus dalam waktu T. Selama waktu Tsumber bergerak jauh kamu T dan muka gelombang kelima menempuh jarak vT. Di depan sumber panjang gelombang aku - (v - u)T, ketika di belakang sumber aku - (v u)T. *(pendidikan Pusat Pengembangan.)*

(*A*)



(*B*)



(*C*)

Ketika penerima bergerak relatif terhadap medium, frekuensi yang diterima berbeda hanya karena penerima bergerak melewati lebih banyak atau lebih sedikit puncak gelombang dalam waktu tertentu. MembiarkanT menunjukkan waktu antara kedatangan puncak yang berurutan untuk penerima yang bergerak dengan kecepatan kamu Kemudian, selama waktu antara kedatangan dua puncak yang berurutan, masing-masing puncak akan menempuh jarak vT, dan pada saat yang sama penerima akan menempuh jarak kamu T Jika penerima bergerak ke arah yang berlawanan dengan arah gelombang (Gambar 15-27), maka selama waktu T, jarak puncak bergerak ditambah jarak bergerak penerima sama dengan panjang gelombang. Itu adalah,vT kamu T - aku, atau T - aku>(v kamu). [Jika penerima bergerak ke arah yang sama dengan gelombang, maka vT - aku - kamu T, jadi T - aku>(v - u)]. Karena F - aku>T, kita punya

$$F_R = \frac{1}{T_R} = \frac{v - \text{kamu}_R}{\text{aku}} \qquad 15\text{-}40$$

dimana, jika penerima bergerak ke arah yang sama dengan gelombang, frekuensi yang diterima lebih rendah, jadi kami memilih tanda negatif. Jika penerima bergerak ke arah yang berlawanan dengan gelombang, frekuensinya lebih tinggi, jadi kami memilih tanda positif. Menggantiaku dari Persamaan 15-38, kita peroleh

$$F_R = \frac{v - \text{kamu}_R}{v - \text{kamu}_S} F \qquad 15\text{-}41A$$

Pilihan yang tepat untuk tanda plus atau minus paling mudah ditentukan dengan mengingat bahwa frekuensi cenderung meningkat baik ketika sumber bergerak menuju penerima maupun ketika penerima bergerak menuju sumber. Misalnya, jika penerima bergerak ke arah sumber, tanda plus dipilih di pembilang, yang cenderung meningkatkan frekuensi yang diterima; jika sumber menjauh dari penerima, tanda plus dipilih di penyebut, yang cenderung mengurangi frekuensi yang diterima. Persamaan 15-41*A* tampak lebih simetris, dan dengan demikian lebih mudah diingat, jika dinyatakan dalam bentuk

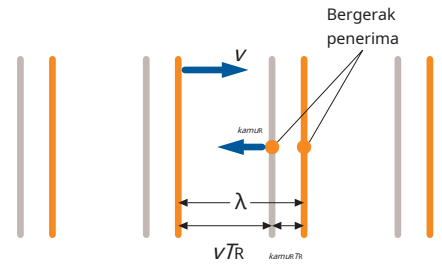
$$\frac{F_R}{v - \text{kamu}_R} = \frac{F_S}{v - \text{kamu}_S} \qquad 15\text{-}41B$$

Dapat ditunjukkan (lihat Soal 83) bahwa jika keduanya kamu dan kamu jauh lebih kecil dari kecepatan gelombang v, maka pergeseran frekuensi ¢f - f - f diberikan kira-kira oleh

$$\frac{¢F}{F_S} = \frac{\text{kamu}}{v}(u \text{ V } v) \qquad 15\text{-}42$$

di mana kamu - kamu kamu adalah kecepatan sumber relatif terhadap penerima.

Dalam kerangka acuan di mana media bergerak (misalnya, kerangka acuan tanah jika udara adalah media dan jika ada angin bertiup), kecepatan gelombangv digantikan oleh v-vu, di mana kamu adalah kecepatan angin relatif terhadap tanah.



ANGKA 1 5 - 2 7 Waktu antara kedatangan puncak gelombang pada penerima adalah T. Puncak gelombang diwakili oleh garis oranye ketika puncak gelombang mencapai penerima, dan mereka diwakili oleh garis abu-abu ketika puncak berikutnya mencapai penerima. Selama waktuTpenerima menempuh jarak kamu T , sementara puncak gelombang menempuh jarak vT.

! Persamaan 15-37 sampai 15-42 hanya valid dalam kerangka acuan medium propagasi.

***STRATEGI PEMECAHAN MASALAH*Memecahkan**

Masalah yang Melibatkan Pergeseran Doppler

GAMBAR Memecahkan masalah yang melibatkan pergeseran Doppler berarti menggunakan persamaan

$$F_R = \frac{v - \text{kamu}_R}{v - \text{kamu}_S} F$$

(Persamaan 15-41*A*).

MENYELESAIKAN

1. Temukan kecepatan sumbernya kamu dan penerima kamu dalam kerangka acuan medium propagasi.
2. Temukan arah gerakan sumber dan penerima dalam kerangka acuan yang sama.
3. Substitusikan nilai ke dalam Persamaan 15-41*A*. Baik sumber yang bergerak menuju penerima maupun penerima yang bergerak menuju sumber cenderung meningkatkan frekuensi yang diterima. Jadi, jika sumber bergerak menuju penerima,

pilih tanda minus di penyebut, dan jika penerima bergerak ke arah sumber, pilih tanda plus di pembilang.

4. Jika gelombang memantul dari reflektor sebelum mencapai penerima, perlakukan reflektor terlebih dahulu sebagai penerima dan terapkan Persamaan 15-41*A*, kemudian perlakukan reflektor sebagai sumber dan terapkan Persamaan 15-41*A* sekali lagi.

MEMERIKSA Jika jarak antara sumber dan penerima berkurang, maka frekuensi yang diterima F lebih tinggi dari frekuensi sumber F . Jika jarak ini bertambah, maka F lebih rendah dari F .

Contoh 15-1 membunyikan klakson

Frekuensi klakson mobil adalah 400 Hz. Jika klakson membunyikan klakson saat mobil bergerak dengan kecepatankamu - 34 m>s (sekitar 122 km>j) melalui udara diam menuju penerima stasioner, temukan (*A*) panjang gelombang suara yang melewati penerima, dan (*B*) frekuensi yang diterima. Misalkan cepat rambat bunyi di udara adalah 343 m>s. (*C*) Temukan panjang gelombang suara yang melewati penerima dan temukan frekuensi yang diterima jika mobil diam ketika klakson membunyikan klakson dan penerima bergerak dengan kecepatan kamu - 34 m>s ke arah mobil.

GAMBAR (*A*) Gelombang di depan sumber dikompresi, jadi kami menggunakan tanda minus aku - (v kamu)>f(Persamaan 15-38). (*B*) Kami menghitung frekuensi yang diterima menggunakan f [(v u)>(vu)]f (Persamaan 15-41*A*). (*C*) Untuk penerima bergerak, kami menggunakan persamaan yang sama tions seperti di Bagian (*A*) dan (*B*).

MENYELESAIKAN

(*A*) Menggunakan Persamaan 15-38, hitung panjang gelombang di depan mobil. Di depan sumber panjang gelombang lebih pendek, jadi pilihlah tanda yang sesuai:

$$\text{aku} - \frac{v - u}{F} - \frac{343\ \text{m>s} - 34\ \text{m>s}}{400\text{Hz}} - 0{,}758\ \text{m} - \boxed{0{,}76\ \text{m}}$$

(*B*) Menggunakan Persamaan 15-41*A* dengan kamu - 0, pecahkan frekuensi yang diterima:

$$F - \frac{v \quad \text{kamu}}{v \quad \text{kamu}} F - \frac{v}{v - u} F - A \frac{343}{343 - 34} B(400\text{Hz}) - 453\text{Hz} - \boxed{450\text{Hz}}$$

(*C*) 1. Menggunakan Persamaan 15-38 dengan kamu - 0, hitung panjang gelombang di depan sumber:

$$\text{aku} - \frac{v \quad \text{kamu}}{F} - \frac{343\ \text{m>s}}{400\text{Hz}} - 0{,}858\ \text{m} - \boxed{0{,}86\ \text{m}}$$

2. Frekuensi yang diterima diberikan oleh Persamaan 15-41*A* dengan kamu - 0. Sumber mendekati penerima, sehingga frekuensinya bergeser ke atas. Pilih tanda yang sesuai:

$$F - \frac{v \quad \text{kamu}}{v \quad \text{kamu}} F - \frac{v \quad \text{kamu}}{v} F - A1 \quad \frac{\text{kamu}}{v} BF - A1 \quad \frac{34}{343} B(400\text{Hz}) - \boxed{440\text{Hz}}$$

MEMERIKSA Penerima bergerak sekitar 10% dari kecepatan suara dan frekuensi yang diterima sekitar 10% lebih tinggi dari frekuensi sumber, yang masuk akal. (Hati-hati, ini hanya berfungsi jika sumbernya diam.)

MENGAMBILNYA LEBIH LANJUT Frekuensi F juga dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 15-40.

MASALAH LATIHAN 15-8 Saat kereta api yang bergerak dengan kecepatan 90 km>jam mendekati pendengar yang tidak bergerak pada hari yang tidak berangin, membunyikan klaksonnya, yang memiliki frekuensi 630 Hz. (*A*) Berapa panjang gelombang gelombang suara di depan kereta api? (*B*) Berapa frekuensi yang didengar pendengar? (Gunakan 343 m>s untuk kecepatan suara.)

Contoh 15- Kecepatan Gelombang *Konteks-Kaya*

Anda bekerja untuk sebuah perusahaan asuransi. Sebuah asteroid menabrak laut menghasilkan tsunami. Ketika gelombang menghantam daratan, gelombang setinggi 10 m menimbulkan banyak kerusakan. Bos Anda ingin tahu seberapa cepat gelombang besar itu bergerak. Mengetahui bahwa Anda mengambil kursus fisika, dia meminta Anda untuk mencari tahu. Yang harus Anda lakukan hanyalah audio dari tape recorder yang ditemukan di pohon setelah ombak surut. Audio pada rekaman itu memiliki sirene di latar belakang, dan di antara bunyi sirene peringatan lokal ada gema sirene yang samar. Anda mengukur frekuensi

suara yang dihasilkan oleh sirine beserta gemanya dan ternyata sirine tersebut memiliki frekuensi 4000 Hz, tetapi gema tersebut memiliki frekuensi 4080 Hz. Seberapa cepat gelombang besar itu mendekat?

GAMBAR Anda memeriksa dengan layanan cuaca dan menemukan tidak ada angin pada saat tsunami melanda. Selain itu, suhu yang dilaporkan adalah 20°C, sehingga kecepatan suara adalah 343 m>s. Pertama, terapkan persamaan efek Doppler (Persamaan 15-41*A*) untuk menghitung frekuensi suara yang diterima oleh tsunami dalam hal kecepatan kamu dari gelombang besar. Terapkan persamaan lagi, kali ini dengan mempertimbangkan gelombang besar sebagai sumber suara dan tape recorder sebagai penerima. Asumsikan bahwa tape recorder tidak bergerak.

MENYELESAIKAN

1. Terapkan persamaan efek Doppler dengan kamu - 0 untuk menghubungkan frekuensi F diterima oleh gelombang besar dengan kecepatan kamu gelombang besar:

$$F_R - \frac{v \quad kamu_R}{v \quad kamu_S} F_S - \frac{v \quad kamu}{v} F_S \qquad F_R - \frac{v \quad kamu}{v} F_S$$

2. Terapkan persamaan efek Doppler, kali ini dengan kamu - 0, untuk menghubungkan frekuensi Fœ diterima oleh tape recorder dengan kecepatan gelombang besar. Gunakan hasil langkah-1F sebagai frekuensi gelombang besar sebagai sumber suara:

$$F_R^{œ} \frac{v \quad kamu_R}{v \quad kamu_S} Fœ - \frac{v}{v - u} F_R \qquad Fœ_R - \frac{v}{v - u} F_R$$

3. Kami sekarang memiliki dua persamaan dan dua yang tidak diketahui. Substitusikan hasil langkah-1 ke hasil langkah-2 dan sederhanakan:

$$F_R^{œ} \frac{v}{v - u} F_R - \frac{v}{v - u} \frac{v \quad kamu}{v} F_S \qquad Fœ_R - \frac{v \quad kamu}{v - u} F_S$$

4. Selesaikan untuk kecepatannya kamu:

$$kamu - \frac{Fœ_R - F_S}{fœ_R f_S} v - \frac{4400 \text{ Hz} - 4000 \text{ Hz}}{4400 \text{ Hz} \; 4000 \text{ Hz}} 343 \text{ m>s} - \boxed{16{,}3 \text{ m>s}}$$

MEMERIKSA Enam belas meter per detik kira-kira dua kali lebih cepat seseorang dapat berlari dalam kondisi ideal. Setelah melihat video tsunami menghantam pantai, ini sepertinya kecepatan yang masuk akal.

