GELOMBANG MEKANIK

MILIK UPT PERPUSTAKAAN IKIP PADANG
DITERIMA TGL 4-12-1993
SUMBER/HARGA HD
KOLEKSI EKI
NO. INVENTARIS 031/HD/93-80/2/
CALL NO 530.124 HAS g0

OLEH

Drs. AMRAN HASRA

JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
IKIP PADANG

1992

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, yang mana berkat rahmat dan karuniaNya jualah buku ini dapat diselesaikan seperti apa adanya.

Buku yang penulis beri judul "Gelombang Mekanik" ini ditulis guna memenuhi kebutuhan buku-buku pelajaran di sekolah dan perguruan tinggi.

Dalam buku ini akan dibahas tentang perambatan gelombang dalam medium, gelombang tali, gelombang permukaan air, gelombang bunyi, Effek Dopler, daya dan intensitas gelombang.

Penulis merasa bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan dalam buku ini dan penulis mengharapkan untuk mendapat lebih banyak petunjuk dari pembaca demi penyempurnaan buku ini.

Akhirnya penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak berjasa dalam mempersiapkan buku ini.

Padang, Juni 1992

Penulis

DAFTAR ISI

		hal
KATA PENGANTAR		ii
DAFTAR ISI		iii
BAB 1	PENDAHULUAN	1
BAB 2	GELOMBANG PADA TALI	4
	2.1 Penjalaran Gelombang	4
	2.2 Gelombang Periodik	6
	2.3 Kecepatan Gelombang	11
	2.4 Prinsip Superposisi Gelombang	13
	2.5 Gelombang Berdiri	21
	2.6 Pantulan dan Transmisi Pada Sambungan Tali	27
BAB 3	GELOMBANG PERMUKAAN AIR	31
	3.1 Fungsi Gelombang Permukaan Air	34
	3.2 Gerak Medium Pada Gelombang Air	38
	3.3 Pemantulan dan Pembiasan Pada Gelombang Air	40
BAB 4	GELOMBANG BUNYI	47
	4.1 Kecepatan Rambat Bunyi	48
	4.2 Gelombang Bunyi Sebagai Variasi Simpangan dan Tekanan	53
	4.3 Pantulan Dan Transmisi Bunyi pada Bidang Batas Antara Medium	54
	4.4 Superposisi Gelombang Bunyi	55
	4.5 Resonasi Gelombang Bunyi	60
	4.6 Effek Dopler	63

BAB 5 DAYA DAN INTENSITAS PADA GERRAK GELOMBANG .. 68

5.1. Arus Energi 68

5.2. Daya dan Intensitas Bunyi 71

5.3. Inpdansi Gelombang 74

DAFTAR PUSTAKA 77

BAB 1
PENDAHULUAN

Sebuah batu yang jatuh pada permukaan air menyebabkan pola berbentuk lingkaran, yang disebut dengan gelombang permukaan air. Pola tersebut terus membesar, dan akhirnya akan hilang. Sepintas lalu tampaknya permukaan air bergerak dengan gelombang tersebut. Akan tetapi jika kita perhatikan lebih jelas, tampak air dipermukaan tidak bergerak bersama gelombang tersebut. Sehelai daun yang terapung di permukaan tidaklah terbawa oleh gelombang ini. Jika daun tersebut tertumbuk oleh satu lingkaran gelombang tersebut, daun ini akan bergerak satu kali keatas, kemudian kembali ke tempat semula. Daun tersebut tidaklah terbawa oleh permukaan gelombang tadi. Apakah yang terbawa oleh gelombang permukaan air diatas? Yang jelas terbawa oleh gelombang tersebut adalah *bentuk* permukaan air. Untuk jarak yang tidak terlalu besar, bentuk penampang gelombang ini tidaklah berubah. Bagian permukaan air yang terkena pola gelombang akan bergerak, berarti mendapat energi, atau juga momentum. Nyata gelombang permukaan air ini *menjalankan energi* dan *momentum* dari suatu sumber (tempat batu jatuh) ke seluruh permukaan air. Gelombang di atas adalah gelombang tunggal, yaitu hanya satu pola bentuk lingkaran yang membesar ke luar. Gelombang seperti ini disebut *gelombang denyut*. Jika sebatang tongkat kita gerakkan keluar masuk permukaan air secara periodik, maka akan terjadi rangkaian pola lingkaran. Sehelai daun yang tertumbuk oleh rangkaian pola ini akan bergerak turun

naik secara periodik pula. Gelombang yang menyebabkan medium bergerak atau berubah secara periodik seperti ini disebut *gelombang periodik.*

Peristiwa penjalaran energi dan momentum dengan gelombang tidak hanya terjadi di permukaan air. Marilah kita pandang contoh berikut, Misalkan kita mempunnyai beberapa bola bilyar yang kita pasang berderet lurus dan saling bersinggungan. Sebuahbola bilyar lain kita sodok segaris dengan deretan bola di atas dan menumbuk salah satu ujung deretan bola tersebut. Apa yang terjadi? Satu bola yang terletak diujung lain terpental keluar, sedang bola lainya tetap diam. Bagaiman bola terahkir menerima energi dan momentumnya? Energi dan momentum dari bola yang datang dijalarkan melalui deretan bola tanpa menyebabkan bola bergerak, dan akhirnya disampaikan kepada bola terakhir. Disini penjalaran energi dan momentum juga terjadi dengan gelombang. Satu contoh lagi. Sederetan kereta api menunggu keberangkatan. Jika lokomotif tiba-tiba bergerak kedepan, sentakan yang terjadi akan menjalar ke belakang. Gerbong demi gerbong akan tersentak, gerbong depan lebih dahulu, kemudian berturut-turut gerbong dibelakangnya. Nyata bahwa disini menjalar gelombang sentakan ke belakang meskipun kereta api bergerak ke depan. Apakah ciri khas penjalaran energi melalui gelombang? Misalkan suatu gelombang menjalar dari tempat A ke tempat B, maka dalam penjalaran energi ini tidak ada perpindahan energi benda dari A ke B. Kita juga dapat menjalarkan energi

dengan melemparkan sebuah batu, akan tetapi dalam peristiwa ini energi di bawa oleh batu. Dalam hal ini energi dibawa oleh benda atau partikal yang berpindah. Energi ini dibawa dalam bentuk energi kinetik. Salah satu bentuk gelombang yang mudah dibayangkan adalah *gelombang mekanik*. Gelombang seperti ini menyebabkan terjadinya *gerak* pada medium di mana gelombang menjalar. Beberapa contoh gelombang mekanik adalah gelombang bunyi, gelombang permukaan air dan gelombang pada tali. Gelombang radio dan cahaya adalah suatu contoh gelombang tak mekanik. Gelombang ini tidak memerlukan medium, dan perubahan yang diakibatkan oleh gelombang ini bukanlah perubahan mekanik. Kembali pada gelombang mekanik, nyata bahwa gelombang ini berasal dari suatu sumber dan menjalar di dalam suatu medium. Penjalaran energi di dalam medium tejadi karena suatu bagian medium mengganggu bagian medium disekitarnya. Jelaslah bahwa penjalaran gelombang didalam medium terjadi karena aadanya interaksi di dalam medium dan makin kuat interaksi didalam medium makin cepat penjalaran gelombang. Laju penjalaran gelombang juga bergantung pada inersia medium, yaitu berapa sukar medium digerakan. Makin besar enersia medium, makin pelan penjalaran gelombang.

BAB 2

GELOMBANG PADA TALI

2.1 PEJALARAN GELOMBANG

Gerakan gelombang muncul dihampir semua cabang fisika, baik yang tampak maupun tidak tampak. Gelombang berjalan yang tampak a.l gelombang air, gelombang pada tali, senar gitar dsb. Gelombang yang tidak tampak a.l gelombang bunyi, gelombang radio, gelombang radar dsb. Gerakan gelombang diakibatkan oleh gerakan bagian medium dari posisi normalnya yang menimbulkan gelombang osilasi disekitar posisi setimbang dan gerakan tersebut kemudian menjalar disekitarnya. Gelombang menjalar dengan arah dan kecepatan tertentu bergantung pada penyebabnya dan jenis medium. Medium sendiri mengalami gerakan isolasi, jadi tidak mengikuti gerakan penjalaran gelombang.

