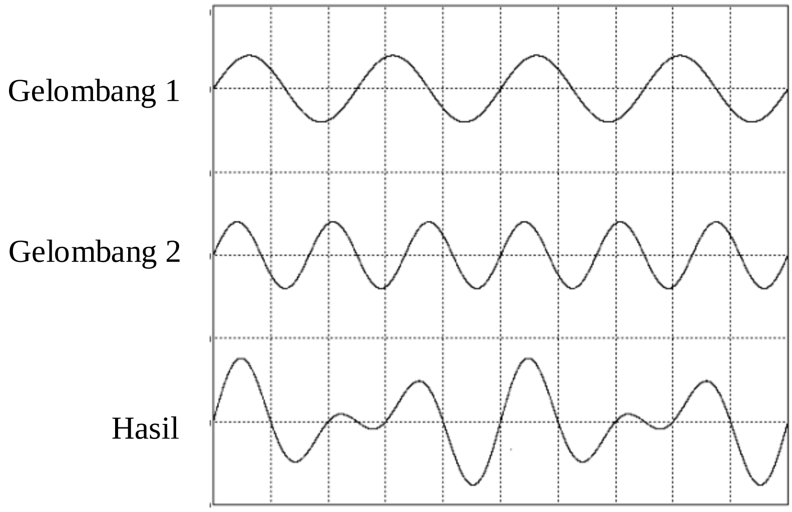
BAB 2
SIFAT GELOMBANG

2.1 Prinsip Superposisi

Suatu medium dapat dilalui oleh dua atau lebih gelombang secara bebas. Simpangan yang terjadi pada medium tersebut merupakan jumlah dari simpangan yang dihasilkan masing-masing gelombang. Proses penjumlahan vektor simpangan ini disebut *prinsip superposisi* .

$$y = y1 + y2 + y3 + ... \qquad (2.1)$$



Gambar 2.1
Superposisi dua gelombang

Meskipun simpangan yang terjadi pada medium merupakan hasil superposisi, tapi sebenarnya gelombang-gelombang asalnya tidak mengalami perubahan sama sekali. Gejala ini dapat dilihat dari contoh-contoh berikut ini.

Contoh 1 :
Kita dapat mendengar detail instrumen musik pada suatu lagu, meskipun sebenarnya gelombang suara yang sampai di telinga kita merupakan superposisi gelombang dari berbagai macam alat musik (termasuk vokal penyanyi).

Contoh 2 :

Gelombang radio dengan berbagai macam frekuensi dari berbagai studio pemancar dapat mencapai antene secara bersamaan, dan menimbulkan superposisi arus pada anterne. Namun demikian, kita tetap dapat memilih (tuning) satu dari sekian banyak frekuensi (juga berarti memilih studio pemancar) tersebut yang akan kita dengar.

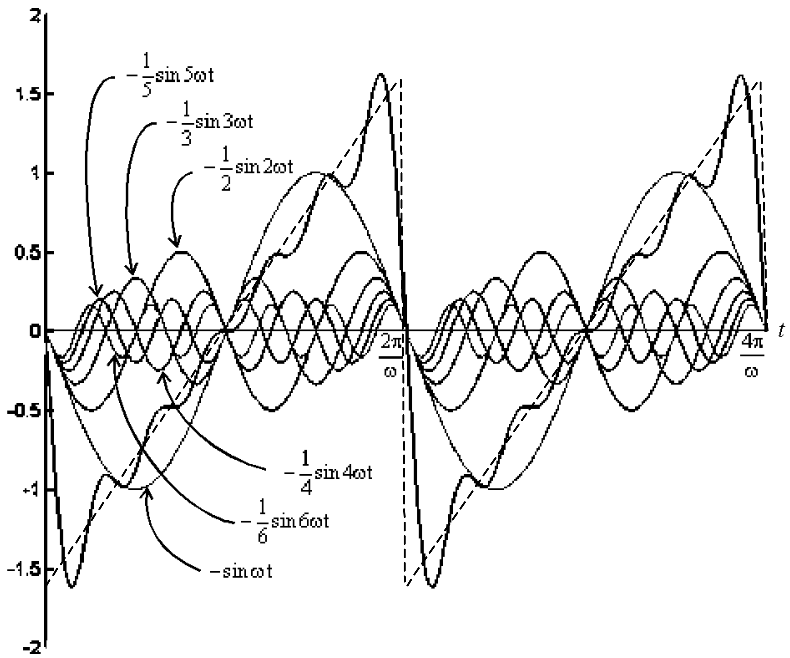
Prinsip superposisi ini akan tetap berlaku selama hubungan antara deformasi (perubahan bentuk) medium dan gaya restorasi masih bersifat linier (ingat F = -kx). Pada gelombang elektromagnet, prinsip superposisi juga berlaku karena hubungan matematis yang linier antara medan listrik dan medan magnet di dalamnya.

Prinsip superposisi ini tidak berlaku pada benda-benda yang tidak memenuhi hukum Hooke (F = -kx), seperti pada pegas yang sudah melewati batas elastisitasnya. Selain itu prinsip superposisi juga tidak berlaku pada gelombang yang penyebarannya tidak linier. Tidak berlakunya prinsip superposisi dapat diartikan, bahwa gelombang-gelombang yang saling bertemu akan mengalami perubahan bentuk terhadap bentuk awal, setelah mereka berpisah kembali. Sebagai contoh di sini adalah gelombang suara yang berasal dari suatu ledakan, yang menghasilkan *gelombang kejut*. Meskipun gelombang kejut adalah gelombang longitudinal elastis di udara, namun sifatnya berbeda dari gelombang suara biasa. Persamaan matematis untuk perambatannya berbentuk kuadratis, sehingga padanya tidak berlaku prinsip superposisi.

Prinsip superposisi ini menjadi penting antara lain karena dengannya dapat dilakukan analisa terhadap gelombang kompleks, yang diasumsikan sebagai perpaduan dari sejumlah gelombang-gelombang sederhana. Seorang ahli matematik Perancis bernama J.Fourier (1768 – 1830) menyatakan bahwa dengan menggunakan gelombang-gelombang harmonis sederhana, kita dapat membuat hampir segala macam bentuk gelombang yang ada. Sebagai contoh, jika $y(t)$ adalah persamaan gerak suatu sumber gelombang berperiode T, kita dapat menguraikan persamaan gerak tersebut sebagai berikut :

$$\begin{aligned} y(t) = {} & A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \ldots \\ & + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \ldots \end{aligned} \tag{2.2}$$

dimana $\omega = 2\pi/T$. Bentuk seperti ini dinamakan deret Fourier. A dan B adalah konstanta yang memiliki nilai tertentu untuk setiap periode gelombang $y(t)$. Sebagai contoh, lihatlah gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2
Kurva terputus-putus yang tampak pada gambar merupakan bagian dari gelombang yang biasa ada dalam perangkat elektronik. Bentuk fungsi yang sesuai untuk kurva tersebut antara lain : $y(t) = (\omega/2\pi)t - ½$ *untuk* $0 < t < 2\pi/\omega$. *Deret Fourier untuk fungsi tersebut adalah* $y(t) = (1/\pi)(-\sin \omega t - ½ \sin 2\omega t - 1/3 \sin 3\omega t - ...)$. *Kurva terbesar dengan garis utuh menunjukkan hasil superposisi enam suku pertama dari deret Fourier, dan terlihat bahwa bentuknya hampir menyerupai kurva aslinya (dengan garis terputus-putus). Semakin banyak suku dari deret Fourier yang digunakan, semakin mirip bentuk keduanya.*

Jika getaran bersifat tidak periodis, seperti pulsa, operasi penjumlahan di atas diganti dengan operasi integral – sehingga dinamakan *integral Fourier*. Jadi, setiap getaran yang dihasilkan sumber gelombang dapat direpresentasikan dalam bentuk penjumlahan getaran-getaran harmonis sederhana. Karena getaran dari sumber tersebut akan menghasilkan gelombang maka gelombang yang dihasilkannya dapat dianalisa juga dalam bentuk kombinasi gelombang-gelombang harmonis sederhana. Inilah sebabnya mengapa getaran harmonis sederhana dan gelombang harmonis sederhana menjadi begitu penting.