Contoh akrab lainnya dari efek Doppler adalah radar yang digunakan oleh polisi untuk mengukur kecepatan mobil. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh pemancar radar menyerang mobil yang bergerak. Mobil bertindak sebagai penerima bergerak dan sumber bergerak saat gelombang memantulkannya kembali ke penerima radar. Persamaan 15-41a tidak berlaku untuk gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik memerlukan penggunaan rumus efek Doppler relativistik. (Efek Doppler relativistik dibahas berikut Contoh 15-14.) Ternyata jikakamu V C, di mana *C* adalah kecepatan cahaya, Persamaan 15-42 berlaku untuk gelombang elektromagnetik.

Contoh 15- Radar Polisi

Cobalah sendiri

Unit radar di mobil polisi mengirimkan gelombang elektromagnetik yang bergerak dengan kecepatan cahaya C. Arus listrik di antena unit radar berosilasi pada frekuensi F_S. Gelombang memantul dari mobil yang melaju menjauh dari mobil polisi dengan kecepatan kamu dibandingkan dengan mobil polisi. Ada perbedaan frekuensi sebesar¢F di antara F_S dan $Fœ_X$, frekuensi yang diterima di mobil polisi. Menemukan kamu istilah dari F_S dan ¢F.

GAMBAR Gelombang radar menyerang mobil yang melaju kencang pada frekuensi F_R. Frekuensi ini kurang dari F_S karena mobil bergerak menjauhi sumbernya. Pergeseran frekuensi diberikan oleh¢f>f - u>v (Persamaan 15-42) dengan v - c. Mobil kemudian bertindak sebagai sumber bergerak yang memancarkan gelombang frekuensi F_R. Unit polisi mendeteksi gelombang frekuensi $Fœ_X$ F_R karena sumbernya (Mobil yang melaju kencang) menjauh dari mobil polisi. Beda frekuensinya adalah $Fœ_X - F_S$.

MENYELESAIKAN

Tutup kolom di sebelah kanan dan coba ini sendiri sebelum melihat jawabannya.

Langkah	Jawaban
1. Unit radar harus dapat menentukan kecepatan hanya berdasarkan apa yang ditransmisikan dan apa yang dideteksinya.	Unit radar harus menentukan *kamu* istilah dari F dan $Fœ_S$. Kami memecahkan ¢f>f- u>v (Persamaan 15-42) untuk *kamu* istilah dari F dan ¢f - $fœ_R$ - F_S.
2. Perbedaan frekuensi ¢F adalah perbedaan frekuensi¢f - f - f ditambah perbedaan frekuensi ¢f - f - f . 2 R	$¢F - ¢F_1 \quad ¢F_2$
3. Menggunakan Persamaan 15-42 dengan v - c, substitusikan perbedaan frekuensi pada langkah 2.	$¢F - - \frac{kamu}{C} F_S - \frac{kamu}{C} F_R - - \frac{kamu}{C}(F_S \quad F_R)$
4. Sekali lagi menggunakan Persamaan 15-42, selesaikan untuk F_R istilah dari F_S.	$\frac{¢F}{F_S} - - \frac{kamu}{C}$ jadi F_R - A1 - $\frac{kamu}{C}$BF_S

5. Substitusikan hasil langkah-4 Anda ke hasil langkah-3 Anda dan sederhanakan. ¢F - - kamu/C A2 - kamu/C BF$_s$

6. Dibandingkan dengan 2, u>c diabaikan. Gunakan ini untuk menyederhanakan hasil langkah-5 dan selesaikan untukkamu istilah dari ¢F dan F . S ¢F - -2 kamu/C F$_s$ jadi kamu - - ¢F/2F$_s$ C - ƒ ¢Fƒ/2F$_s$ C

MEMERIKSA Hasil langkah-6 adalah rasio tanpa dimensi dikalikan kecepatan cahaya, sehingga memiliki dimensi yang tepat untuk sebuah kecepatan. Dengan demikian, dimensi hasil langkah-6 masuk akal.

MENGAMBILNYA LEBIH LANJUT Perbedaan frekuensi antara dua gelombang dengan frekuensi yang hampir sama mudah dideteksi karena kedua gelombang berinterferensi untuk menghasilkan gelombang yang amplitudonya berosilasi dengan frekuensi. ƒ ¢F, yang disebut frekuensi ketukan. Interferensi dan ketukan dibahas dalam Bab 16.

MASALAH LATIHAN 15-9 Menghitung ¢F jika F - 1,50 10^9 Hz, C - 3,00 10^8 m>s, dan kamu - 50,0 m>s. S

Pergeseran Doppler dan relativitas Kita melihat dari Contoh 15-12 (dan Persamaan 15-39, 15-40, dan 15-41) bahwa besarnya pergeseran frekuensi Doppler tergantung pada apakah sumber atau penerima yang bergerak relatif terhadap medium. Untuk suara, kedua situasi ini secara fisik berbeda. Misalnya, jika Anda bergerak relatif terhadap udara diam, Anda merasakan udara mengalir melewati Anda. Dalam kerangka referensi Anda, ada angin. Untuk gelombang suara di udara, oleh karena itu, kita dapat mengetahui apakah sumber atau penerima bergerak dengan mencatat jika ada angin dalam kerangka referensi sumber atau penerima. Namun, cahaya dan gelombang elektromagnetik lainnya merambat melalui ruang kosong di mana tidak ada media yang merambat. Tidak ada "angin" untuk memberi tahu kita apakah sumber atau penerima bergerak. Menurut teori relativitas Einstein, gerak mutlak tidak dapat dideteksi,C untuk cahaya, tidak tergantung pada gerakannya relatif terhadap sumbernya. Jadi Persamaan 15-41 tidak bisa benar untuk pergeseran Doppler untuk cahaya. Dua modifikasi harus dilakukan dalam menghitung efek Doppler relativistik untuk cahaya. Pertama, cepat rambat gelombang yang melewati penerima adalahC, yang tidak tergantung pada gerakan penerima. Kedua, selang waktu antara pancaran puncak gelombang yang berurutan, yaituT - 1>F pada kerangka acuan sumber, berbeda pada kerangka acuan penerima ketika kedua kerangka acuan tersebut bergerak relatif, karena pelebaran waktu relativistik dan penyusutan panjang (Persamaan R-9 dan R-3). (Kami membahas efek Doppler relativistik di Bab 39.) Hasilnya adalah frekuensi yang diterima hanya bergantung pada kecepatan relatif pendekatan (atau resesi)kamu, dan terkait dengan frekuensi yang dipancarkan oleh

$$F_R = \frac{C \quad kamu}{AC \quad kamu_s} F \qquad 15\text{-}43$$

Pilih tanda-tanda yang memberikan peningkatan frekuensi ketika sumber dan penerima mendekat, dan sebaliknya. Sekali lagi, kapankamu V C, ¢f>f - u>c, seperti yang diberikan oleh Persamaan 15-42.

GELOMBANG KEJUTAN

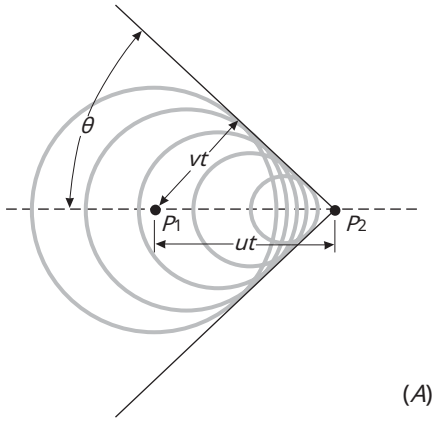
Selama derivasi kami dari ekspresi pergeseran Doppler, kami mengasumsikan bahwa kecepatankamu sumbernya kurang dari kecepatan gelombang v. Jika suatu sumber bergerak dengan kecepatan lebih besar dari kecepatan gelombang, maka tidak akan ada gelombang di depan sumber tersebut. Sebaliknya, gelombang menumpuk di belakang sumbernya untuk membentuk gelombang kejut. Dalam kasus gelombang suara, gelombang kejut ini terdengar sebagai ledakan sonik ketika tiba di penerima.

Gambar 15-28 menunjukkan sumber awalnya di titik P bergerak ke kanan dengan kecepatan kamu Setelah beberapa waktu T, gelombang yang dipancarkan dari titik P telah menempuh jarak vt. Sumbernya telah menempuh jarak ut dan akan tepat sasaran P . Garis dari 1 1 2

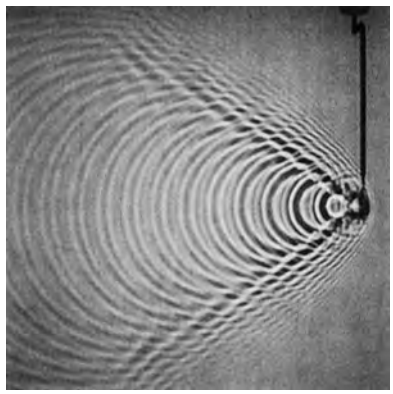
(*A*)

(*B*)

(*A*) Gelombang kejut dari pesawat supersonik. *(Laboratorium Nasional Sandia.)* (*B*) Gelombang kejut yang dihasilkan oleh peluru yang melintasi balon helium. *(Perkebunan Harold E. Edgerton/ Palm Press Inc.)*



(*A*)



(*B*)

ANGKA 1 5 - 2 8 (*A*) Sumber bergerak dengan kecepatan kamu yang lebih besar dari kecepatan gelombang v. Amplop muka gelombang membentuk kerucut dengan sumber di puncak. (*B*) Gelombang dalam tangki riak yang dihasilkan oleh sumber yang bergerak dengan sebuah kecepatan kamu v *(Pusat Pengembangan Pendidikan.)*

posisi baru dari sumber ke muka gelombang yang dipancarkan ketika sumber berada di P_1 membuat sudut kamu, disebut **sudut Mach,** dengan jalur sumber, diberikan oleh

$$\text{dosakamu} - \frac{vt}{ut} - \frac{v}{\text{kamu}} \qquad 15\text{-}44$$

Dengan demikian, gelombang kejut terbatas pada kerucut yang menyempit sebagai kamu meningkat. Rasio kecepatan sumberkamu dengan kecepatan gelombang v disebut **Nomor Mach:**

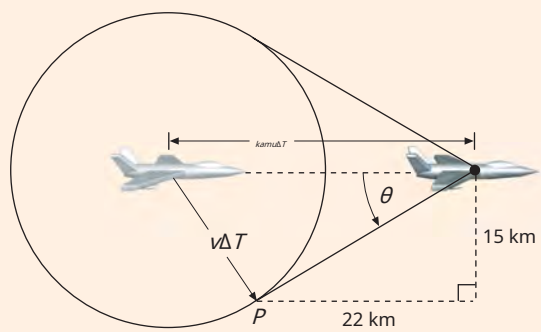
$$\text{Nomor Mach} - \frac{\text{kamu}}{v} \qquad 15\text{-}45$$

Persamaan 15-44 juga berlaku untuk radiasi elektromagnetik yang disebut *radiasi Cerenkov,* yang dilepaskan ketika partikel bermuatan bergerak dalam medium dengan kecepatankamu yang lebih besar dari kecepatan cahaya v dalam media itu. (Menurut teori relativitas khusus, tidak mungkin sebuah partikel bergerak lebih cepat dariC, kecepatan cahaya dalam ruang hampa. Namun, dalam media seperti kaca, elektron dan partikel lain dapat bergerak lebih cepat daripada kecepatan cahaya dalam media itu.) Cahaya biru yang mengelilingi elemen bahan bakar reaktor nuklir adalah contoh radiasi Cerenkov.