Dibedakan dua jenis gerakan gelombang yang didasarkan atas arah gerak osilasi terhadap arah penjalaran gelombang. Bila arahnya tegak lurus terhadap arah penjalaran, disebut disebut *gelombang tranversal*, apabila arah sejajar dengan arah penjalaran disebut *gelombang longitudinal*.

Contoh gelombang tranversal adalah gelombang air, gelombang tali, gendang dsb. Pada tali, senar dsb, bagian atau unsur tali mengalami gerakan naik turun atau mendekat dan menjauh terhadap titik setimbang secara berulang. Contoh gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi di udara, gerakan memanjang pada per dsb. Medium udara yang sedang

menghantarkan bunyi mengalami gerakan maju dan mundur disekitar posisi normal oleh adanya gerakan getar dari suatu sumber bunyi. Arah maju dan mundur tersebut searah dengan arah gerakan gelombang bunyi dan mengakibatkan perubahan tekanan udara menguat dan melemah sepanjang gerakan pelajaran bunyi. Besar simpangan baik gelombang tranversal maupun longitudinal bergantung pada kekuatan atau energi gelombang.

Ditinjau gerakan gelombang sederhana pada tali yang kedua ujungnya diklem. Apabila pada salah satu ujungnya di kenakan suatu pukulan sesaat, pada tempat yang terkena pukulan akan mengalami simpangan balik dengan arah berlawanan karena adanya daya tegangan elastis pada tali. Gerakan simpangan tersebut akan menjalar kesepanjang tali.

Bila arah x adalah sepanjang tali dan simpangannya adalah y, maka besar simpangannya pada waktu terkena pukulan sebagai fungsi x dapat dituliskan,

$$y = f(x) \tag{2.1}$$

Saat terkena pukulan tsb adalah sebagai saat awal ($t = 0$) timbulnya gelombang. Simpangan akan menjalar sepanjang tali sebagai gelombang dengan kecepatan tertentu v. Perubahan simpangan sebagai fungsi posisi x dan waktu t dapat dituliskan.

$$y = f(x - vt). \tag{2.2}$$

Ini merupakan gelombang yang bergerak ke kanan, karena untuk suatu harga y tertentu atau (x - vt) tertentu, sewaktu t maju, akan diikuti oleh penambahan harga x agar (x - vt) tetap. Jadi arah gerak adalah ke kanan. Untuk gelombang yang menjalar kekiri, dapat dituliskan,

$$y = f(x + vt). \tag{2.3}$$

Bila t nya maju, untuk harga y tertentu, harga x akan berkurang, jadi gelombang bergerak kekiri.

Perubahan simpangan osilasi y ada yang bersifat periodik, maka gelombang akan mempuyai frekuensi gelombang, panjang gelombang dan periode gelombang yang bersifat tetap, sedangkan gelombang yang tidak periodik harganya berubah.

2.2 GELOMBANG PERIODIK

Suatu gelombang periodik yang mempunyai sifat-sifat gelombang yang tetap untuk setiap jarak lintas gelombang tetap (interval), secara umum dapat dituliskan dalam bentuk fungsi periodik sinus atau cosinus atau gabungan sinus dan cosinus. Gelombang periodik yang paling sederhana adalah hanya mempunyai 1 panjang gelombang λ, dan frekuensi f yang tetap. Gelombang berjalan sederhana, bila dinyatakan sebagai fungsi sinus, dapat dituliskan,

$$y = A \sin \{k(x - vt)\}. \tag{2.4}$$

k adalah tetap, dimana harga kx adalah besar sudut.

y diatas merupakan gelombang yang menjalar kekanan dimana A

adalah amplitudo atau simpangan maksimum. Untuk harga t tertentu atau pada saat t = o, merupakan gelombang yang hanya fungsi x saja,

$$y = A \sin (kx) \qquad (2.5)$$

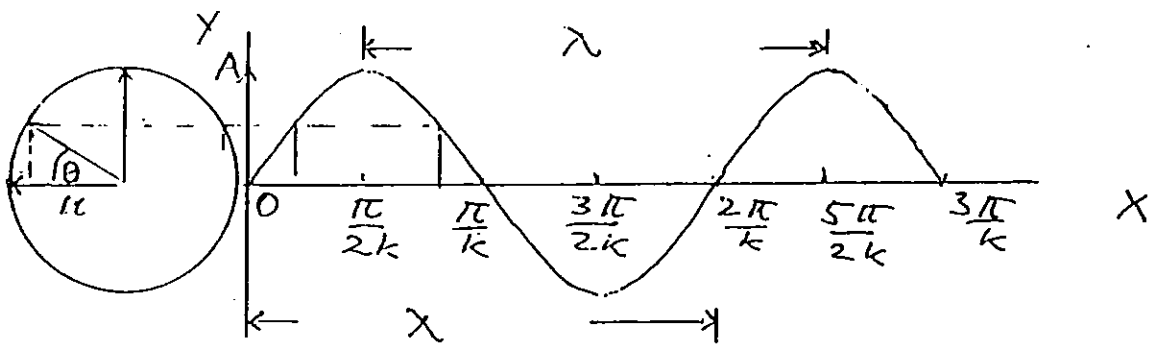
y akan berharga maksimum = A untuk :

$$kx = \pi/2,\ 3\pi/2,\ 5\pi/2\ \ldots\ldots\ldots$$

dan berharga o. pada :

$$kx = 0,\ \pi,\ 2\pi\ \ldots\ldots$$

Bentuk gelombang dapat dilukiskan seperti pada gambar 2.1. Grafik sinus dapat dibuat dengan menggambar lingkaran jari-jari r = A. Jari-jari mula-mula diletakan searah x disebelah kiri pusat lingkaran, kemudian diputar searah jarum jam. Proyeksi kearah Y merupakan harga y untuk sudut tertentu yang = kx. Untuk kx = 30° = $\pi/6$, y = A/2, dst.



Gambar 2.1.

Bentuk gelombang periodik sinus sebagai fungsi x.

Titik-titik dimana y = 0, disebut titik simpul. Titik-titik simpul akan terjadi di kx = o, π, 2π, 3π, dst secara umum dapat dituliskan,

$$kx = n\pi \text{ atau } x = n\pi/k \qquad (2.6)$$

$$n = 1, 2, 3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

Jarak antara 3 simpul berurutan = jarak antara 2 tempat maksimum y berurutan, merupakan jarak 1 interval yang disebut 1 panjang gelombang λ. Dengan demikian

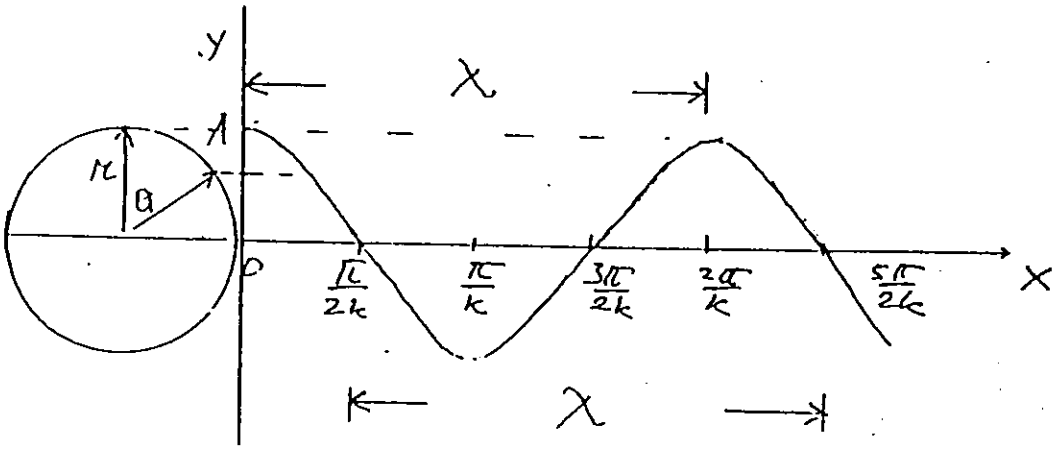
$$\lambda = 2\pi/k \text{ atau } k = 2\pi/\lambda \qquad (2.7)$$

k dinamakan bilangan gelombang.