Jika gelombang mekanik merambat pada medium yang elastisitasnya tidak memenuhi hukum Hooke, maka gelombang yang mencapai ujung lain dari medium dapat mengalami perubahan bentuk. Hal ini dapat diterangkan sebagai berikut : setiap komponen gelombang harmonik yang merambat pada medium tersebut sebenarnya tidak mengalami perubahan bentuk, namun cepat rambat untuk setiap gelombang (untuk setiap frekwensi) jadi berbeda. Akibatnya, terjadi perubahan bentuk hasil superposisi gelombang. Fenomena perbedaan cepat rambat ini dinamakan *dispersi* dan medium yang menimbulkan dispersi ini disebut bersifat *dispersif* terhadap gelombang yang dipengaruhinya. Dispersi menimbulkan akibat berupa perubahan bentuk gelombang. Contoh untuk kondisi nondispersif adalah gelombang mekanik yang merambat pada tali ideal (fleksibel total) dan gelombang elektromagnet (termasuk cahanya) yang merambat melalui ruang hampa. Contoh kondisi dispersif adalah gelombang laut dan gelombang cahaya yang merambat melalui medium transparan, misalnya gelas.

Peristiwa lain yang dapat menimbulkan perubahan bentuk pada pulsa gelombang adalah hilangnya sebagian energi mekanis karena terserap oleh medium dan lingkungannya, misalnya oleh hambatan udara, viskositas (kekentalan fluida), atau gesekan internal. Di sini, amplitudo gelombang akan mengecil terhadap waktu dan gelombang disebut mengalami *peredaman* (atenuasi).

Dalam pembahasan-pembahasan berikutnya, medium akan dianggap bersifat nondispersif dan diasumsikan tidak terdapat disipasi (pembuangan) energi pada saat gelombang merambat melalui medium.

2.2 Cepat Rambat Gelombang Pada Tali

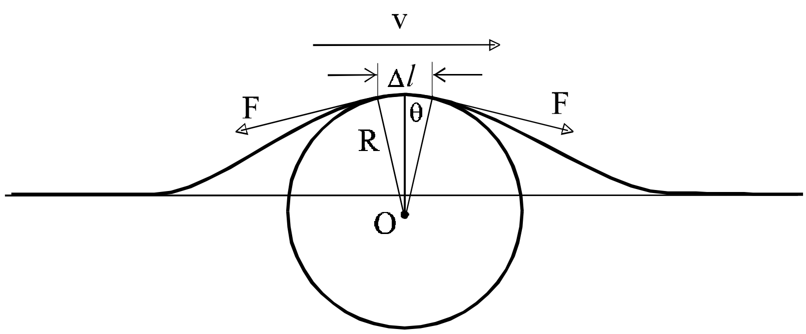
Dengan mengetahui karakteristik medium, kita dapat menghitung cepat rambat gelombang dengan menggunakan prinsip-prinsip dasar pada mekanika Newton. Pada bagian ini, kita akan berkonsentrasi pada gelombang transversal yang merambat pada tali. Di bawah ini dapat dilihat dua pendekatan untuk perhitungan cepat rambat gelombang – yang pertama didasari oleh analisa dimensional dan yang kedua oleh analisa mekanika.

Analisa pertama kita mulai dengan mengingat kembali bahwa cepat rambat gelombang ditentukan oleh elastisitas dan kelembaman (inersia) medium. Tingkat elastisitas tali ditentukan oleh gaya tegang tali, F; semakin tinggi gaya tegang tali, semakin besar gaya restorasi yang dapat timbul pada tali, sehingga tali semakin elastis. Tingkat kelembaman (inersia) tali ditentukan oleh massa tali per satuan panjang (μ). Dengan asumsi bahwa cepat rambat gelombang hanya bergantung pada F dan μ saja, kita dapat mencari hubungan antara ketiga besaran tersebut dengan melalui analisa dimensi. Jika massa berdimensi M, panjang berdimensi L, dan waktu berdimensi T, maka F memiliki dimensi MLT^{-2} dan dimensi μ adalah ML^{-1}. Dimensi

F dan μ tersebut kita atur sedemikian rupa agar dapat menghasilkan dimensi kecepatan LT^{-1}, yang ternyata bisa diperoleh dengan menerapkan akar terhadap F/μ. Karena F/μ memiliki dimensi L^2T^{-2}, maka $\sqrt{F/\mu}$ akan memiliki dimensi LT^{-1}, yang sama dengan dimensi kecepatan. Karena dalam analisa dimensi tidak dapat digunakan besaran-besaran tanpa dimensi, maka diperoleh hasil sebagai berikut :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \tag{2.3}$$

Persamaan 2.3 di atas, yang merupakan hasil dari analisa dimensi, belum tentu merupakan hasil final, karena masih terdapat kemungkinan adanya besaran-besaran non-dimensional, yang tidak dapat disertakan dalam analisa dimensi. Namun paling tidak kita bisa mengatakan bahwa cepat rambat gelombang setara dengan $\sqrt{F/\mu}$ yang dikalikan dengan suatu konstanta tak berdimensi. Nilai konstanta yang sesuai bisa diperoleh dari eksperimen atau dari analisa mekanika, yang ternyata menunjukkan bahwa konstanta tersebut bernilai satu. Dengan demikian persamaan 2.3 di atas dapat dinyatakan benar.



Gambar 2.3
Penurunan rumus cepat rambat gelombang melalui perhitungan gaya-gaya pada bagian tali sepanjang Δl.

Selanjutnya kita akan menghitung cepat rambat pulsa pada tali terregang dengan menggunakan analisa mekanika. Gambar 2.3 di atas memperlihatkan sebuah pulsa gelombang yang merambat pada tali dari kanan ke kiri dengan kecepatan v. Agar pulsa tersebut terlihat diam, maka sementara pulsa tersebut merambat, tali digerakkan dari kiri ke kanan dengan kecepatan yang sama dengan cepat rambat pulsa. Dengan demikian kita tidak menggunakan dinding-dinding, dimana tali ditambatkan, sebagai kerangka acuan. Di sini kita menggunakan pulsa sebagai kerangka acuan. Hal ini bisa kita lakukan karena pada kedua kerangka acuan tersebut berlaku nilai percepatan yang sama. Pemilihan kerangka acuan di sini tidak lain bertujuan untuk lebih mempermudah perhitungan.