Contoh 15-1 Ledakan Sonik — *Cobalah sendiri*

Sebuah pesawat supersonik yang terbang ke timur pada ketinggian 15 km melintas tepat di atas titik P. Ledakan sonik terdengar di titik P ketika pesawat berada 22 km di sebelah timur titik P. Berapakah kecepatan pesawat supersonik tersebut?

GAMBAR Kecepatan pesawat berhubungan dengan sinus sudut Mach (Persamaan 15-2). Buatlah gambar sehingga sinus sudut Mach dapat dihitung.



GAMBAR 1 5 - 2 9 Pada saat pesawat bergerak jarak kamu ¢*T*, suara bergerak jarak v ¢*T*.

MENYELESAIKAN

Tutup kolom di sebelah kanan dan coba ini sendiri sebelum melihat jawabannya.

Langkah **Jawaban**

1. Sketsa posisi pesawat (Gambar 15-29) pada saat sonic boom terdengar di titik P dan pada saat itu suara itu dihasilkan. Beri label jarak yang ditempuh suarav ¢*T*, dan jarak yang ditempuh pesawat kamu ¢*T*.

2. Dari sketsa dan Persamaan 15-44 Anda, hitunglah kamu:

$$\text{tankamu} - \frac{15\text{ km}}{22\text{ km}} \quad \text{jadi} \quad \text{kamu} - 34.3°$$

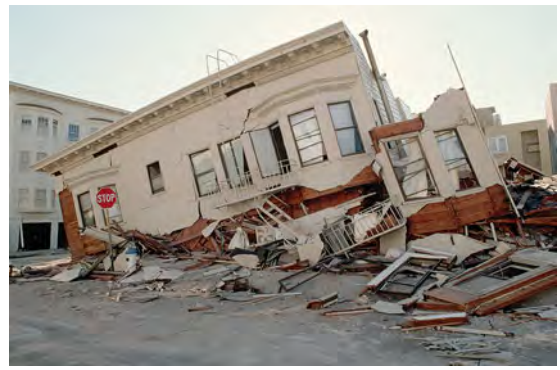
$$\text{dosakamu} - \frac{v\,¢T}{\text{kamu}\,¢T} - \frac{v}{\text{kamu}} \quad \text{jadi} \quad \text{kamu} - \frac{v}{\text{dosakamu}} - 609\text{ m>s} - 610\text{ m>s}$$

MEMERIKSA Kecepatan suara adalah 343 m>s, jadi 610 m>s masuk akal untuk kecepatan supersonik.

Sorotan Fisika

Semua Terguncang: Cekungan Sedimen dan Resonansi Gempa

Pada tanggal 18 April 1906, kota San Francisco hancur oleh gempa bumi yang kuat. Semua bangunan di daerah terendah runtuh. Bangunan-bangunan ini dibangun di atas genangan air *sedimen tidak terkonsolidasi* —kerikil lepas, pasir, kotoran, dan tanah liat. Beberapa bangunan bahkan menenggelamkan satu lantai atau lebih ke dalam tanah saat goncangan tersebut mencairkan sedimen yang lepas. Bangunan di Nob Hill berbatu dan Russian Hill bernasib lebih baik.



Kerusakan bangunan yang dibangun di atas kerikil lepas yang tergenang air, pasir, tanah dan tanah liat lebih besar daripada kerusakan pada bangunan yang dibangun di atas batu keras. *(Roger Resmeyer/CORBIS.)*

Kota-kota yang terletak di sedimen yang tidak terkonsolidasi dan dekat patahan besar lebih rentan terhadap kerusakan gempa daripada yang tidak. Jika sebagian dikelilingi oleh perbukitan atau pegunungan berbatu, bahayanya meningkat. Kota-kota yang rentan termasuk Seattle,*, Istambul,kan Roma,# Los Angeles,° San Fransisco,kan dan Taipei.kan

Sedimen yang tidak terkonsolidasi memiliki risiko yang jauh lebih besar untuk goncangan seismik daripada batuan. Ketika gempa bumi terjadi, sebagian energi gempa dikirim dalam gelombang seismik. Gelombang ini menyebabkan tanah bergetar pada rentang frekuensi yang luas. Pada batuan padat, gelombang bergetar dan memiliki amplitudo yang relatif kecil. Semakin longgar batuan atau sedimen, semakin menurun kecepatan rambat dan amplitudonya meningkat.** Pada kerikil lepas, gelombang bergetar lebih lambat dan memiliki amplitudo yang lebih besar. Dalam sedimen yang tergenang air, gelombang bergetar lebih lambat dan memiliki amplitudo yang jauh lebih besar. Jika Anda mengetuk semangkuk agar-agar dengan tajam di sampingnya, Anda dapat mendengar suara ketukan mangkuk. Jika itu adalah mangkuk logam atau kaca, suara akan memiliki frekuensi ratusan hertz. Tetapi gelatin melemahkan dan menyebarkan frekuensi yang lebih tinggi, dan beresonansi pada frekuensi yang lebih rendah. Prinsip yang sama mendasari kerentanan banyak kota terhadap gempa bumi.kan

Sayangnya, frekuensi resonansi sebagian besar bangunan lebih dekat dengan frekuensi resonansi gelombang seismik pada sedimen lepas.kan Jadi, sedimen tidak hanya bergetar dengan amplitudo yang lebih besar, tetapi juga bergetar paling kuat pada frekuensi yang lebih dekat dengan frekuensi resonansi bangunan. Masalah ini jelas diakui dalam laporan Negara tentang gempa bumi San Francisco tahun 1906.## Bangunan yang terletak di daerah sedimen yang tidak terkonsolidasi jauh lebih rusak daripada bangunan yang terletak di tanah yang lebih tinggi dan lebih kokoh.

Situasi terburuk untuk kota-kota yang dibangun di atas sedimen yang sebagian dikelilingi oleh daerah batuan keras. Di sana gelombang beresonansi di dalam cekungan sedimen dengan amplitudo besar. Ini benar pada tahun 1906, ketika kota Santa Rosa mengalami kerusakan parah, meskipun letaknya lebih jauh dari pusat gempa daripada kota-kota lain yang tidak terlalu rusak. Santa Rosa terletak di dalam cekungan sedimennya sendiri, dikelilingi oleh batuan.°° Resonansi cekungan menyebabkan sedimen bergetar dengan amplitudo yang lebih besar. Amplitudo yang lebih besar ini menciptakan kerusakan yang lebih besar. Biasanya kerusakan berasal dari percepatan horizontal yang disebabkan oleh gelombang seismik. Sampai kode gempa yang ketat tahun 1970-an, bangunan tidak dibangun untuk menahan gaya horizontal. Di sebagian besar kota, lebih dari separuh bangunan berasal dari sebelum kode ketat diadopsi.

Ahli geofisika menggunakan model cekungan ini dan sedimennya untuk memprediksi area yang kemungkinan akan mengalami kerusakan tinggi akibat gempa bumi.kan Prediksi ini digunakan untuk meningkatkan kode atau mengharuskan jembatan,kan pemecah gelombang,*** dan bangunankan dirancang dan dibangun sesuai dengan praktik terbaik saat ini untuk pengurangan bahaya. Lain kali Anda mengocok semangkuk gelatin, pikirkan tentang cekungan sedimen dan kerusakan seismik.

---

* Chang, S., dkk., "Kegagalan Tanah yang Diharapkan," Makalah dipresentasikan pada Konferensi Skenario Gempa Sesar Seattle, 2005. Seattle: Institut Penelitian Teknik Gempa. http://seattlescenario.eeri.org/presentations/Ch%202%20Ground%20Failure%20-%20Chang.pdf

kan Pierepiekarz, M. et al., "Bangunan," Makalah dipresentasikan pada Konferensi Skenario Gempa Sesar Seattle, 2005. Seattle: Institut Penelitian Teknik Gempa. http://seattlescenario.eeri.org/presentations/Ch%205%20Buildings%20-%20Pierepiekarz.pdf

kan Erdik, M. *Kerentanan Gempa Bangunan dan Strategi Mitigasi: Kasus Istanbul*. Bank Dunia. http://info.worldbank.org/etools/docs/library/114715/istanbul03/docs/istanbul03/06erdik3-n%5B1%5D.pdf per Juni 2006.

\# Perkins, S. "Roma Beresiko: Getaran Seismik Bisa Panjang dan Merusak," *Berita Sains*, 25 Februari 2006, 115. °
Perkins, S., "Potret Kehancuran," *Berita Sains*, 21 Mei 2005, 325.

kan Zoback, ML, "The 1906 Earthquake—Lessons Learned, Lessons Forgotten, and Future Directions," Makalah dipresentasikan pada American Geophysical Union Meeting, San Francisco, 5-9 Desember 2005. http://www.ucmp.berkeley. edu/museum/events/shortcourse2006/zoback/

kan Altenburger, E., "Bahaya Gempa di Taiwan—Gempa Chichi September 1999," *FOKUS pada Geografi*, Musim Dingin 2004, 1–8.

* *O'Connell, DRH, "Replikasi Respon Seismik Nonlinier Semu dengan Model Propagasi Gelombang Linier," *Sains*, 26 Maret 1999, Jil. 283, No. 5410, hal. 2045-2050. Page, RA,

kan Blume, JA, dan Joyner, WB, "Gempa Bumi dan Kerusakan Bangunan."*Sains*, 22 Agustus 1975, Jil. 189., No.4203, hal. 601-608.

kan Seed, HB, dkk., "Kondisi Tanah dan Kerusakan Bangunan pada Gempa Caracas 1967," *Jurnal Divisi Mekanika Tanah dari American Society of Civil Engineers*, 1972, Jil. 98, No. 8, 787–806.

Lawson, A., dkk.,*Laporan Komisi Investigasi Gempa Negara*. 1908. Washington, DC: Institusi Carnegie.

°° Sloan, D., "Potret Lanskap Tektonik," *Teluk Alam*, Musim Semi 2006, Jil. 6, No. 2, 24-27.

kan Survei Geologi Amerika Serikat, "Simulasi Gerak Tanah 1906," Program Bahaya Gempa. http://earthquake.usgs.gov/regional/nca/1906/simulations/, per Juni 2006. Treyger, S., Jones, M.,

kan dan Orsolini, G., "Suspending the Big One,"*Jalan dan Jembatan*, Mei 2004, 22–25.

* * * Banijamali, B., "Gunung Reruntuhan Rasakan Gemuruhnya," *Pengerukan dan Konstruksi Pelabuhan*, Juni 2005, 35–41.

kan Gonchar, J., "Satu Proyek, tetapi Banyak Solusi Seismik," *Catatan Arsitektur*, Mei 2006, 167-174.

Ringkasan

1. Dalam gerak gelombang, energi dan momentum diangkut dari satu titik di ruang angkasa ke titik lain tanpa transportasi materi.