Untuk gelombang periodik cosinus, bentuk gelombangnya sama dengan bentuk sinus, hanya bergeser dengan beda sudut atau beda fase 90°. Fungsi cosinus dapat dinyatakan dalam sinus hanya dengan menambah sudut sebesar 90° pada sinus.

$$\cos kx = \sin (90 + kx).$$

Untuk melukiskan bentuk gelombang cosinus, dengan cara yang sam; mula-mula r diletakan pada sudut 90° tegak lurus dipusat lingkaran. Jari-jari r diputar searah jarum jam, maka harga y adalah proyeksi r ke Y.



Gambar 2.2

Bentuk gelombang cosinus pada tali sebagai fungsi x.

Titik-titik simpul pada gelombang sinus terjadi di

$$x = \pi/2k,\ 3\pi/2k,\ 5\pi/2k,\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$= (2n + 1)\ \pi/2k.$$

$$n = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.8)$$

Tempat perut pada gelombang cosinus terjadi

$$x = 0,\ \pi/k,\ 2\pi/k,\ 3\pi/k,\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$= n\ \pi/k.$$

Gelombang berjalan cosinus sekarang dapat dituliskan,

$$y = A \sin (kx - kvt)$$

$$= A \sin (2\pi x/\lambda - 2\pi vt/\lambda)$$

$$= A \sin (2\pi x/\lambda - 2\pi ft)$$

$$= A \sin (kx - \omega t). \quad (2.10)$$

$f = v/\lambda$ adalah frekwensi gelombang dan

$\omega = 2\pi f$ adalah frekuensi sudut.

Peiode gelombang $T = 1/f = \lambda/v$.

Gelombang cosinus dapat dituliskan,

$$y = A \cos (2\pi x/\lambda - 2\pi f t)$$

$$y = A \cos (kx - \omega t). \qquad (2.11)$$

Bila fungsi cosinus diatas didiferensialkan ke x 2 kali, diperoleh,

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = -k^2 A \cos^2 (kx - \omega t) \qquad (2.12)$$

Bila didiferensialkan ke t 2 kali, diperoleh,

$$\frac{\delta^2 y}{\delta t^2} = -\omega^2 A \cos^2 (kx - \omega t) \qquad (2.13)$$

Dari kedua persamaan diatas, dapat dituliskan,

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = \frac{k^2 \ \delta^2 \ y}{\omega^2 \ \delta \ t^2}$$

$$= \frac{1}{v^2} \ \frac{\delta^2 y}{\delta t^2} \qquad (2.14)$$

Persamaan ini disebut *persamaan difrensial gerak gelombang* (Alonso/Finn, 1983; 297). Dengan cara yang sama, persamaan ini dapat diturunkan dari gelombang sinus (2.10) dan ternyata diperoleh persamaan gelombang bentuknya yang sama. Disamping itu persamaan gelombang periodik tsb dapat pula diturunkan dengan menggunakan hkum Newton berdasarkan gaya yang bekerja, yaitu gaya regang elastisitas pada tali.

Dalam menuliskan bersaran-besaran gelombang a.1:A,λ f ,T untuk selanjutnya menggunakan satuan SI (MKS). Satuan panjang m, satuan waktu detik, frekuensi Hz (jumlah/det).

2.3 KECEPATAN GELOMBANG

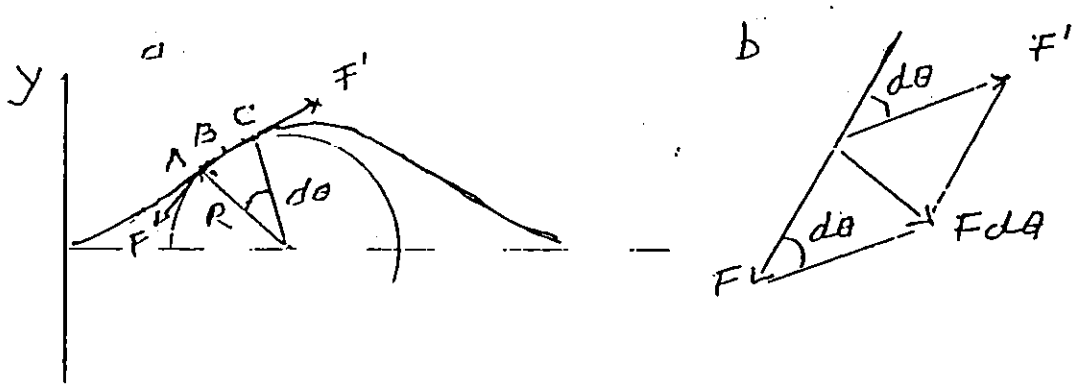
Kecepatan penjalaran gelombang adalah jarak yang ditempuh gelombang per detik, ini bergantung pada panjang gelombang λ dan frekuensi f.

$$v = \lambda f = 2\pi/k\, f = \omega/k. \qquad (1.15)$$

Selain itu, kecepatan gelombang dan panjang gelombang juga bergantung pada jenis medium yang dilalui gelombang, karena terkaitnya gaya yang bekerja yaitu gaya tegangan elastis.

Ditinjau dari penjalaran gelombang periodik yang sederhana pada tali (dawai, senar dsb) yang diregangkan. Misalkan massa per satuan panjang tali = μ (kg/m). Gerakan gelombang per unsur panjang tali adalah gerakan melengkung, oleh bekerjanya *gaya tegangan elastis* F.

Lengkungan tali pada suatu unsur panjang Δl dapat didekati sebagai bentuk bagian lingkaran jari-jari R.



Gambar 2.3 Gerakan lengkung gelombang pada unsur panjang tali Δl.

Bila unsur panjang Δl membentuk sudut $\Delta\theta$ di pusat lingkaran, maka gaya tegangan F dan F′ yang menyinggung dikedua ujung unsur panjang Δl, akan membentuk sudut $\Delta\theta$ juga (lihat gambar 2.3b). Gaya resultante yang merupakan perubahan gaya dari kedua titik = F $\Delta\theta$. Gaya ini menuju kedalam, adalah merupakan *gaya sentripetal* yang besarnya tergantung pada kecepatan, jadi

$$F\,\Delta\theta = mv^2/R = \mu\,\Delta l\,v^2/R \qquad (2.16)$$

Karena untuk sudut $\Delta\theta$ kecil $R\,\Delta\theta = \Delta l$, maka

$$F = \mu\,v^2$$

atau

$$v = \sqrt{F/\mu} \qquad (2.17)$$

Dengan demikian kecepatan gelombang berkaitan dengan gaya tekanan yang bekerja dan rapat mediumnya. Makin ringan massa tali, makin cepat penjalaran gelombang.