Kita perhatikan satu bagian kecil pada tali, yaitu Δl, yang membentuk busur lingkaran berjari-jari R. Jika μ adalah besarnya massa tali per satuan panjang, yang dinamakan *kerapatan linier*, maka $\mu\Delta l$ adalah besarnya massa dari elemen bagian tali tersebut. Gaya tegang F bekerja secara tangensial pada kedua ujung elemen tali. Komponen-komponen horisontal dari gaya tegang tersebut akan saling meniadakan dan komponen vertikal dari gaya tegang tersebut akan memiliki nilai total sebesar : 2 F sin θ, yang merupakan gaya sentripetal pada elemen tali. Karena θ sangat kecil, maka sin $\theta \cong \theta$, dan kita dapatkan hasil sebagai berikut :

$$2F\sin\theta = 2F\theta = 2F\frac{(\Delta l/2)}{R} = F\frac{\Delta l}{R} \qquad (2.4)$$

Persamaan ini menunjukkan bentuk lain dari persamaan gaya sentripetal untuk elemen tali, yang mengarah ke pusat lingkaran O. Gaya sentripetal tersebut bekerja pada elemen bermassa m = $\mu\Delta l$, yang bergerak dengan kecepatan v dalam lintasan berbentuk lingkaran berjari-jari R. Besar gaya tersebut adalah $mv^2/R = \mu\Delta l\ v^2/R$. Dengan mensubstitusi persamaan ini ke persamaan 2.4, akan diperoleh :

$$F\frac{\Delta l}{R} = \frac{\mu\Delta l v^2}{R}$$

atau

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (2.5)$$

Jika amplitudo pulsa jauh lebih besar dibandingkan dengan panjang tali, kita tidak bisa menggunakan pendekatan sin $\theta \cong \theta$. Disamping itu, gaya tegang F akan mengalami perubahan akibat datangnya pulsa. Padahal, dalam pendekatan di atas kita mengasumsikan bahwa gaya tegang F di dalam tali tidak pernah berubah, termasuk ketika dirambati pulsa. Dengan demikian, hasil yang kita peroleh di atas hanya berlaku untuk gerakan transversal yang relatif kecil – meskipun dalam kenyataannya hampir selalu sesuai untuk setiap keadaan. Perlu diperhatikan juga bahwa cepat rambat gelombang tidak bergantung pada bentuk gelombang, karena dalam penurunan persamaan di atas, tidak ada asumsi khusus mengenai bentuk gelombang yang digunakan.

Frekwensi suatu gelombang ditentukan oleh frekwensi sumber, ν. Cepat rambat gelombang pada suatu medium ditentukan oleh sifat medium tersebut. Jika frekwensi (ν) dan cepat rambat (v) gelombang telah diketahui, maka panjang gelombang (λ) dapat dihitung :

$$\lambda = \frac{v}{\lambda} \qquad (2.6)$$

Contoh :

Gelombang sinusoidal transversal dirambatkan pada sebuah tali dengan jalan mengikat salah satu ujungnya pada sebuah batang kayu yang bergerak naik turun dalam lintasan sepanjang 0.50 cm. Gerakan batang kayu tersebut bersifat kontinu dan berulang sebanyak 120 kali per detik.

(*a*) Jika tali memiliki kerapatan linier 0.25 kg/m dan menerima gaya tegang sebesar 90 N, tentukan cepat rambat, amplitudo, panjang gelombang, dan frekwensi dari gelombang yang merambat pada tali tersebut.

(*b*) Tuliskan persamaan gelombangnya, jika diketahui gelombang merambat ke arah sumbu x positif dan ujung tali pada posisi x = 0 memiliki simpangan y = 0 pada saat t = 0.

Jawab :

(*a*) Ujung tali berpindah sejauh 0.25 cm dari posisi setimbangnya untuk mencapai simpangan terjauh, baik ke atas maupun ke bawah. Dengan demikian, amplitudonya adalah y_m = 0.25 cm.

Seluruh gerakan diulang sebanyak 120 kali setiap detiknya, sehingga frekwensinya adalah 120 getaran/detik atau 120 Hz.

Cepat rambat gelombang dapat dihitung dengan $v = \sqrt{F/\mu}$. Dengan F = 90 N dan μ = 0.25 kg/m diperoleh cepat rambat sebesar :

$$v = \sqrt{\frac{90\ \text{N}}{0.25\ \text{kg/m}}} = 19\ \text{m/s.}$$

Panjang gelombang dapat dihitung dengan $\lambda = v/\nu$, yaitu :

$$\lambda = \frac{19\ \text{m/s}}{120\ \text{getaran/detik}} = 0.16\ \text{m} = 16\ \text{cm}$$

(*b*) Bentuk persamaan umum untuk gelombang sinusoidal yang merambat ke arah x positif adalah : $y = y_m \sin(kx - \omega t - \phi)$.

Karena pada saat t = 0, y = 0 di x = 0, maka

$$0 = y_m \sin(-\phi),$$

yang berarti konstanta fase ϕ bernilai nol. Dari jawaban (*a*) diketahui bahwa y_m = 0.25 cm, λ = 16 cm, dan v = 19 m/detik = 1900 cm/detik. Dengan demikian,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{16\,\text{cm}} = 0.39\,\text{cm}^{-1}$$

$$\omega = 2\pi f = vk = 1900\ \text{cm/detik}\ .\ 0.39\ \text{cm}^{-1} = 740\ \text{detik}^{-1} = 740\ \text{Hz.}$$

Substitusi nilai ϕ, k, dan ω ke dalam persamaan umum untuk gelombang sinusoidal, akan menghasilkan persamaan gelombang sebagai berikut :

$$y = 0.25 \sin (0.39\ x – 740\ t)$$

dalam satuan mks.

Contoh :

Ketika gelombang pada contoh di atas merambat melalui tali, setiap partikel pada tali bergerak naik turun, tegak lurus terhadap arah rambatan gelombang. Hitung kecepatan dan percepatan partikel tali yang berada 62 cm dari pangkal getar.

Jawab :

Bentuk umum persamaan gelombang adalah :

$$y = y_m \sin (kx - \omega t) = y_m \sin k(x – vt)$$

Variabel v dalam persamaan tersebut menunjukkan besaran kecepatan gelombang tersebut pada arah horisontal, yaitu cepat rambat gelombang. Kecepatan yang diminta dalam soal ini adalah kecepatan gerakan partikel tali pada saat dilewati gelombang, tapi kecepatan gerak naik turun partikel pada saat dilalui gelombang. Dengan demikian, berarti kecepatan ini berarah vertikal (arah y) dan tidak bersifat konstan. Di sini, kecepatan gerak partikel ini di sini akan ditunjukkan dengan variabel u. Kecepatan u menunjukkan besarnya perubahan posisi partikel pada arah y untuk setiap satu satuan waktu, atau $u = \Delta y/\Delta t$. Untuk mencari kecepatan sesaat, peranan Δ dapat diganti dengan diferensial, sehingga

$$u = dy/dt = - y_m\, \omega \cos (kx - \omega t)$$

Karena persamaan ini digunakan untuk mencari kecepatan suatu partikel pada tali di posisi x, maka x dianggap sebagai besaran konstan. Satu-satunya variabel dalam persamaan tersebut adalah t.

Percepatan *a* partikel pada posisi x (konstan) ini adalah

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = \frac{\partial u}{\partial t} = -y_m \omega^2 \sin(kx - \omega t) = -\omega^2 y$$

Untuk $y_m = 0.25$ cm, $k = 0.39$ cm^{-1}, $\omega = 740$ detik^{-1}, dan posisi $x = 62$ cm :

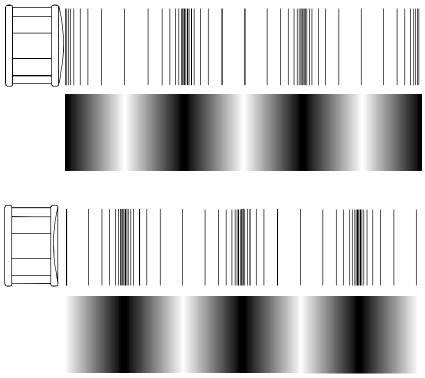
$u = - y_m\ \omega \cos(kx - \omega t) = -0.25 \cdot 740 \cdot \cos(0.39 \cdot 62 - 740 \cdot t) = - 185 \cos(24 - 740\ t)$

dan

$a = -\omega^2 y = - (740)^2\ 0.25 \cdot \sin(0.39 \cdot 62 - 740\ t) = -13.7 \cdot 10^4 \cdot \sin(24 - 740\ t)$

dimana t memiliki satuan detik, u dalam cm/det, dan *a* dalam cm/det^2.