2. Hubungan v - faku berlaku untuk semua gelombang harmonik.

TEMA	PERSAMAAN DAN KETERANGAN RELEVAN	
1. Gelombang Transversal dan Longitudinal	Dalam gelombang transversal, seperti gelombang pada tali, gangguannya tegak lurus terhadap arah rambat. Dalam gelombang longitudinal, seperti gelombang suara, gangguan berada di sepanjang arah rambat.	
2. Kecepatan Gelombang	Kecepatan gelombang v tidak tergantung pada gerakan sumber gelombang. Cepat rambat gelombang relatif terhadap medium bergantung pada kerapatan dan sifat elastis medium.	
Gelombang pada senar	$v - 2F > \overline{M_{\ell}}$	15-3
Gelombang suara	$v - 2B > \overline{R}$	15-4
Gelombang bunyi dalam gas	$v - 2GRT > M$	15-5
	di mana T adalah suhu mutlak, $T - t_{C} \quad 273{,}15$	15-6
	R adalah konstanta gas universal, $R - 8.314\ J>(mol \# K)$	15-7
	M adalah massa molar gas, yang untuk udara adalah 29,0 10^{-3} kg>mol, dan G adalah konstanta tergantung jenis gasnya. Untuk gas diatomik seperti udara,G - 7>5. Untuk gas monoatomik seperti helium,G - 5>3.	
Gelombang elektromagnetik	Kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa adalah konstanta universal $C - 3{,}00 \quad 10^{8}\ m>s$	
*** 3. Persamaan Gelombang**	$\frac{\text{:kamu}}{x_2} - \frac{1}{v_2}\frac{\text{:kamu}}{T_2}$	15-10*B*
4. Gelombang Harmonik		
Fungsi gelombang	$y(x,t) - A\ dosa(kx \quad vT)$	15-15
	di mana A adalah amplitudo, k adalah bilangan gelombang, dan v adalah frekuensi sudut. Gunakan tanda minus untuk gelombang yang merambat dix arah, dan tanda plus untuk gelombang yang merambat di -x arah.	
Nomor gelombang	$k - \frac{2P}{aku}$	15-14
Frekuensi sudut	$v - 2PF - \frac{2P}{T}$	15-17
Kecepatan	$v - fl - v>k$	15-12, 15-16
Energi	Energi dalam gelombang harmonik sebanding dengan kuadrat amplitudo.	
Daya untuk gelombang harmonik pada tali	$P_{av} - \frac{1}{2}Mvv_2A_2$	15-22
5. Gelombang Suara Harmonik	Gelombang suara dapat dianggap sebagai gelombang perpindahan atau gelombang tekanan. Telinga manusia peka terhadap gelombang suara frekuensi dari sekitar 20 Hz sampai 20 kHz. Dalam gelombang suara harmonik, tekanan dan perpindahan berbeda fase 90 °.	
Amplitudo	Amplitudo tekanan dan perpindahan dihubungkan oleh $P_0 - rvvs_0$	15-26
	di mana R adalah densitas medium.	
Kepadatan energi	$H_{av} \quad \frac{(¢E)_{av}}{¢V} - \frac{1}{2}rv_2S_{2_0}$	15-28

TEMA	PERSAMAAN DAN KETERANGAN RELEVAN	
6. Intensitas	Intensitas gelombang adalah daya rata-rata per satuan luas. $$SAYA_{av} = \frac{P}{A}$$	15-29
Intensitas rata-rata Saya dari gelombang suara	$$SAYA_{av} = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 s_0^2 = \frac{1}{2}\frac{p_0^2}{\rho v}$$	15-32
* Tingkat intensitas B dalam dB	Tingkat intensitas suara diukur pada skala logaritmik. $$\beta = (10\ \text{dB}) \log \frac{\text{Saya}}{\text{Saya}_0}$$ di mana $SAYA_0 = 10^{-12}\ W/m^2$ dianggap sebagai ambang pendengaran.	15-33
7. Pemantulan dan Pembiasan	Ketika gelombang datang pada permukaan batas yang memisahkan dua daerah dengan kecepatan gelombang yang berbeda, sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian ditransmisikan.	
	Koefisien refleksi dan transmisi adalah $$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad \text{dan} \quad T = \frac{2v_2}{v_2 + v_1}$$	15-35
8. Difraksi	Jika muka gelombang terhalang sebagian oleh suatu penghalang, bagian muka gelombang yang tidak terhalang akan difraksi (membengkok) ke daerah di belakang rintangan.	
Perkiraan sinar	Jika muka gelombang sebagian terhalang oleh suatu penghalang, hampir semua difraksi terjadi untuk bagian muka gelombang yang lewat dalam beberapa panjang gelombang dari tepi. Untuk bagian muka gelombang yang melewati lebih jauh dari tepi daripada beberapa panjang gelombang, difraksi dapat diabaikan dan gelombang merambat dalam garis lurus ke arah sinar datang.	
9. Efek Doppler	Ketika sumber suara dan penerima berada dalam gerakan relatif, frekuensi yang diterima F_R lebih tinggi dari frekuensi sumber F jika pemisahannya menurun, dan lebih rendah jika pemisahannya meningkat.	
Sumber bergerak	$$f' = \frac{v}{v \mp v_s} f$$	15-38[4]
Penerima bergerak	$$f' = \frac{v \pm v_R}{v} f$$	15-40[3]
Entah sumber atau penerima bergerak	$$f' = \frac{v \pm v_R}{v \mp v_s} f \quad \text{atau} \quad \frac{f'}{f} = \frac{v \pm v_R}{v \mp v_s}$$ Pilih tanda-tanda yang memberikan peningkatan frekuensi untuk sumber atau penerima yang mendekat, dan sebaliknya.	15-41[3]
Kecepatan kecil dari sumber atau penerima	$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{v}(u \text{ atau } v)$$	15-42[3]
Pergeseran Doppler relativistik	$$f' = \sqrt{\frac{c \mp v}{c \pm v}}\, f$$ Pilih tanda-tanda yang memberikan peningkatan frekuensi untuk sumber atau penerima yang mendekat, dan sebaliknya.	15-43
10. Gelombang Kejut	Ketika kecepatan sumber lebih besar dari kecepatan gelombang, gelombang di belakang sumber terbatas pada kerucut sudut θ diberikan oleh	
Sudut Mach	$$\sin\theta = \frac{v}{v}$$	15-44
Nomor Mach	$$\text{Nomor Mach} = \frac{v}{v}$$	15-45

Jawaban untuk Cek Konsep

15-1 Chuck akan kecewa. Dua kali kekuatan akustik akan menghasilkan dua kali lipat *intensitas* jarak tertentu dari radio, bukan dua kali *tingkat intensitas*.

Jawaban untuk Latihan Soal

15-1 $\sqrt{\frac{n}{Bkg>m}}$ - $C\sqrt{\frac{kg\#m>s^2}{kg>m}}$ - $C\sqrt{\frac{kg\#M_2>s^2}{kg}}$ - $3\sqrt{M_2>s_2}$ - m>s

15-2 1,01 km>s

15-3 $\frac{:kamu}{x_2}$ - $k_2\frac{D:kamu}{D_2B}$ dan $\frac{:kamu}{T_2}$ - $v_2\frac{D:kamu}{D_2B}$, di mana B - kx vT. Dengan demikian

k_2 - $\frac{v_2}{v_2} \Rightarrow$ v - kv

15-4 26 W

15-5 aku - 17 m pada 20 Hz, 17 mm pada 20.000 Hz

15-6 (*A*) A_R - $\frac{1}{3}$A dan A - $\frac{4}{3}$A, (*B*) P >$P_{R\ di\ dalam}$ - 1>3 dan P_R>$P_{di\ dalam}$ - 8>9

15-7 1 - a- b $\frac{1}{3}^2$ $2a\frac{2}{3}^2$ - $\frac{1}{9}$ $2\frac{4}{9}$ - 1

15-8 (*A*) aku - 0,5 m, (*B*) $\frac{F}{R}$ - 680Hz¢

15-9 F - 500Hz

Masalah

Menafsirkan sebagai signifikan semua digit dalam nilai numerik yang memiliki nol di belakang dan tidak ada titik desimal.

Gunakan 343 m/s sebagai kecepatan suara untuk udara, kecuali dinyatakan lain.

Dalam masalah tingkat intensitas yang melibatkan ambang pendengaran, intensitas referensi tepat 1 10^{-12} W/m^2 dengan perjanjian. Ini diasumsikan akurat untuk jumlah angka penting yang tak terbatas. Oleh karena itu, jumlah angka penting dalam jawaban hanya ditentukan oleh data tersebut.

- • Konsep tunggal, satu langkah, relatif mudah
- • • Tingkat menengah, mungkin memerlukan sintesis konsep
- • • • Menantang
- SSM Solusi ada di *Panduan Solusi Siswa*

Masalah berurutan yang diarsir adalah masalah berpasangan.

MASALAH KONSEP

1 • Sebuah tali menggantung secara vertikal dari langit-langit. Sebuah pulsa dikirim naik tali. Apakah pulsa bergerak lebih cepat, lebih lambat, atau dengan kecepatan konstan saat bergerak menuju langit-langit? Jelaskan jawabanmu. SSM

2 • Sebuah pulsa pada tali tegang horizontal bergerak ke kanan. Jika massa tali per satuan panjang berkurang ke kanan, apa yang terjadi pada kecepatan pulsa saat merambat ke kanan? (*A*) Ini melambat. (*B*) Ini mempercepat. (*C*) Kecepatannya tetap. (*D*) Anda tidak dapat mengetahuinya dari informasi yang diberikan.

3 • Sebagai gelombang sinusoidal perjalanan melewati titik pada tali tegang waktu kedatangan antara puncak yang berurutan diukur menjadi 0,20 detik. Manakah dari berikut ini yang benar? (*A*) Panjang gelombangnya 5,0 m. (*B*) Frekuensi gelombang adalah 5,0 Hz. (*C*) Kecepatan rambat gelombang adalah 5,0 m>s. (*D*) Panjang gelombangnya adalah 0,20 m. (*e*) Tidak ada informasi yang cukup untuk membenarkan pernyataan-pernyataan ini.

4 • Dua gelombang harmonik pada dawai identik hanya berbeda dalam amplitudo. Gelombang A memiliki amplitudo dua kali amplitudo gelombang B. Bagaimana energi gelombang ini dibandingkan? (*A*) E_A E_B, (*B*) E_A - 2E , (*C*) E_B - 4E , (*D*) Tidak ada informasi yang cukup untuk membandingkan energi mereka.

5 • • **ENGINEERING APLIKASI** Untuk menjaga semua panjang string treble (kabel baja yang tidak terbungkus) dalam piano dengan urutan besarnya yang sama, digunakan kabel dengan kerapatan massa linier yang berbeda. Jelaskan bagaimana hal ini memungkinkan produsen piano untuk menggunakan kabel dengan panjang yang sama besarnya. SSM

6 • Alat musik menghasilkan suara yang sangat bervariasi frekuensi. Manakah gelombang bunyi yang memiliki panjang gelombang lebih panjang? (*A*) Frekuensi yang lebih rendah. (*B*) Frekuensi yang lebih tinggi. (*C*) Semua frekuensi memiliki panjang gelombang yang sama. (*D*) Tidak ada informasi yang cukup untuk membandingkan panjang gelombang suara frekuensi yang berbeda.

7 • Dalam Soal 6, gelombang suara mana yang lebih besar? kecepatan? (*A*) Frekuensi yang lebih rendah berbunyi. (*B*) Semakin tinggi frekuensi terdengar. (*C*) Semua frekuensi memiliki kecepatan gelombang yang sama. (*D*) Tidak ada informasi yang cukup untuk membandingkan kecepatannya.

8 • Bunyi merambat dengan kecepatan 343 m>s di udara dan 1500 m>s di air. A suara 256 Hz dibuat di bawah air, tetapi Anda mendengar suara saat berjalan di sepanjang sisi kolam. Di udara, frekuensinya adalah (*A*) sama, tetapi panjang gelombang bunyi lebih pendek, (*B*) lebih tinggi, tetapi panjang gelombang suara tetap sama, (*C*) lebih rendah, tetapi panjang gelombang suara lebih panjang, (*D*) lebih rendah, dan panjang gelombang suara lebih pendek, (*e*) sama, dan panjang gelombang bunyi tetap sama.

9 • Saat berpatroli, kapal perang *Rodger Young* memukul a milikku, mulai terbakar, dan akhirnya meledak. Sailor Abel melompat ke air dan mulai berenang menjauh dari kapal yang terkutuk itu, sementara Sailor Baker masuk ke rakit penyelamat. Membandingkan pengalaman mereka kemudian, Abel memberi tahu Baker, "Saya sedang berenang di bawah air, dan mendengar ledakan besar dari kapal. Ketika saya muncul ke permukaan, saya mendengar ledakan kedua. Menurutmu bisa menjadi apa?" Baker berkata, "Saya pikir itu hanya imajinasi Anda—saya hanya mendengar satu ledakan." Jelaskan mengapa Baker hanya mendengar satu ledakan, sementara Abel mendengar dua.