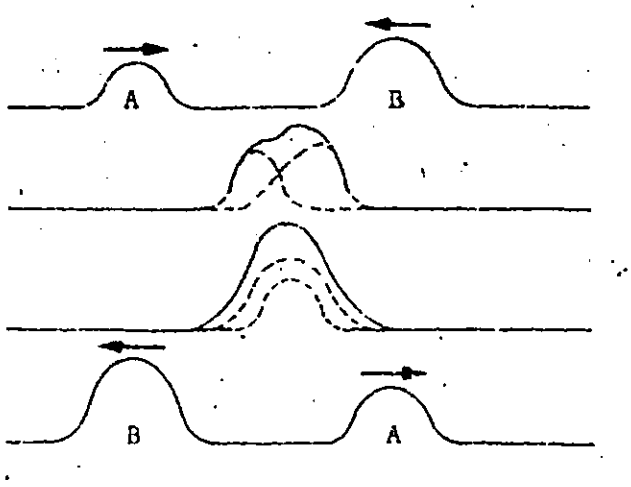
Pada gelombang tali yang elastis ini, bentuk gelombang-nya dapat dianggap tetap, hanya besar kelengkungannya yang berbeda, jadi kecepatan gelombang sama disepanjang tali. Untuk gelombang dalam medium yang elastis, bentuk dapat berubah-ubah bergantung pada tempat, jadi kecepatan gelombangnya juga berubah-ubah fungsi tempat atau mengalami *dispresi* (mediumnya disebut *medium dispresiv*).

Untuk membedakan kedua jenis kecepatan gelombang dalam elastis dan tak elastis ini, pada gelombang dengan kecepatan berubah yang berbentuk pulsa, dapat diambilkecepatan puncak pulsa gelombang. Kecepatan ini biasa disebut kecepatan

kelompok atau *gugus* (group velocity), sedang pada medium elastis yang mempunyai kecepatan tetap, disebut *kecepatan fase*. Pada pembicaraan tentang gelombang selanjutnya, hanya kecepatan fase saja yang lebih banyak dibahas, karena kecepatan group memerlukan matematik tidak sederhana.

2.4 PRINSIP SUPERPOSISI

Kita ingin membahas apa yang terjadi jika kita mempunyai dua atau lebih gelombang yang sejenis menjalar dalam medium yang sama. Untuk mudahnya kita padang lebih dahulu dua gelombang pulsa pada tali. Sebuah pulsa datang dari sebelah kiri, dan sebuah pulsa lain datang dari sebelah kanan, seperti terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Dua gelombang pulsa pada tali A dan B, bertemu, berpadu, dan melanjutkan perjalanan masing-masing tanpa ada perubahan bentuk.

Pada gambar 2.4 dilukiskan apa yang terjadi setelah kedua pulsa ini bertemu; kedua-duanya meneruskan penjalaran mereka tanpa ada perubahan bentuk. Jadi kedua gelombang ini tidak

saling mempengaruhi. Juga ditunjukan pada waktu kedua pulsa bertemu, simpangan total dari titik pada tali adalah jumlah dari simpangan-simpangan yang disebabkan oleh kedua pulsa tersebut.

Jadi jika ada dua gelombang menjalar dalam satu medium, maka gangguan total pada medium adalah jumlah dari gangguan oleh masing-masing gelombang. Sifat ini dikenal sebagai *Prinsip Superposisi*. Prinsip ini berlaku umum untuk semua gelombang selama gangguan yang disebabkan oleh gelombang tidak terlalu besar. Jadi misalnya, jika simpangan pada gelombang tali oleh masing-masing gelombang adalah sangat besar sehingga melewati batas elastisitas dari tali, maka simpangan total dari kedua gelombang ini tidaklah sama dengan jumlah dari simpangan oleh masing-masing gelombang.

Secara matematik dapat kita tuliskan sebagai berikut. Jika kita misalnya mempunyai tiga buah gelombang dalam suatu medium, dimana simpangan dari masing-masing gelombang dinyatakan oleh :

$$y_1\ (x,\ t),\ y_2(x,\ t),\ \text{dan}\ y_3(x,\ t)$$

dan jika simpangan total pada tali oleh ketiga gelombang ini dinyatakan oleh $y_T(x,\ t)$, menurut prinsip superposisi kita mempunyai hubungan :

$$y_T(x,\ t) = y\ (x,\ t) + y_2(x,\ t) + y_3(x,\ t) \qquad (2.18)$$

Persamaan (2-18) menunjukan bahwa hubungan antara $y_T(x, t)$ dengan $y_1(x, t)$, $y_2(x, t)$, dan $y_3(x, t)$ adalah hubungan *linier*, dikatakan bahwa medium bersifat linier terhadap gangguan-gangguan $y_1(x, t)$, $y_2(x, t)$ dan $y_3(x, t)$.

Jadi dapat dikatakan bahwa Prinsip Superposisi berlaku selama reaksi medium terhadap gangguan adalah linier. Ini berlaku selama reaksi medium terhadap gangguan terhadap medium tidak terlalu besar. Sebagai contoh, jika respons medium terhadap gangguan $y_1(x, t)$ dan $y_2(x, t)$ bersifat tidak linier, maka gangguan total $y_T(x, t)$ haruslah ditulis sebagai

$$y_T(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t)\ a[y_1(x, t) + y_2(x,t)]^2 \quad (2.19)$$

Tampak bahwa $y_T(x, t)$ juga bergantung pada kwadrat dari $y_1(x, t)$ dan $y_2(x, t)$. Dalam hal ini setelah gelombang bertemu dan berpisah lagi, masing-masing gelombang akan mengalami perobahan bentuk. Dikatakan bahwa kedua gelombang ini *berinteraksi*. Akan tetapi selama reaksi medium terhadap gangguan adalah linier, maka kedua gelombang ini dikatakan ber-superposisi, atau sering juga dikatakan bahwa terjadi interferensi antara kedua gelombang ini.

Gelombang Sinus. Sekarang kita akan membatasi pada gelombang sinus, untuk melihat apa yang terjadi pada interensi dua gelombang sinus. Kita bahas lebih dahulu dua buah gelombang sinus dengan frekuensi dan pula, akan tetapi

mempunyai fasa yang berlainan. Fungsi gelombang untuk kedua gelombang ini dinyatakan oleh

$$y_1 = A \sin (kx - \omega t - \phi_{01}) \qquad (2.20)$$

$$y_2 = A \sin (kx - \omega t) \qquad (2.21)$$

Persamaan (2.20) dapat ditulis sebagai berikut

$$y_1 = A \sin \{k(x - \frac{\phi_{01}}{k}) - \omega t\}$$

Sehingga jika kita potret y_1 dan y_2 bersama-sama, maksudnya kita lukiskan y_1 dan y_2 sebagai fungsi x pada suatu saat tertentu, maka puncak y_1 akan tergeser sejarak ϕ_{01}/k dari puncak y_2 lihat gambar (2.5). Hasil superposisi dari kedua gelombang y_1 dan y_2 adalah

$$y = y_1 + y_2 = y_m \{\sin(kx - \omega t - \phi_{01}) + \sin(kx - \omega t)\}$$

dari rumus ilmu ukur sudut,

$$\sin B + \sin C = 2 \sin \tfrac{1}{2} (B-C) \qquad (2.22)$$

kita peroleh

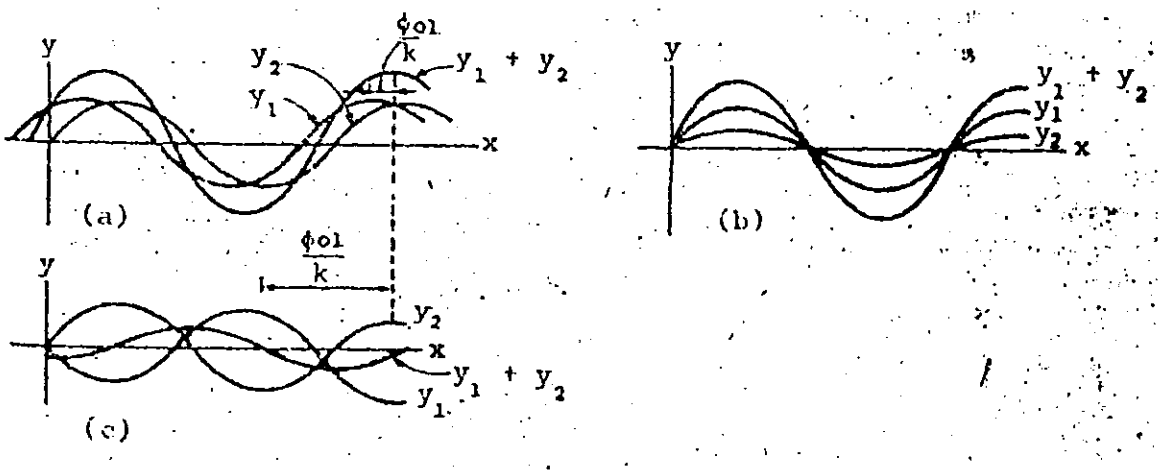
$$y = 2A \cos (\frac{\phi_{01}}{2}) \sin (kx - \omega t - \frac{\phi_{01}}{2}) \qquad (2.23)$$