2.3 Perambatan dan Cepat Rambat Gelombang Longitudinal



Gambar 2.4
Gelombang longitudinal dibangkitkan oleh sebuah drum

Gelombang longitudinal menjalarkan energi melalui medium yang menimbulkan perubahan tekanan pada bagian medium yang dilaluinya. Oleh karena itu, dalam perhitungan, pergerakan gelombang selain dinyatakan dengan simpangan, juga bisa dinyatakan dengan tekanan.

Cepat rambat gelombang longitudinal dirumuskan sebagai berikut :

- Dalam Fluida : $v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$ — $B = -V\Delta p/\Delta V$ = modulus Bulk (2.7a)
  ρ_0 = kerapatan normal fluida
- Dalam Gas : $v = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$ — P_0 = tekanan gas (2.7b)
  ρ_0 = kerapatan normal gas
  $\gamma = C_p/C_v$ = rasio kapasitas panas
- Dalam Zat Padat : $v = \sqrt{\frac{Y}{\rho_0}}$ — Y = modulus Young (2.7b)
  ρ_0 = kerapatan normal gas

Tabel 2.1 Cepat rambat bunyi pada beberapa medium.

Medium	**Suhu (°C)**	**Kecepatan (m/s)**
Udara	0	331.3
Hidrogen	0	1286
Oksigen	0	317.2
Air	15	1450
Timah	20	1230
Alumunium	20	5100
Tembaga	20	3560
Besi	20	5130

Sumber : Halliday, Resnick, "Physics", John Wiley & Sons, Canada, 1978.

2.4 Daya dan Intensitas Gelombang

Gelombang memindahkan (mentransmisi) energi dari satu tempat ke tempat yang lain. Ketika gelombang merambat melalui suatu medium, energi ditransmisi dalam bentuk energi vibrasi (getaran) dari satu partikel ke partikel yang lain di dalam medium. Karena setiap partikel yang dilalui gelombang melakukan getaran harmonis sederhana, maka setiap partikel akan memiliki energi sebesar $E = \frac{1}{2} k y_m^2$, dimana y_m adalah amplitudo getaran, yang berlaku pada gelombang transversal maupun longitudinal. Karena $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, maka k dapat ditulis dalam bentuk frekwensi :

$$k = 4\pi^2\, m / T^2 = 4\pi^2\, m\, f^2$$

sehingga

$$E = 2\pi^2\, m\, f^2\, y_m^2 \qquad (2.8)$$

Massa m dapat diuraikan menjadi m = ρV, dimana ρ dan V berturut-turut adalah kerapatan dan volume medium. Selanjutnya V = A*l*, dengan A adalah luas penampang permukaan yang dilewati gelombang, dan kita dapat menyatakan *l* sebagai jarak yang ditempuh gelombang dalam waktu t, yaitu *l* = v.t, dimana v adalah cepat rambat gelombang. Dengan demikian, m = ρA*l* = ρAvt dan

$$E = 2\pi^2 \rho A v t\, f^2\, y_m^2 \qquad (2.9)$$

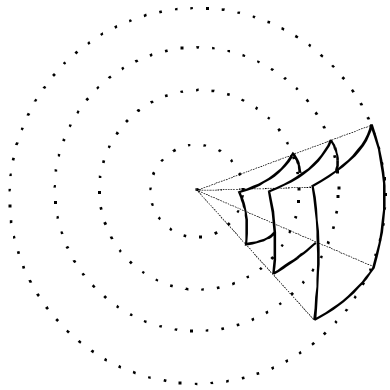
Dari persamaan ini, kita mendapatkan kesimpulan yang penting, yaitu *energi yang dipindahkan oleh gelombang berbanding lurus dengan kwadrat amplitudo*. Laju perpindahan energi, disebut *daya*, memiliki persamaan sebagai berikut :

$$P = \frac{E}{t} = 2\pi^2 \rho A v f^2 y_m^2 \qquad (2.10)$$

Akhirnya, *intensitas* gelombang I, yang didefinisikan sebagai besarnya daya yang dipindahkan pada setiap satu satuan luas, I = P/A, dapat dihitung :

$$I = \frac{E}{At} = 2\pi^2 \rho v f^2 y_m^2 \tag{2.11}$$

Jika gelombang berasal dari suatu sumber titik, maka gelombang bersifat 3 dimensi, yang merambat ke segala arah. Contoh untuk hal ini adalah suara yang merambat di udara terbuka, gelombang gempa bumi, dan gelombang cahaya. Jika medium bersifat isotropis (bersifat sama pada segala arah), akan terbentuk *gelombang sferis*. Semakin jauh gelombang merambat keluar menjauhi sumber, semakin luas penampang muka gelombang yang terjadi, karena luas permukaan bola bernilai $4\pi r^2$.



Gambar 2.5
Semakin jauh dari sumber, energi gelombang harus didistribusi pada permukaan yang semakin luas.

Karena energi bersifat kekal, maka pertambahan luas penampang A akan menyebabkan mengecilnya nilai amplitudo y_m (lihat persamaan 2.9 dan 2.10). Dengan demikian untuk dua tempat yang berbeda jarak terhadap titik sumber, berlaku hubungan :

$$A_1 y_{m1}^2 = A_2 y_{m2}^2$$

dimana y_{m1} dan y_{m2} masing-masing adalah amplitudo gelombang di posisi pertama dan posisi ke dua. Karena $A_1 = 4\pi r_1^2$ dan $A_2 = 4\pi r_2^2$, kita dapatkan

$$y_{m1}^2 r_1^2 = y_{m2}^2 r_2^2 \qquad \text{atau} \qquad y_{m1} r_1 = y_{m2} r_2$$

Berarti amplitudo dan jarak memiliki hubungan berbanding terbalik. Jadi, jika jarak dijadikan dua kali lipat maka amplitudo akan menjadi setengah bagian.

Intensitas juga berkurang terhadap pembesaran jarak. Karena I sebanding dengan y_m^2, maka *intensitas berbanding terbalik terhadap kwadrat jarak*. Kondisi ini berlaku untuk gelombang bunyi, cahaya, dan jenis-jenis gelombang lain. Dengan menggunakan persamaan 2.9, hal ini juga bisa dibuktikan, dimana $I_1 = E/A_1t = P/4\pi r_1^2$ dan $I_2 = P/4\pi r_2^2$. Jika daya bernilai konstan, maka

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \tag{2.12}$$

Contoh :

Jika intensitas P dari suatu gempa bumi tercatat sebesar 1.0 x 10^6 W/m^2 pada suatu tempat berjarak 100 km dari pusat gempa, berapakah intensitas gempa tersebut di suatu tempat yang berjarak 400 km dari pusat gempa ?

Jawab :

Jarak 400 km adalah 4 kali dari jarak 100 km, sehingga amplitudo akan berkurang menjadi $(1/4)^2$ kali, yaitu : 1/16 x 1.0 x 10^6 W/m^2 = 6.2 x 10^4 W/m^2.