10 • Benar atau salah: Suara 60 dB memiliki intensitas dua kali a suara 30 dB.

11 • Di lokasi tertentu, dua gelombang suara harmonik memiliki amplitudo yang sama, tetapi frekuensi bunyi A adalah dua kali frekuensi bunyi B. Bagaimana rapat energi rata-ratanya dibandingkan? (*A*) Massa jenis energi rata-rata A adalah dua kali rapat energi rata-rata B. (*B*) Kerapatan energi rata-rata A adalah empat kali rapatan energi rata-rata B. (*C*) Kerapatan energi rata-rata A adalah 16 kali rapatan energi rata-rata B. (*D*) Anda tidak dapat membandingkan rapat energi rata-rata dari data yang diberikan. SSM

12 • Di lokasi tertentu, dua gelombang suara harmonik memiliki frekuensi yang sama, tetapi amplitudo bunyi A adalah dua kali amplitudo bunyi B. Bagaimana perbandingan rapat energi rata-rata? (*A*) Massa jenis energi rata-rata A adalah dua kali rapat energi rata-rata B. (*B*) Kerapatan energi rata-rata A adalah empat kali rapatan energi rata-rata B. (*C*) Kerapatan energi rata-rata A adalah 16 kali rapatan energi rata-rata B. (*D*) Anda tidak dapat membandingkan rapat energi rata-rata dari data yang diberikan.

13 • Berapa perbandingan intensitas percakapan normal? dengan intensitas suara bisikan lembut (pada jarak 5,0 m)? (*A*) 10_3, (*B*) 2, (*C*) 10^{-3}, (*D*) 1>2 *Petunjuk: Lihat Tabel 15-1.*

14 • Berapakah perbandingan tingkat intensitas percakapan normal? sasi ke tingkat intensitas suara bisikan lembut (pada jarak 5,0 m)? (*A*) 10_3, (*B*) 2, (*C*) 10^{-3}, (*D*) 1>2 *Petunjuk: Lihat Tabel 15-1.*

15 • Untuk meningkatkan tingkat intensitas suara sebesar 20 dB diperlukan intensitas bunyi bertambah dengan faktor apa? (*A*) 10, (*B*) 100, (*C*) 1000, (*D*) 2

16 • Anda menggunakan pengukur level suara genggam untuk mengukur tingkat intensitas auman yang dihasilkan oleh singa yang berkeliaran di rerumputan tinggi. Untuk mengurangi tingkat intensitas suara yang diukur sebesar 20 dB, singa harus menjauh dari Anda sampai jaraknya dari Anda bertambah dengan faktor apa? (*A*) 10, (*B*) 100, (*C*) 1000, (*D*) Anda tidak dapat mengetahui jarak yang diperlukan dari data yang diberikan.

17 • Salah satu ujung benang yang sangat ringan (tapi kuat) terpasang ke ujung kabel yang lebih tebal dan lebih padat. Ujung benang yang lain diikat ke tiang yang kokoh dan Anda menarik ujung kabel yang lain sehingga benang dan kabelnya kencang. Sebuah pulsa dikirim ke kabel yang lebih tebal dan lebih padat. Benar atau salah:

(*A*) Pulsa yang dipantulkan kembali dari titik pemasangan kabel ulir dibalik dibandingkan dengan pulsa masuk awal.
(*B*) Pulsa yang terus melewati titik pemasangan kabel ulir tidak dibalik dibandingkan dengan pulsa masuk awal.
(*C*) Pulsa yang terus melewati titik pemasangan kabel ulir memiliki amplitudo yang lebih kecil dari pulsa yang dipantulkan.

18 • Cahaya yang merambat di udara menumbuk permukaan kaca dengan kemiringan 45° sudut penyok. Benar atau salah:

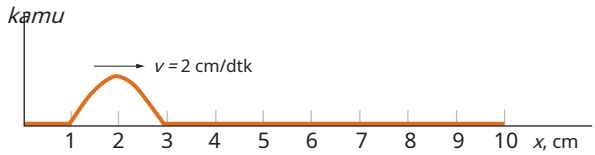
(*A*) Sudut antara sinar pantul dan sinar datang adalah 90°. (*B*) Sudut antara sinar cahaya yang dipantulkan dan sinar cahaya yang dibiaskan kurang dari 90°.

19 • Gelombang suara di udara bertemu dengan lubang terbuka selebar 1,0 m pintu ke sebuah ruang kelas. Karena efek difraksi, bunyi dengan frekuensi manakah yang paling kecil kemungkinannya untuk didengar oleh semua siswa di ruangan itu – dengan asumsi ruangan penuh? (*A*) 600Hz, (*B*) 300Hz, (*C*) 100Hz, (*D*) Semua suara memiliki kemungkinan yang sama untuk terdengar di dalam ruangan. (*e*) Difraksi bergantung pada panjang gelombang, bukan frekuensi, jadi Anda tidak dapat membedakannya dari data yang diberikan. SSM

20 • Radiasi gelombang mikro dalam oven microwave modern memiliki panjang gelombang pada orde sentimeter. Apakah Anda mengharapkan difraksi yang signifikan jika radiasi ini ditujukan pada pintu selebar 1,0 m? Menjelaskan.

21 • • Bintang sering muncul berpasangan yang berputar di sekitar mon pusat massa. Jika salah satu bintang adalah lubang hitam, itu tidak terlihat. Jelaskan bagaimana keberadaan lubang hitam semacam itu dapat disimpulkan dengan mengukur pergeseran frekuensi Doppler dari cahaya yang diamati dari bintang lain yang terlihat. SSM

22 • • Gambar 15-30 menunjukkan pulsa gelombang pada waktu T - 0 pindah ke hak. (*A*) Pada saat ini, segmen tali mana yang bergerak ke atas? (*B*) Segmen mana yang bergerak ke bawah? (*C*) Apakah ada segmen tali pada pulsa yang seketika diam? Jawablah pertanyaan-pertanyaan ini dengan membuat sketsa denyut nadi di waktu yang lebih lambat dan waktu yang sedikit lebih awal untuk melihat bagaimana segmen-segmen string bergerak.

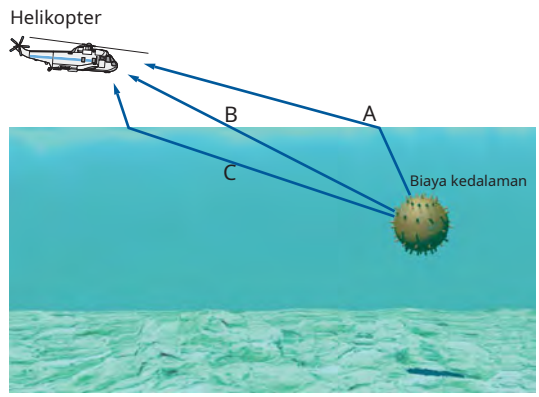


ANGKA 1 5 - 3 0 **Soal 22, 23**

23 • • Buatlah sketsa kecepatan masing-masing ruas tali posisi sus untuk pulsa ditunjukkan pada Gambar 15-30.

24 • • Benda bermassa M tergantung pada tali yang sangat ringan yaitu terhubung ke langit-langit. Anda memetik tali tepat di atas objek, dan pulsa gelombang bergerak ke langit-langit dan kembali. Bandingkan waktu perjalanan pulang pergi untuk pulsa gelombang tersebut dengan waktu perjalanan pulang pergi dari pulsa gelombang pada tali yang sama jika sebuah benda bermassa 9M digantung di tali sebagai gantinya. (Asumsikan bahwa tali tidak meregang, yaitu jarak massa ke langit-langit adalah sama dalam setiap kasus.)

25 • • Ledakan muatan kedalaman di bawah permukaan a badan air direkam oleh helikopter yang melayang di atas permukaan air, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15-31. Di sepanjang jalur mana—A, B, atau C—gelombang suara membutuhkan waktu paling sedikit untuk mencapai helikopter? Jelaskan mengapa Anda memilih jalan yang Anda lakukan.



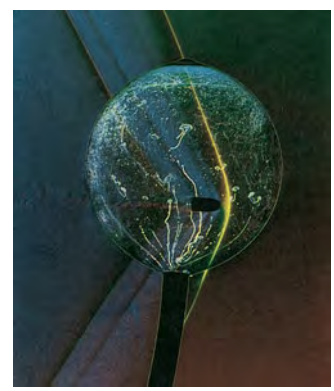
ANGKA 1 5 - 3 1 **Soal 25**

26 • • Apakah kecepatan Mach 2 pada ketinggian 60.000 kaki berarti? sama dengan kecepatan Mach 2 di dekat permukaan tanah? Jelaskan dengan jelas.

ESTIMASI DAN PERKIRAAN

27 • • Bertahun-tahun yang lalu, lari 100 m Olimpiade dimulai oleh suara dari pistol starter, dengan starter diposisikan beberapa meter di bawah lintasan, tepat di bagian dalam lintasan. (Saat ini, pistol yang digunakan seringkali hanya pemicu, yang digunakan untuk mengaktifkan speaker secara elektronik di belakang masing-masing blok awal sprinter. Metode ini menghindari masalah satu pelari mendengar suara sebelum pelari lain.) Perkirakan keuntungan waktu pelari di jalur dalam (relatif terhadap pelari di jalur luar dari 8 pelari) jika semua pelari mulai ketika mereka mendengar suara suara dari pistol starter.

28 • • Perkirakan kecepatannya peluru saat melewati balon helium pada Gambar 15-32. *Petunjuk: Busur derajat akan bermanfaat.*



GAMBAR 1 5 - 3 2 **Soal 28**
(Estate of Harold E. Edgerton Palm Press Inc.)

29 • • Townhouse siswa baru di perguruan tinggi lokal berada di berbentuk setengah lingkaran yang menutupi bidang lintasan. Untuk memperkirakan kecepatan suara di udara, seorang siswa fisika yang ambisius berdiri di tengah setengah lingkaran dan bertepuk tangan secara berirama pada frekuensi di mana dia tidak dapat mendengar gema tepukan, karena gema mencapainya pada saat yang sama tepukan berikutnya. Frekuensi ini sekitar 2,5 tepukan>s. Begitu dia menetapkan frekuensi ini, dia berjalan menjauh dari jarak ke townhouse, yang berjarak 30 langkah ganda. Dengan asumsi bahwa panjang setiap langkah sama dengan setengah tingginya (5 kaki 11 inci), perkirakan kecepatan suara di udara menggunakan data ini. Seberapa jauh estimasi Anda dari nilai yang diterima secara umum 343 m>s?

KECEPATAN GELOMBANG

30 • (*A*) Modulus curah air adalah 2,00 10^9 T>m^2. Menggunakan nilai ini untuk menemukan kecepatan suara dalam air. (*B*) Cepat rambat bunyi dalam air raksa adalah 1410 m>s. Berapa modulus curah raksa (R - 13.6 10^3 kg>m^3)?

31 • Hitung kecepatan gelombang suara dalam gas hidrogen (M - 2,00 g>mol dan G - 1.40) di T - 300 K

32 • Senar gitar dengan panjang 7,00 m memiliki massa 100 g dan di bawah tegangan 900 N. Berapa kecepatan pulsa gelombang transversal pada string ini?

33 • • (*A*) Hitung turunan dari kecepatan gelombang pada seutas tali terhadap tegangan *Dv*>*dF* dan tunjukkan bahwa perbedaan referensial *Dv* dan *dF* mematuhi *Dv*>v - $\frac{1}{2}$ *dF*>F_T. (*B*) Gelombang bergerak dengan kecepatan 300 m>s pada tali yang diberi tegangan 500 N. Dengan menggunakan pendekatan diferensial, perkirakan berapa besar tegangan yang harus diubah untuk meningkatkan kecepatan menjadi 312 m>s. (*C*) Hitung ¢F_T tepat dan membandingkannya dengan hasil aproksimasi diferensial di Bagian (*B*). Asumsikan bahwa tali tidak meregang dengan bertambahnya tegangan. SSM

34 • • (*A*) Hitung turunan dari kecepatan suara di udara terhadap suhu mutlak, dan tunjukkan bahwa perbedaan *Dv* dan *dT* mematuhi *Dv*>v - $\frac{1}{2}$ *dT*>T. (*B*) Gunakan hasil ini untuk perkirakan persentase perubahan kecepatan suara ketika suhu berubah dari 0°C menjadi 27°C. (*C*) Jika kecepatan suara adalah 331 m>s pada 0°C, perkirakan nilainya pada 27°C menggunakan pendekatan diferensial. (*D*) Bagaimana perkiraan ini dibandingkan dengan hasil perhitungan yang tepat?