Hasil Superposisi dari gelombang y_1 dan y_2 adalah suatu gelombang sinus dengan amplitudo A cos $\phi_{01}/2$, yaitu ϕ_{01} adalah sebesar $\phi_{01}/2$. Jika beda sudut fasa y_1 terhadap y_2, yaitu ϕ_{01} adalah sangat kecil, karena cos $\phi_{01}/2$ = cos 0°= 1. Jika beda sudut fasa adalah 0, maka y_1 dan y_2 mempunyai fasa yang sama dimana-mana. Puncak y_1 dan puncak y_2 berbeda pada tempat yang sama. Dikatakan antara y_1 dan y_2 terjadi

Str. 124
HAS

PADANG

interaksi *konstruktif*. Jika sudut fasa $\phi_{01} = 180^{o}$, maka amplitudo resultan yang terjadi adalah sangat kecil (gambar 2.5). Jika ϕ_{01} adalah tepat sama dengan 180°, maka cos $\phi_{01}/2$ = cos 90° = 0, amplitudo gelobang resultan sama dengan nol dimana-mana. Hal ini terjadi karena pada tempat-tempat dimana terjadi puncak y_1, di situ terjadi lembah untuk y_2. Dikatakan y_1 dan y_2 berinterferensi secara *destruktif*.



Gambar 2.5.

(a) Superposisi dua gelombang dengan beda fasa ϕ_{01}
(b) Superposisi dua gelombang dengan beda fasa = 0
(c) Superposisi dua gelombang dengan beda fasa = 180°

Sekarang sebagai mana halnya dengan superposisi tiga buah gelombang, atau dua gelombang dengan frekuensi sama yang menjalar pada medium yang sama (jadi dengan kecepatan yang sama) akan tetapi dengan amplitudo yang berbeda. Dengan

PADANG

hal ini kita tidak dapat mempergunakan persamaan (2.23) karena faktor berlainan.

Untuk mengatasi hal ini kita gunakan *diagram fosor*. Cara ini juga digunakan pada penggunaan pada penjumlahan tegangan pada arus bolak-balik. Misalkan kita mempunyai dua fungsi gelombang y_1 (x, t) = A_1 cos (kx - ωt - ϕ_{01}) dan y_2(x, t) = A_2 cos (kx - ωt - ϕ_{01}). Hasil superposisi kedua gelombang ini dapat dinyatakan dengan fungsi gelombang.

$$y_R(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \qquad (2.24)$$
$$= A_R \cos (kx - \omega t + \phi_{0R})$$

Kita ingin menentukan A_R dan ϕ_{0R} jika kita tahu A_1, A_2 , ϕ_1, ϕ_2. Dalam melakukan penjumlahan diatas kita sekaligus menjumlahkan dua besaran, yaitu amplitudo A dan sudut fasa ϕ = kx - ωt ϕ_{01}. Untuk ini tiap suku pada persamaan (2.24) kita pandang sebagai vektor.

Fungsi gelombang :

$$y_1(x,t) = A_1 \cos \phi_1 = \cos (kx - \omega t + \phi_{01})$$

kita pandang sebagai vektor

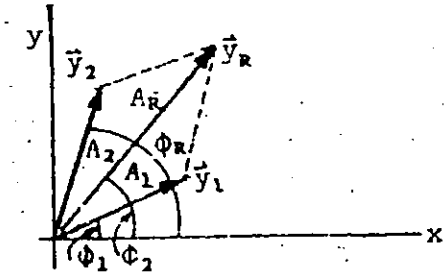
$$y_1 = A_1 < (\phi_1 = kx - \omega t + \phi_{01})$$

yaitu suatu vektor dengan panjang A_1 dan membuat sudut ϕ_1 = kx - ωt + ϕ_{01} dengan sumbu x. Jadi arah vektor ini dinyatakan oleh sudut fasa. Vektor semacam ini disebut fasor. Fungsi gelombang y_1(x, t) tak lain adalah proyeksi fasor y_1 pada

sumbu x. Dengan menggunakan fasor superposisi kedua gelombang pada persamaan (2.24) menjadi jumlah fasor

$\vec{y}_R = \vec{y}_1 + \vec{y}_2$

Ini dilukiskan dengan diagram seperti pada gambar 2.6. Diagram semacam ini diangram fasor.



Gambar 2.6 Fungsi gelombang $y_1(x, t) = A_1\cos(kx - \omega t - \phi_{01})$ dinyatakan dengan fasor y jumlah fasor $\vec{y}_1 + \vec{y}_2$ menghasilkan fasor $\vec{y}_R$ dengan panjang A_R dan sudut fasor ϕ_R

Panjang fasor A_R dan sudut fasa ϕ_R untuk gelombang resultan dapat ditentukan bila diketahui A_1, A_2, ϕ_1, dan ϕ_2. Fungsi gelombang resultan tidak lain adalah proyeksi fasor y_R pada sumbu x, yaitu

$$y_R(x, t) = A_R \cos \phi_R = A_R \cos (kx - \omega t - \phi_{0R})$$

Harga-harga A_R dan tetapan fasa ϕ_{0R} tidak bergantung pada harga x dan t, sehingga untuk menentukan A_R dan ϕ_{0R} kita gunakan fasor untuk x = 0 dan t = 0. Dengan demikian

arah fasor hanya ditentukan oleh tetapan fasa dari fungsi gelombang yang bersangkutan.

Sekarang marilah kita bahas contoh kita yang terdahulu, yaitu superposisi gelombang

$$y_1(x, t) = A \sin (kx - \omega t - \phi_{01}) \qquad (2.20)$$

$$y_2(x, t) = A \sin (kx - \omega t) \qquad (2.21)$$

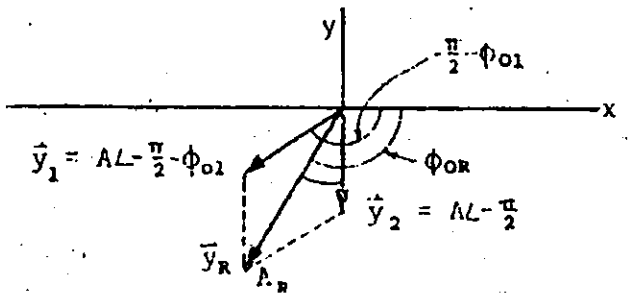
Karena fungsi gelombang kita peroleh dengan mengambil proyeksi fasor -x, kita harus menyataakaan fungsi gelombang dalam fungsi cosinus lebih dahulu, baru kita lukis- kan fasornya.

Persamaan (2.20) dan (2.21) menjadi

$$y_1(x, t) = A \cos (kx - \omega t - \phi_{01} - \frac{\pi}{2})$$

$$y_2(x, t) = A \cos (kx - \omega t \frac{\pi}{2})$$

Bila ϕ_{01} mempunyai harga positif, kita dapat lukiskan kedua fasor ini seperti gambar 2.7.