Cara yang lain untuk menghitung intensitas ini adalah dengan menggunakan persamaan (2.10) :

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

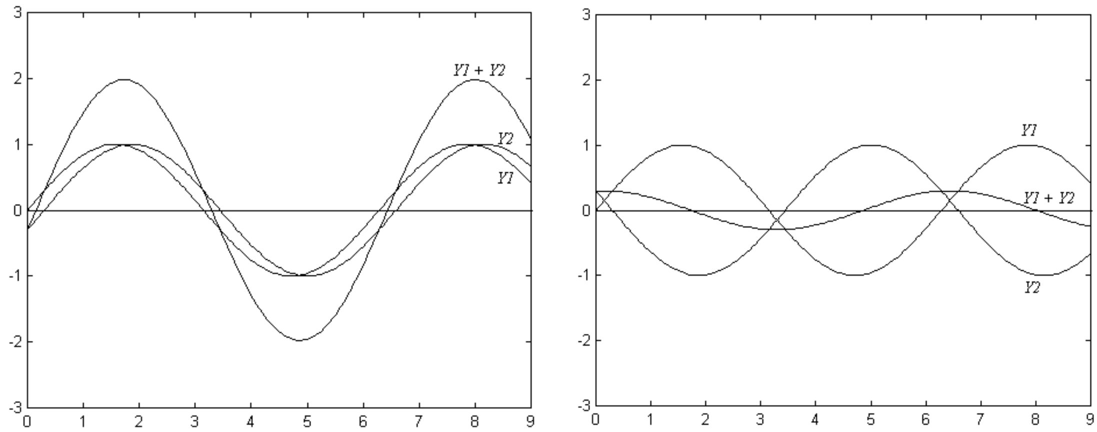
$$I_2 = \frac{r_1^2}{r_2^2} I_1 = \frac{100^2}{400^2} 1.0 \times 10^6 \, W/m^2 = 6.2 \times 10^4 \, W/m^2$$

Keadaan untuk gelombang 1-dimensi akan berbeda dari apa yang telah diterangkan di atas, misalnya pada gelombang transversal yang merambat pada sebuah tali atau pulsa gelombang longitudinal yang merambat pada batang metal uniform. Di sini luas penampang A bernilai sama di setiap tempat, sehingga amplitudo tidak akan berubah terhadap perubahan jarak. Demikian juga halnya dengan intensitas.

Namun dalam kenyataannya, energi yang merambat dalam arah 1-dimensi juga bisa berkurang akibat adanya peredaman energi, sehingga amplitudo dan intensitas gelombang 1-dimensi akan berkurang dengan semakin bertambahnya jarak. Jika peredaman terjadi pada gelombang 3-dimensi, maka pengurangan amplitudo dan intensitas akan lebih besar lagi dari apa yang telah dibahas di atas, walaupun efeknya seringkali terlalu kecil untuk bisa diamati.

2.5 Interferensi

Interferensi adalah efek fisis yang terjadi jika dua (atau lebih) gelombang merambat melalui daerah yang sama pada suatu medium dalam waktu yang bersamaan.



(a) *(b)*

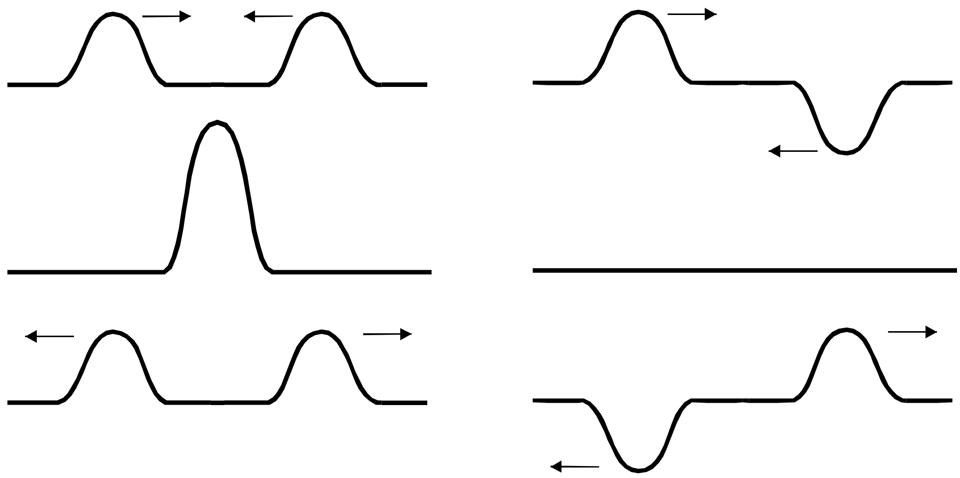
Gambar 2.6
Superposisi dua gelombang berfrekwensi dan beramplitudo sama, dengan fase yang hampir sama, akan menghasilkan interferensi konstruktif (bagian a).
Superposisi dua gelombang berfrekwensi dan beramplitudo sama, dengan fase yang hampir selalu berlawanan, akan menghasilkan interferensi destruktif (bagian b).

Gambar 2.6a di atas memperlihatkan superposisi dua gelombang yang hampir sefase, dimana kedua gelombang memiliki amplitudo dan frekwensi yang sama. Superposisi seperti ini akan menghasilkan efek fisis berupa terjadinya gelombang baru, dengan amplitudo yang lebih besar dari amplitudo masing-masing gelombang asalnya, sehingga dinamakan *interferensi konstruktif*.

Sementara itu, gambar 2.6b mempelihatkan superposisi dua gelombang beramplitudo dan berfrekwensi sama, namun hampir selalu berlawanan fase di setiap tempat. Superposisi seperti ini akan menghasilkan efek fisis berupa terjadinya gelombang baru dengan amplitudo yang lebih kecil dari amplitudo. Efek fisis seperti ini dinamakan *interferensi destruktif*.

Meskipun kedua superposisi pada gambar 2.6 di atas menghasilkan efek fisis berbeda (berupa interferensi konstruktif dan interferensi destruktif), namun kalau diperhatikan lebih jauh akan terlihat bahwa kedua superposisi tersebut memiliki *resultan frekwensi* yang sama. Hal ini disebabkan karena kedua superposisi itu dihasilkan oleh dua gelombang yang sama, tapi berbeda fase.

Sifat lain yang juga perlu diperhatikan adalah bahwa interferensi hanyalah efek fisis yang terlihat atau teramati ketika dua atau lebih gelombang saling bersuperposisi. Efek fisis ini tidak akan mengubah karakteristik masing-masing gelombang asalnya (selama hukum Hooke masih berlaku). Berarti, meskipun superposisi menimbulkan efek fisis berupa gelombang yang baru, namun pada sebenarnya gelombang asalnya masih tetap seperti semula (lihat kembali contoh 1 di atas). Gambar 2.7 berikut memperlihatkan bagaiamana dua pulsa saling bersuperposisi dan kembali ke bentuk semula setelah proses superposisi berakhir.

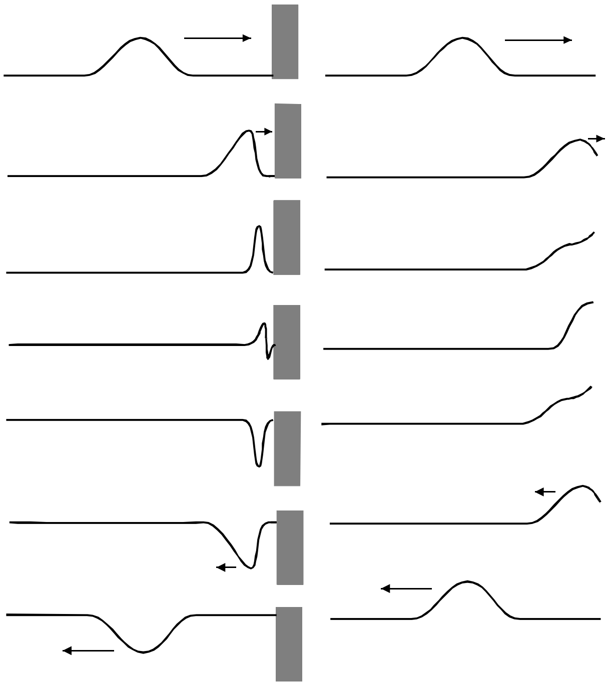


(a) *(b)*

Gambar 2.7
Interferensi (a) konstruktif dan (b) destruktif yang terjadi hanya pada saat kedua pulsa saling tumpang tindih.

2.6 Refleksi (Pemantulan)

Jika sebuah gelombang mencapai suatu rintangan, atau sampai pada ujung medium yang dirambatinya, maka paling tidak ada sebagian kecil dari gelombang yang dipantulkan. Anda mungkin pernah melihat gelombang permukaan air yang memantul pada dinding kolam. Dan anda mungkin juga pernah mendengar suara yang dipantulkan dinding bukit – yang kita namakan "echo".