35 • • • Turunkan formula yang nyaman untuk kecepatan suara di udara pada suhu *T* dalam derajat Celcius. Mulailah dengan menulis suhu sebagaiT - T_0 ¢*T*, di mana T_0 - 273 K dan sesuai dengan 0 °C dan ¢*T* - T, yang merupakan suhu Celcius. Cepat rambat bunyi merupakan fungsi dariT, v(T). Untuk pendekatan orde pertama, Anda dapat menulis v(T) - v(T_0) (*Dv*>*dT*) $_{T_0}$ ¢*T*, di mana (*Dv*>*dT*) adalah nilai turunan-tertukar pada T_0-T. Hitung turunan ini, an $_0$d tunjukkan bahwa hasilnya mengarah ke

$$v - (331\ m>s)(1 \quad (t>2T_0)) - (331 \quad 0{,}606T)\ m>s$$

PERSAMAAN GELOMBANG

36 • Tunjukkan secara eksplisit bahwa fungsi-fungsi berikut memenuhi melambai persamaan:$\partial^2 y> x^2$ - (1>v^2) $\partial^2 y> t^2$: (*A*) y(x,t) - k(xvt)^3, (*B*) y(x,t) - Ae$^{ik(x\text{-}vt)}$, di mana A dan k adalah konstanta dan Saya - $\sqrt{1\text{-}1}$, dan (*C*) y(x,t) - di[k(x - vt)].

37 • Tunjukkan bahwa fungsi y - A dosakx karenavT memenuhi persamaan gelombang.

GELOMBANG HARMONIS PADA SEBUAH STRING

38 • Salah satu ujung tali sepanjang 6,0 m digerakkan ke atas dan ke bawah dengan gerak harmonik sederhana pada frekuensi 60 Hz. Jika puncak gelombang menempuh panjang dawai dalam 0,50 s, tentukan panjang gelombang pada dawai tersebut.

39 • Gelombang harmonik pada tali yang memiliki massa per satuan panjang 0,050 kg>m dan tegangan 80 N memiliki amplitudo 5,0 cm. Setiap titik pada tali bergerak dengan gerak harmonik sederhana dengan frekuensi 10 Hz. Berapa daya yang dibawa oleh gelombang yang merambat sepanjang tali? SSM

40 • Sebuah tali sepanjang 2,00 m memiliki massa 0,100 kg. Sepuluh-sion adalah 60,0 N. Sebuah osilator di salah satu ujung mengirimkan gelombang harmonik dengan amplitudo 1,00 cm ke bawah tali. Ujung tali yang lain diakhiri sehingga semua energi gelombang diserap dan tidak ada yang dipantulkan. Berapa frekuensi osilator jika daya yang ditransmisikan adalah 100 W?

41 • • Fungsi gelombang untuk gelombang harmonik pada tali adalah y(x,t) - (1,00 mm) dosa (62,8 m^{-1}x 314 detik^{-1}T). (*A*) Ke arah mana apakah gelombang ini merambat, dan berapakah cepat rambat gelombang tersebut? (*B*) Tentukan panjang gelombang, frekuensi, dan periode gelombang tersebut. (*C*) Berapakah kecepatan maksimum setiap titik pada tali?

42 • • Gelombang harmonik pada tali dengan frekuensi 80 Hz dan amplitudo 0,025 m bergerak dalam x arah dengan kecepatan 12 m>s. (*A*) Tulislah fungsi gelombang yang sesuai untuk gelombang ini. (*B*) Tentukan kecepatan maksimum suatu titik pada tali. (*C*) Tentukan percepatan maksimum suatu titik pada tali.

43 • • Gelombang harmonik 200 Hz dengan amplitudo sama dengan 1,2 cm bergerak sepanjang tali sepanjang 40 m yang memiliki massa 0,120 kg dan tegangan 50 N. (*A*) Berapa energi total rata-rata gelombang pada segmen tali sepanjang 20 m? (*B*) Berapa daya yang ditransmisikan melewati titik tertentu pada tali?

44 • • Pada string nyata, sebagian energi gelombang menghilang saat gelombang merambat ke bawah tali. Situasi seperti itu dapat digambarkan oleh fungsi gelombang yang amplitudonyaKapak) tergantung padax: y - A(x) dosa(kx - vT), di mana A(x) - A e^{-bx}$_0$Berapa daya yang diangkut oleh gelombang sebagai fungsi darix, di mana x 0?

45 • • Daya akan ditransmisikan sepanjang tali yang tegang melalui gelombang harmonik transversal. Cepat rambat gelombang adalah 10 m>s dan rapat massa linier tali adalah 0,010 kg>m. Sumber daya berosilasi dengan amplitudo 0,50 mm. (*A*) Berapa daya rata-rata yang ditransmisikan sepanjang tali jika frekuensinya 400 Hz? (*B*) Daya yang ditransmisikan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan tegangan tali, frekuensi sumber, atau amplitudo gelombang. Berapa banyak masing-masing kuantitas ini harus meningkat untuk menyebabkan peningkatan daya dengan faktor 100 jika itu adalah satu-satunya kuantitas yang berubah? SSM

46 • • • Dua tali yang sangat panjang diikat menjadi satu pada titik x - 0. Di wilayah x 0, cepat rambat gelombang adalah v_1, saat berada di wilayah x 0, itu kecepatan adalah v_2. Gelombang sinusoidal datang pada simpul dari kiri(x 0); sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian diteruskan. Untukx 0, perpindahan gelombang dijelaskan oleh y(x,t) - A dosa(kx - v_1T) B dosa(k_1x vT), sementara untuk x 0, y(x,t) - C dosa(k_2x - vT), di mana v>k_1 - v_1 dan v>k_2 - v_2. (*A*) Jika kita mengasumsikan bahwa kedua fungsi gelombangkamu dan turunan spasial pertamanya menunjukkan bahwa harus terus menerus di x - 0, C>A - 2v_2>(v_1 v_2), dan itu B>A - (v_1 - v_2)>(v_1 v_2). (*B*) Menunjukkan bahwa B^2 (v_1>v_2)C^2 - A^2.

GELOMBANG SUARA HARMONIS

47 • Gelombang suara di udara menghasilkan variasi tekanan yang diberikan oleh p(x,t) - 0,75 kosC_{P} $\frac{}{2}$(x - 343T)D, di mana P dalam pascal, x ada di akuter, dan T adalah dalam hitungan detik. Menemukan (*A*) amplitudo tekanan, (*B*) panjang gelombang, (*C*) frekuensi, dan (*D*) kecepatan gelombang.

48 • (*A*) C tengah pada tangga nada memiliki frekuensi 262Hz. Berapa panjang gelombang nada ini di udara? (*B*) Frekuensi C satu oktaf di atas C tengah adalah dua kali frekuensi C tengah. Berapa panjang gelombang nada ini di udara?

49 • (*A*) Berapa amplitudo perpindahan untuk suara? gelombang dengan frekuensi 100 Hz dan amplitudo tekanan 1,00 10 -4 ATM? (*B*) Amplitudo perpindahan gelombang suara frekuensi 300 Hz adalah 1,00 10-7 M. Dengan asumsi massa jenis udara adalah 1,29 kg>m3, berapakah amplitudo tekanan gelombang ini? SSM

50 • (*A*) Berapakah amplitudo perpindahan suara? gelombang yang memiliki frekuensi 500 Hz pada amplitudo tekanan ambang nyeri 29,0 Pa? (*B*) Dengan asumsi massa jenis udara adalah 1,29 kg>m3, berapakah amplitudo perpindahan gelombang suara yang memiliki amplitudo tekanan yang sama dengan gelombang pada Bagian (*A*), tetapi memiliki frekuensi 1,00 kHz?

51 • Gelombang suara keras khas yang memiliki frekuensi 1,00 kHz memiliki amplitudo tekanan sekitar 1,00 10-4 ATM. (*A*) Pada T - 0, tekanan maksimum di beberapa titik x . Berapakah perpindahan pada titik tersebut di T - 0? (*B*) Dengan asumsi massa jenis udara adalah 1,29 kg>m3, berapakah nilai perpindahan maksimum pada suatu waktu dan tempat?

52 • Satu oktaf mewakili perubahan frekuensi dengan faktor dari 2. Berapa oktaf yang dapat didengar oleh orang biasa?

53 • • **BIOLOGI APLIKASI** Di lautan, paus berkomunikasi ditransmisikan melalui transmisi suara melalui air. Seekor paus mengeluarkan suara 50,0 Hz untuk memberi tahu anak sapi yang tersesat untuk mengejar polongnya. Cepat rambat bunyi di dalam air adalah sekitar 1500 m>s. (*A*) Berapa lama waktu yang dibutuhkan suara untuk mencapai anak sapi jika jaraknya 1,20 km? (*B*) Berapa panjang gelombang bunyi ini di dalam air? (*C*) Jika paus berada dekat dengan permukaan, sebagian energi suara mungkin dibiaskan ke udara. Berapa frekuensi dan panjang gelombang bunyi di udara?

GELOMBANG TIGA DIMENSI: INTENSITAS

54 • Sumber sinusoidal bola memancarkan suara secara seragam di semua arah. Pada jarak 10,0 m, tingkat intensitas suara adalah 1,00 10-4 P>m2. (*A*) Berapa jarak dari sumber intensitas 10-6 P>m2? (*B*) 1.00 Kekuatan apa yang dipancarkan oleh sumber ini?

55 • **EENGINEERING APLIKASI** Sebuah pengeras suara di sebuah konser menghasilkan suara yang memiliki tingkat intensitas sama dengan 1,00 10-2 P>m2 pada 20,0 m dan memiliki frekuensi 1,00 kHz Asumsikan bahwa pembicara menyebarkan energinya secara seragam dalam tiga dimensi. (*A*) Berapa total output daya akustik speaker? (*B*) Pada jarak berapa intensitas suara berada pada ambang nyeri 1,00 W>m2? (*C*) Berapa intensitas bunyi pada jarak 30,0 m? SSM

56 • • Ketika sebuah pin bermassa 0,100 g dijatuhkan dari ketinggian 1,00 m, 0,050 persen energinya diubah menjadi pulsa suara yang berdurasi 0,100 s. (*A*) Perkirakan seberapa jauh pin yang dijatuhkan dapat terdengar jika intensitas suara minimum adalah 1,00 10-11 P>m2. (*B*) Hasil Anda di Bagian (*A*) terlalu besar dalam praktiknya, karena kebisingan latar belakang. Jika Anda menganggap intensitas harus setidaknya 1,00 10-8 P>m2 agar suara terdengar, perkirakan seberapa jauh pin yang dijatuhkan dapat terdengar. (Pada kedua bagian, asumsikan bahwa intensitasnya adalahP>4PR2.)

* TINGKAT INTENSITAS

57 • Berapa tingkat intensitas dalam desibel gelombang suara? yang memiliki intensitas sama dengan (*A*) 1,00 (*B*) 10-10 P>m2 dan 1,00 10-2 P>m2? SSM

58 • Berapakah intensitas gelombang bunyi jika pada a lokasi tertentu, tingkat intensitasnya adalah (*A*) B - 10 dB dan (*B*) B - 3,0dB?

59 • Pada jarak tertentu, tingkat intensitas suara anjing kulit kayu adalah 50 dB. Pada jarak yang sama, tingkat intensitas suara konser rock adalah 10.000 kali gonggongan anjing. Berapa tingkat intensitas suara konser rock?

60 • Berapa fraksi kekuatan akustik dari suatu kebisingan? harus dihilangkan untuk menurunkan tingkat intensitas suaranya dari 90 menjadi 70 dB?