Gambar 2.7. Fasor $\vec{y}_1 + \vec{y}_1 = \vec{y}$ dengan $\vec{y}_R$ fasor untuk fungsi gelombang $y_1(x, t) = A \sin (kx - \omega t - \phi_{01})$ dan fasor $\vec{y}_2$ untuk fungsi gelombang $\vec{y}_2(x, t) = A \sin (kx - \omega t)$.

Karena panjang kedua sisi belah ketupat sama, dari gambar 2.7 nyata bahwa $\phi_{01} = -\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi_{01}}{2}\right)$ sedang panjang fasor $\vec{y}_R$ dapat dihitung dari

$$A^2 = A^2 + A^2 + 2A^2 \cos \phi_{01}$$

$$= 2A^2 \left(1 + 2\cos^2 \frac{\phi}{2} - 1\right)$$

$$= 4A^2 \cos^2 \frac{\phi_{01}}{2}$$

$$\text{atau } A_R = 2A \cos \frac{\phi_{01}}{2}$$

Fungsi gelombang superposisi adalah proyeksi fasor $\vec{y}_R$ pada sumbu x, yaitu

$$y_R = A_R \cos (kx - \omega t + \phi_{01})$$

$$= 2A \cos \frac{\phi_{01}}{2} \cos\left(kx - \omega t - \frac{\phi_{01}}{2} - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= 2A \cos \frac{\phi_{01}}{2} \sin\left(kx - \omega t - \frac{\phi_{01}}{2}\right)$$

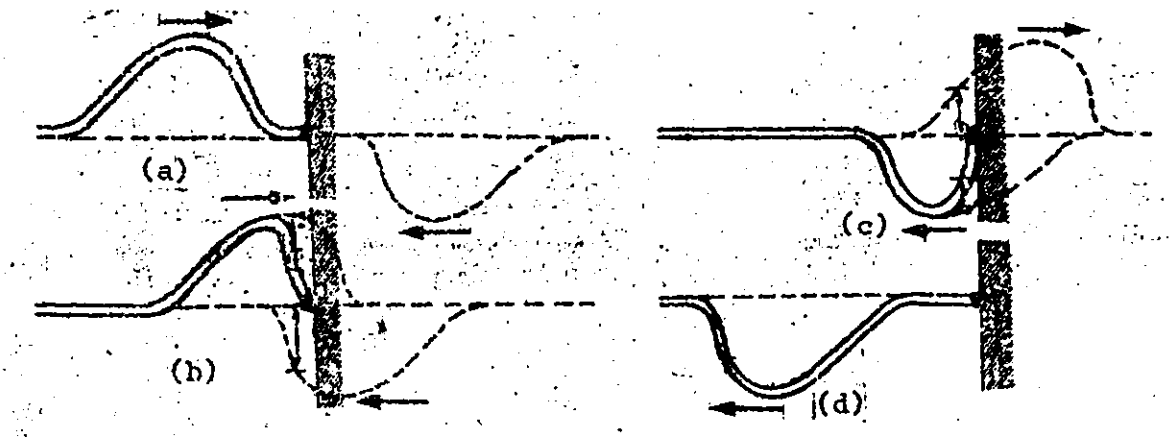
Seperti kita peroleh pada persamaan (2.23). Tampaknya tidak ada yang baru sampai disini. Akan tetapi cara fasor ini dapat dipergunakan untuk menghitung hasil superposisi dari tiga atau lebih gelombang-gelombang yang bersuperposisi tidak sama besarnya.

2.5 GELOMBANG BERDIRI

Suatu gelombang yang merambat pada sepotong tali, bila sampai pada ujung tali maka gelombang tersebut akan

dipantulkan kearah yang berlawanan. Bila ujung tali terikat, gelombang pantul mempunyai simpangan yang berlawanan dengan simpangan gelombang datang atau dikatakan bahwa gelombang pantul menpunyai fasa yang berlawanan dengan fasa gelombang datang. Bagian talil yang terikat mempunyai simpangan selalu nol karena reaksi dari tali.

Untuk mendapatkan gambaran dari pemantulan gelombang pada ujung terikat digunakan proses khayal seperti pada gambar 2.8

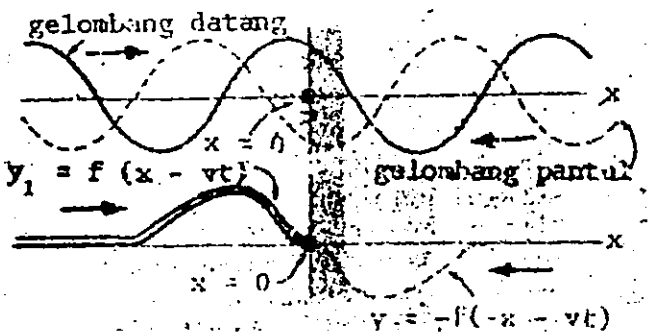


Gambar 2.8 Pulsa gelombang tali dipantulkan oleh ujung terikat pada tembok. (Sutrisno. 1984 ; 41).

Misalkan suatu pulsa gelombang sampai pada ujung terikat, dan gelombang pantulnya dapat dapat dibayangkan berupa pulsa gelombang dengan bentuk sama tetapi fasanya berlawanan pada tali khayal yang dihubungkan dengan ujung terikat. Jarak pulsa khayal sampai ketembok pada setiap saat adalah sama dengan jarak pulsa datang ke tembok. Pada saat pulsa datang sampai keujung terikat, pulsa khayal juga berada pada tempat

tersebut hingga simpangan tali adalah hasil superposisi dari kedua pulsa ini.

Bila gelombang datang pada tali berbentuk sinus, misalnya $y = y_m \sin(kx - \omega t)$.



Gambar 2.9 a. Gelombang yang datang berbentuk sinus harus di superposisikan dengan gelobang pantul (khayal) agar titik ikat pada x = 0 selalu mempunyai simpangan sama dengan nol.

b. Bentuk gelombang pantul khayalan didapat dari refleksi terhadap tembok.

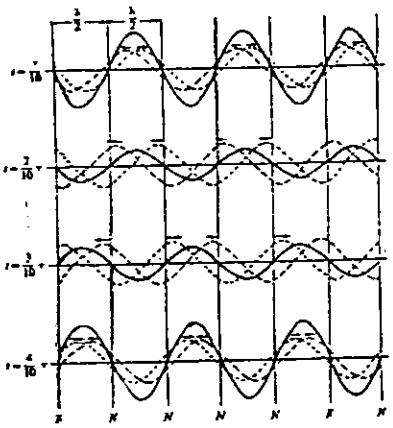
Maka dari gambar 2.9 (b) tampak bahwa bahwa agar simpangan pada x = 0 selalu sama dengan nol, kita memerlukan suatu pulsa pantul khayal. Pulsa khayal ini diperoleh dengan refleksi cermin pulsa dari pulsa datang terhadap titik ikat, dan kemudian membuat agar fasanya berlawanan dengan fasa dari pulsa datang. Jadi jika pulsa datang mempunyai fungsi gelombang $y_1 = f(x - vt)$, maka pulsa pantul ujung terikat haruslah sama dengan $y_2 = -f(-x - vt)$. Perubahan $x \rightarrow -x$ adalah refleksi sepanjang sumbu x terhadap titik x = 0, sedang $f \rightarrow -f$ adalah agar gelombang mempunyai fasa yang berlawanan.

Kembali kepada gelombang sinus kita misalkan gelombang datang dinyatakan oleh $y_1 = y_m \sin(kx - \omega t)$. Agar titik ikat

$x = 0$ sulalu mempunyai simpangan nol, maka gelombang pantul haruslah mempunyai bentuk $y_2 = -y_m \sin(-kx - \omega t) = y_m \sin(-kx - \omega t + 180^o)$. Jadi untuk gelombang sinus pebalikan pada gelombang pantuldapat dinyatakan sebagai loncatan (tambahan) sudut fasa sebesar 180° pada fasa gelombang pantul. Hasil superposisi dari gelombang datang dan gelombang pantul oleh ujung terikat adalah

$$\begin{aligned} y = y_1 + y_2 &= y_m\{(\sin(kx - \omega t) + \sin(-kx - \omega t + 180^o)\} \\ &= y_m\{\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)\} \\ &= 2\, y_m \cos \omega t \sin kx \end{aligned} \qquad (2.25)$$

Persamaan 2.25 bukanlah persamaan untuk gelombang yang menjalar. Simpangan tali y yang merupkan hasil superposisi gelombang datang dan gelombang pantul, dapat lihat pada gambar 2.10. Tampak bahwa puncak-puncak gelombang tidak bergeser pada arah x.