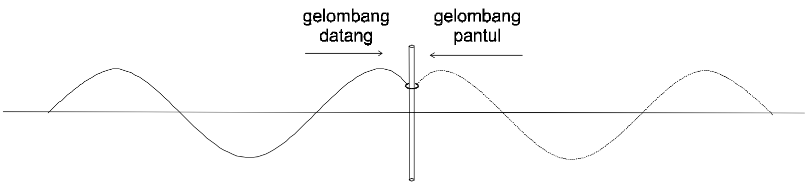
(*a*) (*b*)

Gambar 2.7
Pemantulan pulsa gelombang pada (a) tali berujung tetap,
dan (b) tali berujung bebas.

Bentuk dan sifat gelombang pantul sangat tergantung pada kondisi ujung medium. Pada tali, kondisi ekstrim pada ujungnya dapat dibedakan atas kondisi bebas (tidak terikat pada satu titik) dan kondisi tetap (terikat pada satu titik).

a) Ujung bebas.

Jika gelombang memantul pada ujung bebas suatu medium (misalkan tali) maka gelombang pantul dapat diandaikan sebagai pencerminan horizontal gelombang datang terhadap suatu garis tegak pada ujung medium.



Gambar 2.8
Pemantulan gelombang tali pada ujung bebas

Jika y_d dan y_p masing-masing menunjukkan simpangan pada gelombang datang dan gelombang pantul, maka $y_d = y_m \sin(kx - \omega t)$ dan $y_p = y_m \sin(kx + \omega t)$.

Hasil superposisi gelombang datang dan gelombang pantul adalah :

Gelombang datang : $y_d = y_m \sin(kx - \omega t)$

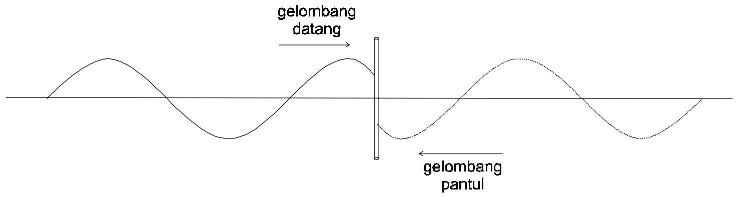
Gelombang pantul : $y_p = y_m \sin(kx + \omega t)$.

Superposisi : $y = y_d + y_p = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t)$

$$y = 2\, y_m \sin kx \cos \omega t \qquad (2.13)$$

b) Ujung tetap

Pada kondisi ini, gelombang pantul harus sedemikian rupa sehingga menghasilkan simpangan superposisi dengan gelombang datang sebesar nol pada ujung medium.



Gambar 2.9
Pemantulan gelombang tali pada ujung tetap

Dalam keadaan demikian, gelombang pantul seolah-olah datang sebagai hasil pencerminan gelombang datang terhadap titik pantul. Jadi dapat dikatakan bahwa gelombang pantul mengalami pembalikan fasa sebesar 180°. Hasil superposisi gelombang datang dan gelombang pantul adalah :

Gelombang datang : $y_d = y_m \sin(kx - \omega t)$

Gelombang pantul : $y_p = y_m \sin(kx + \omega t + 180°)$.

Superposisi : $y = y_d + y_p = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t + 180°)$

$$y = 2\, y_m \cos kx \sin \omega t \qquad (2.14)$$

Dari uraian di atas terlihat bahwa pantulan gelombang pada ujung tetap maupun ujung bebas akan menghasilkan gelombang baru hasil superposisi berupa gelombang tegak.

Gelombang tegak

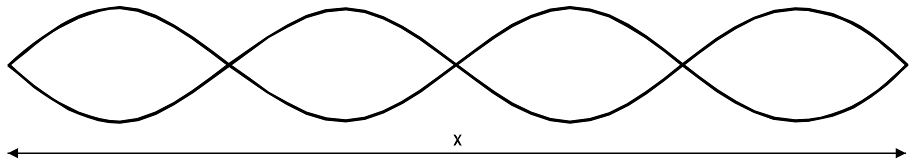
Gelombang tegak terjadi jika medium dirambati dua gelombang identik yang saling berlawanan arah.

Gelombang 1 : $Y_1 = A \sin(kx - \omega t)$

Gelombang 2 : $Y_2 = A \sin(kx + \omega t)$

Hasil superposisi : $Y = Y_1 + Y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t)$

$$Y = 2 A \sin kx \cos \omega t$$



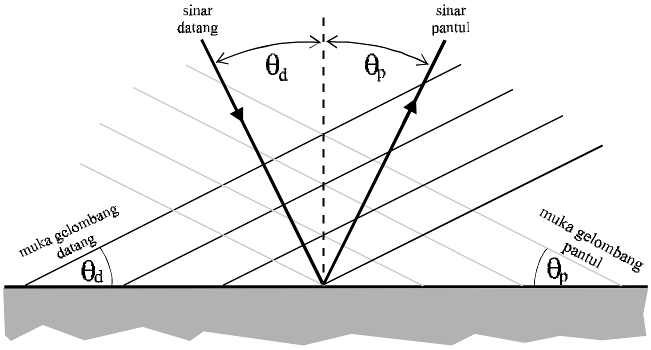
Gambar 2.10
Gelombang tegak

Hasil superposisi tersebut, Y = 2 A sin kx cos ωt, dapat diinterpretasikan sebagai berikut :

- Setiap titik pada medium akan melakukan getaran, dimana simpangannya sebanding dengan cos ωt.
- Besarnya amplitudo getaran setiap titik adalah 2 A sin kx, yang nilai maksimumnya tergantung pada posisi x.
- Pada hasil superposisi tidak terlihat adanya pergeseran posisi perut dan simpul, sehingga disebut sebagai **gelombang tegak**, karena pereut dan simpulnya terlihat diam di tempat.

Gambar 2.7 memperlihatkan dua pulsa gelombang yang masing-masing merambat pada tali berujung tetap (terikat) dan berujung bebas. Pada tali yang berujung tetap (gambar *a*) terlihat bahwa gelombang pantul terinversi (mengalami pembalikan fase sebesar 180^o) terhadap gelombang datangnya, sementara gelombang pantul pada tali berujung bebas (gambar *b*) *memiliki* arah getar yang sama dengan gelombang datangnya.

Untuk gelombang dua dimensi (misalnya, gelombang permukaan air) atau bahkan gelombang tiga dimensi, pengamatan pemantulan gelombang dilakukan terhadap **muka gelombang**. Arah perambatan muka gelombang ditunjukkan oleh sebuah garis yang tegak lurus terhadap muka gelombang, yang dinamakan *berkas sinar*.



Gambar 2.11
Hukum pemantulan

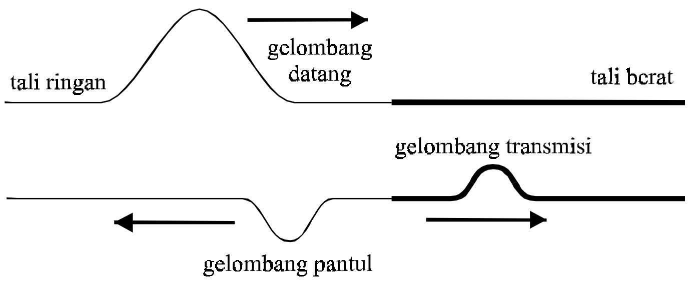
Pada gambar 2.10 terlihat ilustrasi hukum pemantulan, yang ditemukan oleh *Euclid*. Ketentuan yang berlaku pada peristiwa pemantulan (refleksi) adalah sebagai berikut :

- *Sinar datang, garis normal, dan sinar pantul terletak pada satu bidang datar.*
- *Sinar pantul merambat ke dalam medium yang sama dengan yang dirambati sinar datang.*
- *Sudut pantul sama dengan sudut pantul (θ_d = θ_p). Hal ini bersesuaian dengan* ***prinsip Fermat****, yang mengatakan bahwa berkas sinar senantiasa merambat pada lintasan terpendek.*

Disamping itu perlu juga diingat, terutama untuk cahaya, bahwa :

a. Jika gelombang memantul pada materi yang *lebih renggang*, maka cahaya pantulnya akan berfasa sama dengan cahaya datang (ingat pemantulan ujung bebas !).
b. Jika gelombang memantul pada materi yang *lebih rapat*, maka cahaya pantulnya akan berlawanan fasa dengan cahaya datang (ingat pemantulan ujung tetap !).