61 • • Sebuah sumber berbentuk bola memancarkan suara secara seragam ke segala arah. tion. Pada jarak 10 m, tingkat intensitas bunyi adalah 80 dB. (*A*) Pada jarak berapa dari sumber tingkat intensitas 60 dB? (*B*) Kekuatan apa yang dipancarkan oleh sumber ini?

62 • • Harry dan Sally sedang duduk di sisi berlawanan dari sebuah sirkus tenda ketika gajah terompet ledakan keras. Jika Harry mengalami tingkat intensitas suara 65 dB dan Sally hanya mengalami 55 dB, berapa perbandingan jarak antara Sally dan gajah dengan jarak antara Harry dan gajah?

63 • • Tiga sumber kebisingan menghasilkan tingkat intensitas 70 dB, 73 dB, dan 80 dB, saat bertindak secara terpisah. Ketika sumber-sumber bekerja bersama-sama, intensitas yang dihasilkan adalah jumlah dari intensitas individu. (*A*) Temukan tingkat intensitas suara dalam desibel ketika ketiga sumber bekerja pada waktu yang sama. (*B*) Diskusikan efektivitas menghilangkan dua sumber kurang intens dalam mengurangi tingkat intensitas kebisingan.

64 • • Tunjukkan bahwa jika dua orang berbeda jarak dari sumber suara, perbedaannya ¢B antara tingkat intensitas yang mencapai orang, dalam desibel, akan selalu sama, tidak peduli kekuatan yang dipancarkan oleh sumbernya.

65 • • • Semua orang di sebuah pesta berbicara sama kerasnya. Satu orang sedang berbicara dengan Anda dan tingkat intensitas suara di lokasi Anda adalah 72 dB. Dengan asumsi bahwa semua 38 orang di pesta berada pada jarak yang sama dari Anda dengan orang yang Anda ajak bicara, temukan tingkat intensitas suara di lokasi Anda.

66 • • • Ketika seorang pemain biola menarik busur pada seutas tali, gayanya dengan mana busur ditarik cukup kecil, sekitar 0,60 N. Misalkan busur bergerak melintasi tali A, yang bergetar pada 440 Hz, pada 0,50 m>s. Seorang pendengar yang berjarak 35 m dari pelaku mendengar suara dengan intensitas 60 dB. Dengan asumsi bahwa suara memancar secara seragam ke segala arah, dengan efisiensi berapa energi mekanik membungkuk diubah menjadi energi suara?

67 • • • Tingkat intensitas kebisingan di beberapa lokasi di tempat kosong ruang kelas adalah 40 dB. Saat 100 siswa sedang menulis saat ujian, tingkat kebisingan di lokasi tersebut meningkat menjadi 60 dB. Dengan asumsi bahwa kebisingan yang dihasilkan oleh setiap siswa menyumbangkan jumlah daya akustik yang sama, tentukan tingkat intensitas kebisingan di dalam ruangan setelah 50 siswa pergi.SSM

GELOMBANG STRING MENGALAMI PERUBAHAN KECEPATAN

68 • Seutas tali sepanjang 3,00 m, dengan massa 25,0 g, adalah diikat pada seutas benang seberat 4,00 m dengan massa 75,0 g, dan kombinasi tersebut diberi tegangan 100 N. Jika sebuah pulsa transversal dikirim ke tali yang kurang rapat, tentukan koefisien refleksi dan transmisi di titik persimpangan.

69 • Pertimbangkan tali tegang, dengan massa per satuan panjang M , 1 membawa pulsa gelombang transversal yang datang pada titik di mana string terhubung ke string kedua, dengan massa per satuan panjang M . (*A*) Tunjukkan2 bahwa jika m - m , maka koefisien refleksi Rsama dengan nol dan koefisien transmisi T sama dengan 1. (*B*) Tunjukkan bahwa jika M W M , kemudian2 R - -1 dan1 T - 0. (*C*) Tunjukkan bahwa jika Mkemudian R - 2 V M , 1 1 dan T - 2. SSM

70 • • Verifikasi validitas 1 - R2 (v >v)T2 (Persamaan 15-36) dengan mengganti ekspresi untuk R dan T ke dalamnya.

71 • • • Pertimbangkan tali tegang yang memiliki massa per satuan panjang M 1 membawa pulsa gelombang transversal dari bentuk y - f(x - vt) yang terjadi pada suatu titik P di mana string terhubung ke string kedua dengan massa per satuan panjang M . Turunan2 1 - R2 (v >v)T2 dengan menyamakan insiden kekuatan pada titik P dengan daya yang dipantulkan di P ditambah daya yang ditransmisikan pada P.

EFEK DOPPLER

Dalam Soal 72 hingga 77, asumsikan bahwa sumber memancarkan suara pada frekuensi 200 Hz. Asumsikan juga bahwa suara merambat melalui udara diam dengan kecepatan 343 m/s.

72 • Sebuah sumber bunyi bergerak dengan kecepatan 80 m>s menuju tempat diam pendengar yang berdiri di udara diam. (*A*) Tentukan panjang gelombang bunyi di daerah antara sumber dan pendengar. (*B*) Tentukan frekuensi yang didengar oleh pendengar.

73 • Pertimbangkan situasi yang dijelaskan dalam Soal 72 dari kerangka acuan sumber. Dalam bingkai ini, pendengar dan udara bergerak menuju sumber pada 80 m>s dan sumber diam. (*A*) Pada kecepatan berapa, relatif terhadap sumber, suara merambat di daerah antara sumber dan pendengar? (*B*) Tentukan panjang gelombang bunyi di daerah antara sumber dan pendengar. (*C*) Tentukan frekuensi yang didengar oleh pendengar.

74 • Sebuah sumber suara bergerak menjauh dari daftar stasioner. tener pada 80 m>s. (*A*) Temukan panjang gelombang gelombang suara di daerah antara sumber dan pendengar. (*B*) Tentukan frekuensi yang didengar oleh pendengar.

75 • Pendengar bergerak dengan kecepatan 80 m>s dari stasiun-sumber yang diam relatif terhadap udara. Cari frekuensi yang didengar oleh pendengar.

76 • • **CONTEKS-RICH** Anda telah melakukan perjalanan untuk mengamati Pendaratan pesawat ulang-alik. Menjelang akhir penurunannya, kapal melaju dengan kecepatan Mach 2,50 pada ketinggian 5000 m. (*A*) Berapa sudut yang dibuat gelombang kejut dengan garis terbang pesawat ulang-alik? (*B*) Berapa jauh Anda dari pesawat ulang-alik pada saat Anda mendengar gelombang kejutnya, dengan asumsi pesawat ulang-alik mempertahankan arah yang konstan dan ketinggian 5000 m yang konstan setelah terbang langsung di atas kepala Anda?

77 • • **EENGINEERING AAPLIKASI** SuperKamiokande neu-detektor trino Jepang adalah tangki air seukuran bangunan 14 lantai. Ketika neutrino bertabrakan dengan elektron di dalam air, sebagian besar energinya ditransfer ke elektron. Akibatnya, elektron kemudian terbang dengan kecepatan mendekati *C*. Neutrino dihitung dengan mendeteksi gelombang kejut, yang disebut radiasi Cerenkov, yang dihasilkan ketika elektron berkecepatan tinggi bergerak melalui air dengan kecepatan lebih besar daripada kecepatan cahaya dalam air. Jika sudut maksimum kerucut gelombang kejut Cerenkov adalah 48,75 °, berapa kecepatan cahaya dalam air?

78 • • **EENGINEERING AAPLIKASI, CONTEKS-RICH** Anda berada di bertugas mengkalibrasi senjata radar untuk departemen kepolisian setempat. Salah satu perangkat tersebut memancarkan gelombang mikro pada frekuensi 2,00 GHz. Selama uji coba, gelombang ini dipantulkan dari mobil yang bergerak langsung menjauh dari emitor stasioner. Anda mendeteksi perbedaan frekuensi (antara gelombang mikro yang diterima dan gelombang mikro yang dikirim) sebesar 293 Hz. Cari kecepatan mobil.

79 • • **EENGINEERING AAPLIKASI, CONTEKS-RICH** NS Efek Doppler secara rutin digunakan untuk mengukur kecepatan angin dalam sistem badai. Sebagai manajer stasiun pemantau cuaca di Midwest, Anda menggunakan sistem radar Doppler yang memiliki frekuensi 625 MHz untuk memantulkan pulsa radar dari tetesan hujan dalam sistem badai petir yang berputar sejauh 50 km. Anda mengukur pulsa radar yang dipantulkan untuk dinaikkan frekuensinya sebesar 325 Hz. Dengan asumsi angin menuju langsung ke arah Anda, seberapa cepat angin dalam sistem badai bergerak? *Petunjuk: Sistem radar hanya dapat mengukur komponen kecepatan angin di sepanjang "garis pandangnya".* SSM

80 • • **EENGINEERING AAPLIKASI** Sebuah perusak stasioner adalah dilengkapi dengan sonar yang mengirimkan pulsa suara 40 MHz. Kapal perusak menerima pulsa pantul kembali dari kapal selam tepat di bawah dengan waktu tunda 80 ms pada frekuensi 39,958 MHz. Jika cepat rambat bunyi di air laut 1,54 km>s, (*A*) berapa kedalaman kapal selam? (*B*) Berapa kecepatan vertikalnya?

81 • • Sebuah unit radar polisi mentransmisikan gelombang mikro frekuensi 3,00 10_{10} Hz, dan kecepatannya di udara adalah 3,00 10_8 m>s. Misalkan a mobil mundur dari mobil polisi yang sedang diam dengan kecepatan 140 km>jam. (*A*) Berapa perbedaan frekuensi antara sinyal yang ditransmisikan dan sinyal yang diterima dari mobil yang sedang surut? (*B*) Misalkan mobil polisi, sebaliknya, bergerak dengan kecepatan 60 km>jam ke arah yang sama dengan kendaraan lain. Apa perbedaan frekuensi antara sinyal yang dipancarkan dan yang dipantulkan?

82 • • **BIOLOGI AAPLIKASI, CONTEKS-RICH** Di modern obat, efek Doppler secara rutin digunakan untuk mengukur laju dan arah aliran darah di arteri dan vena. "Ultrasonografi" frekuensi tinggi (suara pada frekuensi di atas rentang pendengaran manusia) biasanya digunakan. Misalkan Anda bertugas mengukur aliran darah dalam vena (terletak di kaki bagian bawah pasien yang lebih tua) yang mengembalikan darah ke atas ke jantung. Varisesnya menunjukkan bahwa mungkin katup satu arah di vena tidak berfungsi dengan baik dan bahwa darah "mengumpul" di vena dan bahkan mungkin aliran darah mundur ke arah kakinya. Dengan menggunakan suara yang memiliki frekuensi 50,0 kHz, Anda mengarahkan sumber suara dari atas daerah pahanya ke bawah ke arah kakinya dan mengukur suara yang dipantulkan dari area vena itu menjadi lebih rendah dari 50,0 kHz. (*A*) Apakah diagnosis kondisi katup Anda benar? Jika demikian, jelaskan. (*B*) Perkirakan kemampuan perbedaan frekuensi instrumen untuk memungkinkan Anda mengukur kecepatan hingga 1,00 mm>s. Ambil kecepatan suara dalam daging sama dengan kecepatan di air, 1500 m>s.