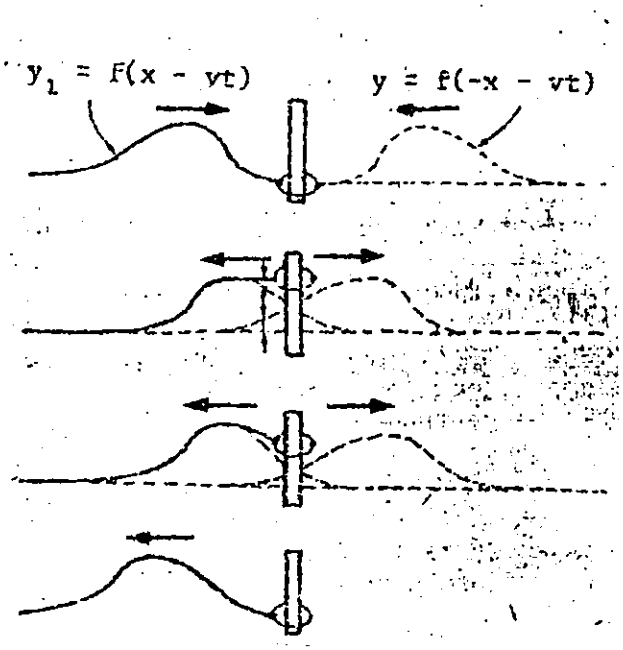


Gambar 2.10 Hasil superposisi gelombang datang dengan gelombang pantul mengahsilkan gelombang berdiri.

Jadi seluruh bagian tali bersama-sama melakukan gerak harmonik. Gelombang seperti ini disebut *gelombang berdiri* (stasioner). Titik-titik tertentu dari tali mempunyai simpangan yang besar dibanding dengan titik-titik disekitarnya.

Bagian-bagian ini disebut perut (P) dari gelombang berdiri. Ada juga titik-titik tertentu lain yang simpangannya selalu sama dengan nol, titik-titik seperti ini disebut simpul (S). Titik ikat adalah salah satu titik simpul. Jadi nyata bahwa pada gelombang berdiri yang disebabkan pantulan oleh ujung terikat, akan terjadi titik- titik simpul pada jarak $d = n\frac{\lambda}{2}$ dari titik simpul, dimana n adalah bilangan bulat, dan λ adalah panjang gelombang.

Pantulan oleh ujung bebas memberikan gelombang pantul tanpaada pembalikan fasa. Hal ini dapat diamati pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Peristiwa pantulan pada tali dengan ujung bebas.

Dalam gambar ini, tali sebelah kiri sangat ringan sehingga dapat kita anggap sebagai ujung bebas. Jadi jika gelombang datang dinyatakan oleh $y_1 = f(x - vt)$, maka gelombang pantul dinatakan oleh $y_2 = y \sin(-kx - \omega t)$. Simpangan tali karena suatu pulsa dipantulkan oleh ujung bebas ditunjukan dalam gambar 2.12. Dalam gambar ini ujung bebas dilukiskan dengan suatu cincin ringan tanpagesekan. Untuk gelombang sinus, jika gelombang datang dinyatakan oleh

$$y_1 = y_m \sin(kx - \omega t) \qquad (2.26)$$

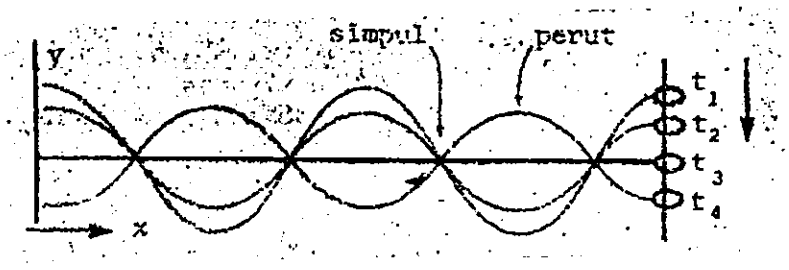
maka gelombang pantul oleh ujung bebas diberikan oleh

$$y_2 = y_m \sin(-kx - \omega t) \qquad (2.27)$$

Tanda plus pada persamaan (2.27) menyatakan bahwa pantulan oleh ujung tidak menyebabkan perubahan fasa. Hal ini memberikan simpangan $y = y_1 + y_2$ jadi

$$\begin{aligned} y &= y_m\{\sin(kx - \omega t) - \sin(kx + \omega t)\} \\ &= 2\, y_m \sin \omega t \cos kx \qquad (2.28) \end{aligned}$$

Persamaan (2.28) memberikan suatu gelombang berdiri dimana pada ujung bebas (x = 0) simpangan adalah sebesar. Jadi pada ujung bebas selalu merupakan titik perut seperti pada gambar 2.12.

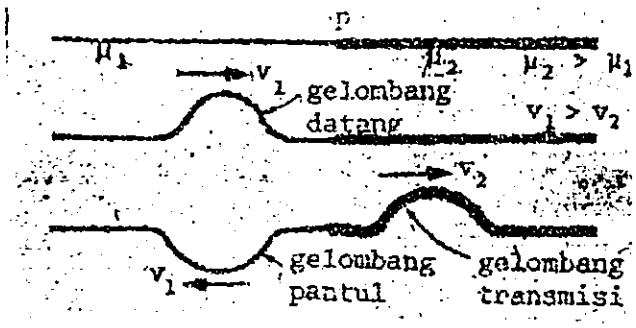


Gambar 2.12 Gelombang berdiri pada tali dengan ujung bebas.

2.6 PANTULAN DAN TRANSMISI PADA SAMBUNGAN TALI

Misalkan kita mempunyai dua macam tali yang kita sambungkan, dan kedua tali ini mempunyai rapat massa yang berbeda. Tali ini kita rentangkan agar tegang, dan pada salah satu tali kita jalarkan sebuah pulsa gelombang yangmenjalar kearah sambungan. Peristiwa ini dapat diamati pada gambar 2.13, dimana ditunjukan suatu pulsa gelombang menjalar ke arah kiri. Tampak apa yang terjadi padawaktu pulsa gelombang sampai pada sambungan; suatu pulsa gelombang menjalar terus pada tali pertama menjauhi sambungan.

Gelombang yang menjalar terus pada tali kedua disebut gelombang transmisi dan gelombang yang dikembalikan disebut *gelombang pantul* atau *gelombang refleksi*.