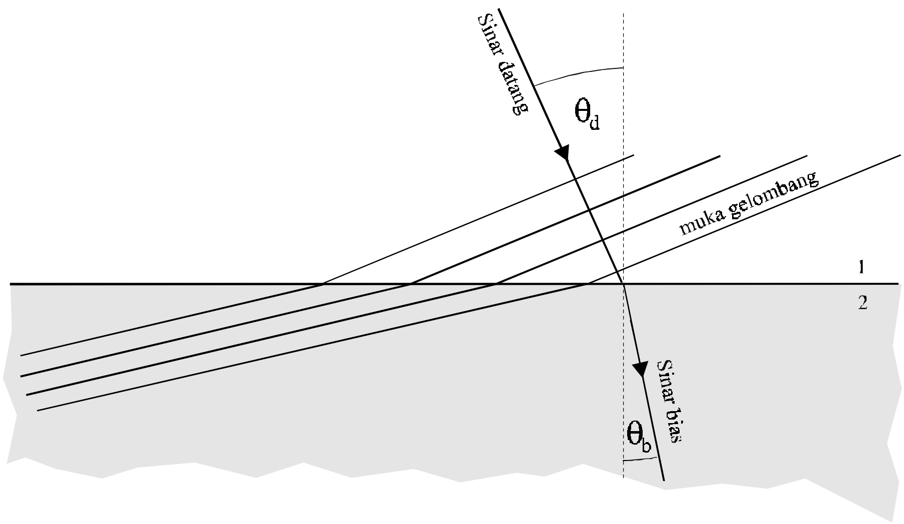
Gelombang yang merambat pada tali menuju suatu titik, yang merupakan sambungan dengan tali yang lain, dapat mengalami peristiwa pemantulan sebagian yang diikuti dengan transmisi sebagian. Agar lebih jelas, hal ini diilustrasikan pada gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.12
Jika gelombang mencapai titik diskontinu, maka sebagian darinya akan dipantulkan dan sebagian lagi akan ditransmisi.

2.7 Refraksi (Pembiasan)

Jika gelombang mencapai perbatasan dua medium, sebagian energi akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan (ditransmisi) atau diabsorpsi (diserap).



Gambar 2.13
Pembelokan sinar yang terbias karena merambat melintasi batas dua medium yang berbeda.

Jika gelombang dua atau tiga dimensi merambat dari satu medium ke medium yang lain, dimana kedua medium memiliki kerapatan yang berbeda, maka gelombang akan mengalami perubahan cepat rambat. Berubahnya cepat rambat gelombang karena melintasi medium yang berbeda dinamakan peristiwa *pembiasan (refraksi)*. Pembiasan dapat menimbulkan perubahan pada arah rambat gelombang dua atau tiga dimensi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12.

Hukum pembiasan ditemukan secara eksperimental oleh Willebrod Snell (1591 - 1626), yang merupakan penjabaran teori dari korpuskuler René Descartes – cahaya terdiri atas partikel-partikel. Oleh sebab itu hukum pembiasan disebut juga hukum Snell (Snellius) dan di Perancis dikenal sebagai hukum Descartes.

Hukum Snellius mengenai pembiasan (refraksi) adalah sbb :

- *Sinar datang, garis normal, dan sinar bias terletak pada satu bidang datar.*
- *Antara sudut pantul dan sudut bias, berlaku hubungan sbb :*

$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_b \qquad (2.15)$$

dimana n_1 adalah indeks bias medium pertama yang dilalui gelombang, dan n_2 adalah medium ke dua yang dilewati gelombang.

Indeks Bias

Indeks bias medium A (n_A) adalah sebuah bilangan yang menunjukkan perbandingan antara cepat rambat cahaya di ruang hampa dengan cepat rambat cahaya di dalam medium A.

$$n_A = c / v_A \qquad (2.16)$$

n_A : indeks bias medium A c : cepat rambat cahaya di hampa

v_A : cepat rambat cahaya di dalam medium

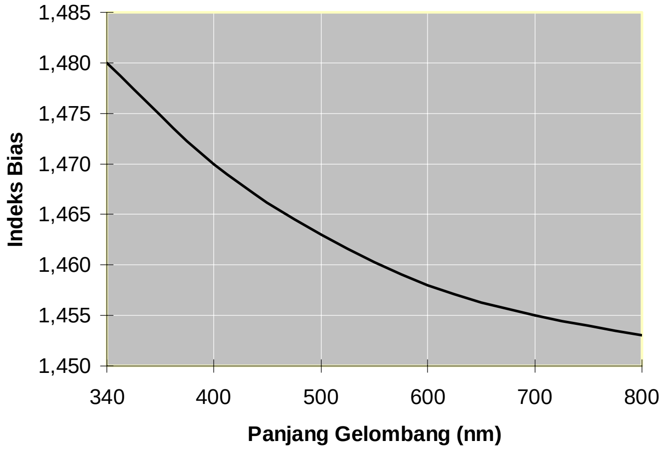
Karena cahaya merupakan gelombang elektromagnetik, maka cepat rambatnya akan semakin kecil jika medium yang dilaluinya semakin rapat. Pada persamaan di atas terlihat, bahwa *semakin rapat medium yang dilalui cahaya, maka indeks bias medium tersebut juga semakin besar* (karena cepat rambatnya semakin kecil). Sebaliknya, *semakin renggang medium yang dilalui cahaya, maka indeks biasnya menjadi semakin kecil*. Indeks bias terkecil yang mungkin terjadi adalah 1, yaitu jika cahaya merambat di dalam ruang hampa.

Tabel berikut ini menunjukkan indeks bias dari beberapa medium yang dibandingkan terhadap vakum dengan panjang gelombang 589 nm (= 5890 Å)

Medium	**Indeks Bias**
Air	1,33
Ethyl alcohol	1,36
Carbon bisulfide	1,63
Udara (1 atm, 20°C)	1,0003
Quartz	1,46
Kaca (crown)	1,66
Sodium chloride	1,53

Suatu medium yang indeks biasnya tidak bergantung pada panjang gelombang disebut medium *non-dispersif*. Sebaliknya, medium yang indeks biasnya tergantung pada panjang gelombang cahaya yang melewatinya dinamakan medium *dispersif*. Sifat *dispersif* ini dapat dimanfaatkan untuk menganalisa berkas sinar, dengan menguraikannya atas komponen-komponen warnanya (panjang gelombang). Peristiwa penguraian warna sebagai akibat perbedaan indeks bias medium disebut *dispersi*.

Grafik berikut ini menunjukkan nilai indeks bias kristal kuarsa (quartz) terhadap panjang gelombang.