83 • • Sumber frekuensi suara F bergerak dengan kecepatan kamu rel-$_S$ bergerak ke udara diam menuju penerima yang bergerak menjauh dari sumber dengan kecepatan kamu $_R$ relatif terhadap udara diam. (*A*) Tulis ekspresi untuk frekuensi yang diterima F_{∞}. (*B*) $_R$Gunakan hasil bahwa (1 - x)$_{-1}$ - 1 x untuk menunjukkan bahwa jika kedua$_S$nya kamu dan kamu kecil dibandingkan dengan v, maka frekuensi yang diterima kira-kira

$$F_R - A1 \quad \frac{\text{kamu}}{\text{v}}{}_{\text{rel}} BF_S$$

di mana kamu $_{rel}$ - kamu $_S$ - kamu $_R$ adalah kecepatan sumber relatif terhadap penerima. SSM

84 • • Untuk mempelajari pergeseran Doppler sendiri, Anda mengambil perangkat penghasil nada elektronik yang diatur ke frekuensi C tengah (262 Hz) ke kampus yang ingin dikenal sebagai "The Abyss." Saat Anda memegang perangkat dengan jarak tangan (1,0 m), Anda mengukur tingkat intensitasnya menjadi 80,0 dB. Anda kemudian menjatuhkan tuner ke dalam lubang, mendengarkan suaranya saat jatuh. (*A*) Setelah tuner jatuh selama 5,50 s, berapa frekuensi yang Anda dengar? (*B*) Perkirakan waktu di mana Anda tidak dapat lagi mendengar tuner.

85 • • Anda berada dalam balon udara panas yang dibawa sejauh 36 km>j angin dan memiliki sumber suara dengan Anda yang memancarkan suara 800 Hz saat mendekati gedung tinggi. (*A*) Berapa frekuensi bunyi yang didengar oleh seorang pengamat di jendela gedung ini? (*B*) Berapa frekuensi bunyi pantul yang kamu dengar?

86 • • Sebuah mobil mendekati dinding pantul. Sebuah benda stasioner server di belakang mobil mendengar suara frekuensi 745 Hz dari klakson mobil dan suara frekuensi 863 Hz dari dinding. (*A*) Seberapa cepat mobil tersebut melaju? (*B*) Berapa frekuensi klakson mobil? (*C*) Berapa frekuensi yang didengar pengemudi mobil yang dipantulkan dari dinding?

87 • • Pengemudi mobil yang melaju dengan kecepatan 100 km>jam menuju cal wall sebentar membunyikan klakson. Tepat 1,00 s kemudian dia mendengar gema dan mencatat bahwa frekuensinya adalah 840 Hz. Berapa jarak mobil dari tembok ketika pengemudi membunyikan klakson dan berapa frekuensi klaksonnya?

88 • • Anda sedang dalam penerbangan transatlantik menuju ke barat di 800 km>jam. Sebuah pesawat eksperimental yang terbang dengan kecepatan Mach 1,6 dan 3,0 km di sebelah utara pesawat Anda juga berada di jalur timur-ke-barat. Berapa jarak antara kedua pesawat ketika Anda mendengar ledakan sonik dari pesawat eksperimental?

89 • • • Teleskop luar angkasa Hubble telah digunakan untuk menentukan keberadaan planet yang mengorbit di sekitar bintang jauh. Sebuah planet yang mengorbit sebuah bintang akan menyebabkan bintang tersebut "bergoyang" dengan periode yang sama dengan orbit planet tersebut. Karena goyangan ini, cahaya dari bintang tersebut akan mengalami pergeseran Doppler ke atas dan ke bawah secara berkala. Perkirakan panjang gelombang maksimum dan minimum cahaya dengan panjang gelombang nominal 500 nm yang dipancarkan Matahari yang mengalami pergeseran Doppler oleh gerak Matahari akibat planet Jupiter.

MASALAH UMUM

90 • Pada waktu T - 0, bentuk pulsa gelombang pada seutas tali adalah diberikan oleh fungsi y(x,0) - 0,120 m3>((2.00 m)2 x2), di mana x adalah dalam meter. (*A*) Sketsa y(x, 0) versus x. (*B*) Berikan fungsi gelombangy(x,t) secara umum T jika pulsa bergerak dalam x arah dengan kecepatan 10,0 m>s dan jika pulsa bergerak dalam - x arah dengan kecepatan 10,0 m>s.

91 • Peluit yang memiliki frekuensi 500 Hz bergerak melingkar jarak radius 1,00 m pada 3,00 putaran>s. Berapa frekuensi maksimum dan minimum yang didengar oleh pendengar yang diam pada bidang lingkaran dan berjarak 5,00 m dari pusatnya? SSM

92 • Gelombang laut bergerak menuju pantai dengan kecepatan 8,90 m>s dan pemisahan puncak-ke-puncak 15,0 m. Anda berada di perahu kecil yang berlabuh di lepas pantai. (*A*) Pada frekuensi berapa puncak gelombang mencapai perahu Anda? (*B*) Anda sekarang mengangkat jangkar dan menuju ke laut dengan kecepatan 15,0 m>s. Pada frekuensi berapa puncak gelombang mencapai perahu Anda sekarang?

93 • • Sebuah kawat sepanjang 12,0 m yang memiliki massa 85,0 g berada di bawah a tegangan 180 N. Sebuah pulsa dihasilkan di ujung kiri kabel, dan 25,0 ms kemudian pulsa kedua dihasilkan di ujung kanan kabel. Dimana pulsa pertama kali bertemu?

94 • • Anda diparkir di bahu jalan raya. Temukan kecepatan mobil di mana nada klakson mobil turun 10 persen saat melewati Anda. (Dengan kata lain, total penurunan frekuensi antara nilai "pendekatan" dan nilai "resesi" adalah 10%.)

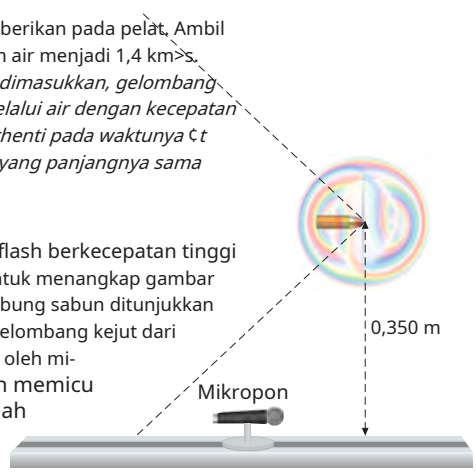
95 • • Pengemudi pengeras suara dengan diameter 20 cm bergetar pada 800 Hz dengan amplitudo 0,0250 mm. Dengan asumsi bahwa molekul udara di sekitarnya memiliki amplitudo getaran yang sama, tentukan (*A*) amplitudo tekanan tepat di depan pengemudi, (*B*) intensitas suara, dan (*C*) daya akustik yang dipancarkan oleh permukaan depan pengemudi. SSM

96 • • Sebuah pesawat, harmonik, gelombang suara di udara memiliki amplitudo 1.00 Mm memiliki intensitas 10,0 m W>m2. Berapakah frekuensi gelombang tersebut?

97 • • Air mengalir dengan kecepatan 7,0 m>s dalam pipa dengan jari-jari 5,0 cm. Sebuah piring dengan luas yang sama dengan luas penampang pipa tiba-tiba dimasukkan untuk menghentikan aliran. Temukan gaya yang diberikan pada pelat. Ambil kecepatan suara dalam air menjadi 1,4 km>s. *Petunjuk: Ketika pelat dimasukkan, gelombang tekanan merambat melalui air dengan kecepatan suara,* v . *Massa air terhenti pada waktunya* ¢*t adalah air dalam pipa yang panjangnya sama dengan* v ¢*T.*

S

98 • • Fotografi flash berkecepatan tinggi setup dimaksudkan untuk menangkap gambar peluru meledak gelembung sabun ditunjukkan pada Gambar 15-33. Gelombang kejut dari peluru harus dideteksi oleh microphone yang akan memicu flash. Mikrofon adalah ditempatkan pada lintasan yang sejajar dan 0,350 m di bawah jalan peluru. Trek digunakan untuk mengatur posisi mikrofon. Jika peluru bergerak dengan kecepatan 1,25 kali kecepatan suara, dan jarak antara bangku lab dan lintasan adalah 0,350 m, berapa jauh ke belakang dari gelembung sabun mikrofon harus diatur untuk memicu lampu kilat? (Asumsikan bahwa blitz itu sendiri seketika setelah mikrofon dipicu.)



ANGKA 15-33 **Soal 98**

99 • • Sebuah kolom dari pawai presisi terus selangkah demi selangkah mendengarkaning ke band diposisikan di kepala kolom. Ketukan musik adalah untuk 100 langkah> mnt. Sebuah kamera televisi menunjukkan bahwa hanya para demonstran di depan dan belakang kolom yang benar-benar melangkah. Para peserta pawai di bagian tengah melangkah ke depan dengan kaki kiri sedangkan yang di depan dan di belakang melangkah ke depan dengan kaki kanan. Namun, para pawai sangat terlatih sehingga mereka semua yakin bahwa mereka berada dalam langkah yang tepat dengan musik. Berapa panjang kolomnya?

100 • • **BIOLOGI APLIKASI** Seekor kelelawar terbang menuju stasiun-rintangan pada 12,0 m>s memancarkan pulsa suara frekuensi tinggi singkat pada frekuensi pengulangan 80,0 Hz. Berapakah selang waktu antara waktu tiba pulsa pantul yang didengar kelelawar?

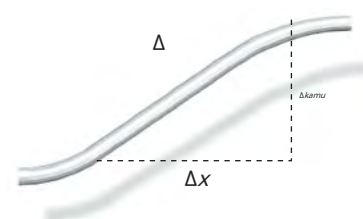
101 • • Laser mulai ke bulan dilakukan secara rutin hingga akurat menentukan jarak bumi-bulan. Namun, untuk menentukan jarak secara akurat, koreksi harus dilakukan untuk kecepatan rata-rata cahaya di atmosfer bumi, yaitu 99,997 persen dari kecepatan cahaya di ruang hampa. Dengan asumsi bahwa atmosfer bumi tingginya 8,00 km, perkirakan panjang koreksinya.

102 • • Garpu tala yang diikatkan pada senar yang kencang menghasilkan gelombang transversal. Getaran garpu tegak lurus dengan tali. Frekuensinya 400 Hz dan amplitudo osilasinya 0,50 mm. Tali memiliki kerapatan massa linier 0,010 kg>m dan berada di bawah tegangan 1,0 kN. Asumsikan bahwa tidak ada gelombang yang dipantulkan di ujung tali. (*A*) Berapakah periode dan frekuensi gelombang pada tali? (*B*) Berapakah cepat rambat gelombang tersebut? (*C*) Berapa panjang gelombang dan bilangan gelombangnya? (*D*) Apa fungsi gelombang yang cocok untuk gelombang pada tali? (*e*) Berapakah kecepatan dan percepatan maksimum suatu titik pada tali? (*F*) Pada kecepatan rata-rata minimum berapakah energi harus disuplai ke garpu agar tetap berosilasi pada amplitudo tetap?

103 • • • Sebuah tali panjang dengan massa per satuan panjang 0,100 kg>m berada di bawah tegangan konstan 10,0 N. Sebuah motor menggerakkan salah satu ujung tali dengan gerak harmonik sederhana melintang pada 5,00 siklus per detik dan amplitudo 40,0 mm. (*A*) Berapa kecepatan gelombangnya? Berapa panjang gelombangnya? (*C*) Berapa momentum linier transversal maksimum dari segmen tali 1,00 mm? (*D*) Berapakah gaya total maksimum pada segmen tali 1,00 mm?

104 • • • Dalam masalah ini, Anda akan memperoleh ekspresi untuk energi potensial dari segmen string yang membawa gelombang berjalan (Gambar 15-34). Energi potensial suatu segmen sama dengan usaha yang dilakukan oleh tegangan dalam meregangkan tali, yaitu ¢*kamu* - F (- -*x*), di mana F adalah ketegangan, - adalah panjang segmen yang diregangkan, dan ¢*x* adalah panjang aslinya. (*A*) Gunakan binomial untuk menunjukkan bahwa - -*x* - 1 2(¢*kamu*>¢*x*)2 ¢*x*, dan disanadepan ¢*kamu* - 12F (¢*kamu*>¢*x*)2 ¢*x*. (*B*) Hitung *kamu*> *x* dari gelombang fungsi y(x, t) - A dosa(kx - vT) (Persamaan 15-15) dan tunjukkan bahwa ¢*kamu* - 2F A2 kar2ena(kx - vT) ¢*x*.

- - 4(¢*x*)2 (¢*kamu*)2 - ¢*x*[1] (¢*kamu*>¢*x*)2]1>2.



GAMBAR 15-34 **Soal 104**