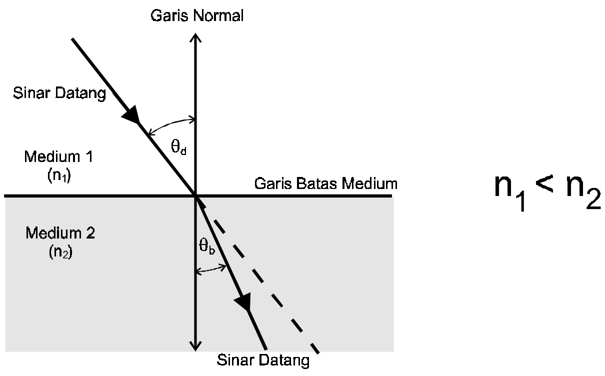


Indeks Bias Relatif medium 1 terhadap medium 2 dinyatakan dengan

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \qquad (2.17)$$

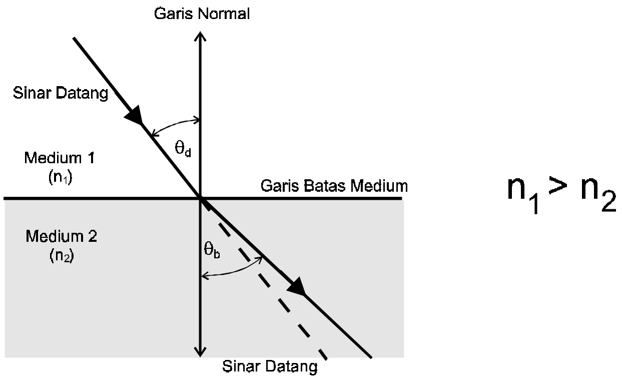
Dari persamaan 2.15 dalam hukum Snellius di atas, dapat disimpulkan bahwa jika sinar datang membentuk sudut θ_d yang tidak nol terhadap garis normal, maka sinar bias akan mengalami pembelokan sbb. :

a. Sinar akan dibelokkan mendekati garis normal jika $n_1 < n_2$



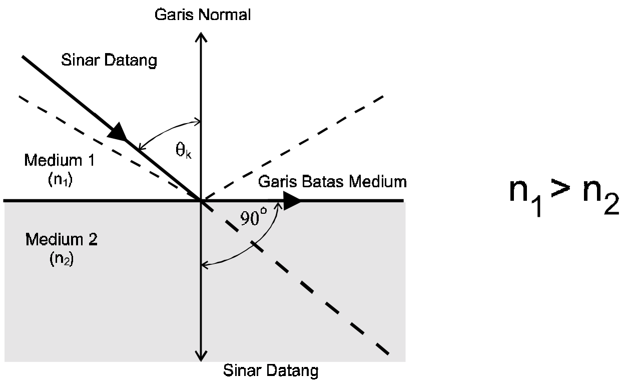
Gambar 2.14
Sinar yang merambat dari medium renggang ke rapat akan dibelokkan mendekati garis normal

b. Sinar akan dibelokkan menjauhi garis normal jika $n_1 > n_2$



Gambar 2.15
Sinar yang merambat dari medium rapat ke renggang akan dibelokkan menjauhi garis normal

Jika sinar dibelokkan menjauhi garis normal, terdapat kemungkinan terjadinya peristiwa **pemantulan sempurna**. Pemantulan sempurna terjadi jika sudut datang bernilai lebih besar dari **sudut kritis** θ_k (sudut yang menghasilkan sinar bias sejajar garis batas).



Gambar 2.16
Jika sudut datang lebih besar dari sudut kritis, sinar akan mengalami peristiwa pemantulan sempurna.

Sudut kritis medium pertama (berindeks bias n_1) dapat dicari dengan rumus Snellius :

$$n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin 90^\circ$$

atau

$$\sin \theta_k = n_2 / n_1 \qquad (2.18)$$

SOAL-SOAL

1. Sebuah tali yang sangat panjang dirambati dua gelombang :

   $$y_1 = 0.25 \sin (0.015x - 2t) \text{ dan } y_2 = 0.5 \sin (0.025x - 3t)$$

   yang seluruhnya menggunakan satuan cgs.

(*a*) Hitung panjang gelombang dan frekwensi masing-masing gelombang. (*b*) Hitung cepat rambat masing masing gelombang. (*c*) Hitung simpangan tali di suatu titik berjarak 30 cm dari sumber getar pada t = 1.2 detik.

2. Sebuah senar sepanjang 50 cm terikat pada kedua ujungnya dengan tegangan sebesar 30 N. Jika senar tersebut bermassa 20 gram, hitung cepat rambat gelombang pada senar tersebut.

3. Dua buah balok memiliki modulus bulk yang sama, namun balok yang satu memiliki kerapatan massa dua kali lipat dari balok yang lain. Pada balok yang manakah gelombang longitudinal dapat merambat lebih cepat ?

4. Suatu gelombang yang merambat pada sebuah senar mengalami pemantulan sehingga pada senar terjadi gelombang tegak, yang memiliki persamaan :

$$y = 0.5 \sin \frac{\pi x}{3} \cos 40\pi t \qquad \text{(cgs)}$$

   (*a*) Berapakah nilai amplitudo komponen-komponen gelombang pembentuk gelombang tegak tersebut ? (*b*) Hitunglah jarak antara dua simpul yang berdekatan. (*c*) Hitung kecepatan getar partikel senar di posisi x = 1.5 cm pada saat t = 9/8 detik.

5. Sebuah gelombang transversal merambat pada tali dengan persamaan :

$$y = 10 \cos (0.0079x - 13t - 0.89)$$

   Tentukan suatu persamaan gelombang yang lain, yang jika disuperposisikan dengan gelombang di atas akan menghasilkan gelombang tegak. Buktikan dengan menggunakan salah satu program aplikasi komputer, misalnya *Matlab*.

6. Sebuah sumber titik berdaya 1.0 Watt memancarkan gelombang sferis pada medium isotropik non-absorbsi. Berapa intensitas gelombang di suatu tempat berjarak 1.0 m dari sumber ?

7. (*a*) Tunjukkan bahwa intensitas I (jumlah energi yang mencapai satu satuan luas dalam satu satuan waktu) merupakan hasil kali antara energi per satuan volume u dan cepat rambat gelombang v. (*b*) Gelombang radio merambat dengan kecepatan 3.0

$\times$ 10^8 m/detik. Hitung kerapatan energi di suatu tempat berjarak 480 km dari sumber berdaya 50,000 Watt. Asumsikan bahwa muka gelombang berbentuk sferis dan medium bersifat isotropik.

8. Sebuah sumber gelombang berbentuk garis sepanjang 15 cm memancarkan gelombang dengan daya 10 Watt, sehingga terbentuk muka gelombang silindris. Hitung intensitas gelombang di suatu tempat berjarak 2m dan 6 m dari pusat silinder

9. Seberkas sinar melintas di udara mendekati perbatasan dengan medium kaca (n = 1,56) dengan membentuk sudut 30° terhadap garis normal. Hitung sudut bias sinar tersebut.

10. Cahaya dengan panjang gelombang di udara 6.000 Å. Hitung panjang gelombangnya di air (n = 4/3).

11. Seberkas cahaya di udara memiliki frekwensi 5 x 10^{14} Hz. Hitung frekwensi cahaya tersebut di dalam air (n = 4/3).

12. Seberkas sinar melewati perbatasan dua medium yang memiliki sudut kritis 50°. Jika berkas sinar melintasi medium pertama dengan sudut datang 30°, hitung sudut biasnya.

13. Cepat rambat cahaya dalam medium II besarnya 1,5 kali cepat rambatnya di medium I. Jika cepat rambat cahaya di medium III besarnya 0,8 kali cepat rambat cahaya di medium II, maka hitunglah perbandingan indeks bias medium I dan medium III.

14. Intensitas suatu gelombang gempa yang diukur pada suatu titik berjarak 100 km dari pusat gempa tercatat 1 X 10^6 J/m^2. Hitung energi total gelombang tersebut pada suatu permukaan seluas 5 m^2 yang berjarak 1 km dari pusat gempa.

15. Sudut kritis cahaya pada suatu materi diketahui 45°. Hitung indeks bias materi tersebut.