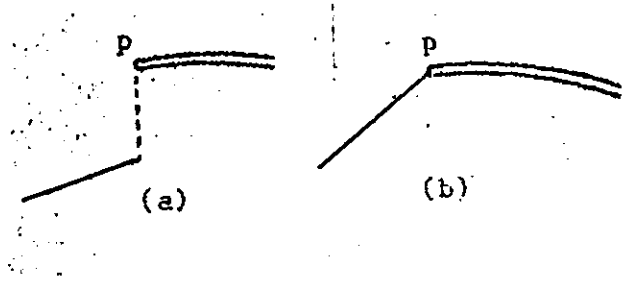
Gambar 2.13 Pantulan pada sambungan tali.
(Sutrisno, 1984; 44)

Jika tali pertama mempunyai rapat massa μ_1, dan tali kedua mempunyai rapat massa μ_2, karena tegangan kedua tali ini sama, maka kecepatan jalar gelombang pada kedua tali ini berbanding sebagai

$$v_1 : v_2 = \sqrt{\frac{T}{\mu_1}} : \sqrt{\frac{T}{\mu_2}} = \sqrt{\frac{1}{\mu_1}} : \sqrt{\frac{1}{\mu_2}}$$

Ujung terikat dapat dianggab sebagai sambungan suatu tali dengan tali lain yang massanya tidak berhingga. Akibatnya suatu gelombang yang datang dari tali ringan (rapat massa kecil) ke suatu tali berat (rapat masa besar), pada sambungan akan dipantulkan terbalik. Atau juga dapat dikatakan lebih umum, bahwa gelombang yang menjalar kesuatu medium dan memasuki medium lain dimana kecepatan jalarnya lebih kecil, akan dipantulkan terbalik pada batas kedua medium itu. Sebaliknya, jika gelombang datang dari suatu medium berat (kecepatan jalar kecil), memasuki medium ringan (kecepatan jalar besar), maka gelombang ini akan mengalami pantulan tanpaperubahan fasa pada batas kedua medium tadi.

Untuk gelombang sinus kita dapat mencari hubungan antara amplitudo gelombang datang, gelombang pantul dan gelombang transmisi. Untuk ini kita pergunakan kenyataan bahwa pada waktu gelombang sampai disambungan, bentuk gelombang pada titik sambung haruslah kontinu. Diskontinuitas simpangan dan kemiringan fungsi gelombang pada titik sambungan dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. a. Diskontinuitas simpangan fungsi gelombang
b. Diskontinuitas kemiringan fungsi gelombang.

Jika simpangan gelombang datang dinyatakan oleh y_d (x, t), simpangan gelombang transmisi oleh y_t (x, t), dan simpangan gelombang pantul oleh y_p(x, t), kontinuitas pada titik sambungan dapat dituliskan sebagai berikut

$$y_d + y_p = y_t \tag{2.29}$$

$$\frac{\partial y_d}{\partial x} + \frac{\partial y_p}{\partial x} = \frac{\partial y_t}{\partial x} \tag{2.30}$$

Pada persamaan (2.30), $\frac{\partial y(x,\ t)}{\partial x}$ adalah difrensial persiil y(x, t) terhadap x, yang berarti y(x, t)diturunkan terhadap x, dengan t diambil konstan.

Untuk gelombang sinus yang datang dari tali ringan, maka jika titik sambung diambil x = 0, dapat dituliskan

$$y_d(x,\ t) = A_d \cos(k_1 x - \omega t)$$
$$y_p(x,\ t) = A_p \cos(-k_1 x - \omega t + 180^o)$$
$$y_t(x,\ t) = A_t \cos(k_2 x - \omega t) \tag{2.31}$$

Pada fungsi gelmbang transmisi kita anggap bahwa gelombang transmisi tidak mengalami perubahan fasa, sesuai dengan pengamatan kita pada gambar 2.13.

Jika kita pergunakan syarat kontinuitas pada persamaan (2.29) dan (2.30) pada fungsi-fungsi gelombang dalam persamaan (2.31), kita peroleh

$$A_d - A_p = A_t \tag{2.32}$$

$$k_1 A_d + k_1 A_p = A_2 k_t \tag{2.33}$$

Jika simpangan gelombang datang dinyatakan oleh y_d (x, t), simpangan gelombang transmisi oleh y_t(x, t), dan simpangan gelombang pantul oleh y_p(x, t), kontinuitas pada titik sambungan dapat dituliskan sebagai berikut

$$y_d + y_P = y_t \tag{2.29}$$

$$\frac{\partial y_d}{\partial x} + \frac{\partial y_P}{\partial x} = \frac{\partial y_t}{\partial x} \tag{2.30}$$

Pada persamaan (2.30), $\frac{\partial y(x,\ t)}{\partial x}$ adalah difrensial persiil y(x, t) terhadap x, yang berarti y(x, t)diturunkan terhadap x, dengan t diambil konstan.

Untuk gelombang sinus yang datang dari tali ringan, maka jika titik sambung diambil x = 0, dapat dituliskan

$$y_d(x,\ t) = A_d \cos(k_1 x - \omega t)$$
$$y_P(x,\ t) = A_P \cos(-k_1 x - \omega t + 180^0)$$
$$y_t(x,\ t) = A_t \cos(k_2 x - \omega t) \tag{2.31}$$

Pada fungsi gelmbang transmisi kita anggap bahwa gelombang transmisi tidak mengalami perubahan fasa, sesuai dengan pengamatan kita pada gambar 2.13 .

Jika kita pergunakan syarat kontinuitas pada persamaan (2.29) dan (2.30) pada fungsi-fungsi gelombang dalam persamaan (2.31), kita peroleh

$$A_d - A_P = A_t \tag{2.32}$$

$$k_1 A_d + k_1 A_P = A_2 k_t \tag{2.33}$$

Persamaan (2.33) dapat ditulis sebagai

$$\frac{\omega}{v_1} A_d + \frac{\omega}{v_1} A_r = \frac{\omega}{v_2} \text{ atau } \frac{A_d}{v_1} + \frac{A_r}{v_1} = \frac{A_t}{v_2} \qquad (2.34)$$

Jadi kita peroleh $A_t = \dfrac{2v_2}{v_1 + v_2} A_d$ (2.35)

dan $A_r = \dfrac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} A_d$ (2.36)

Jadi dapat dituliskan bahwa jika pada tali ringan menjalar gelombang $y_D(x, t) = A_o \cos(k_1 x - \omega t)$
maka pada sambungan dengan tali berat akan terjadi gelombang pantul

$$y_1(x, t) = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} A_o \cos(-k_1 x - \omega t) \qquad (2.37)$$

dan pada tali berat akan menjalar gelombang transmisi

$$y_2(x, t) = \frac{2v_2}{v_1 + v_2} A_o \cos(k_2 x - \omega t) \qquad (2.38)$$

Jika tali kedua lebih ringan dari tali pertama maka v_2 akan lebih besar dari v_1 akibatnya gelombang pantul menjadi

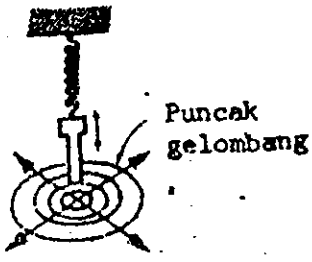
$$y_1(x, t) = \frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} A_o \cos(-k_1 x - \omega t) \qquad (2.39)$$

berarti bahwa gelombang pantul tidaklah terbalik relatif terhadap gelombang datang.

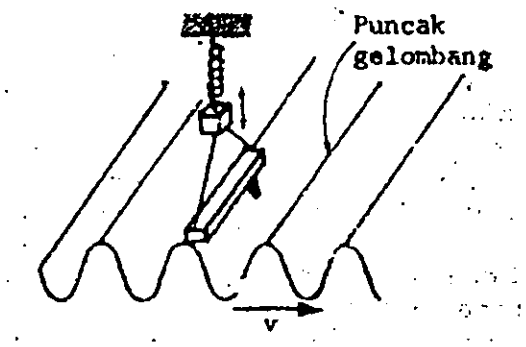
BAB 3
GELOMBANG PADA PERMUKAAN AIR

Sampai sekarang kita membatasi diri pada gelombang tali. Gelombang semacam ini baik sekali dijadikan sebagai contoh pelajaran gelombang dan sifat gelombang satu dimensi. Dikatakan gelombang satu dimensi sebab medium gelombang yang dipergunakan, yaitu tali, dapat dianggap mempunyai dimensi satu. Jadi, dianggap tali hanya mempunyai panjang saja dan gelombang menjalar hanya di sepanjang tali, jadi hanya ada *satu* dimensi *arah penjalaran.* Karena mudah digambarkan dan dibanyangkan, maka gelombang pada tali dapat digunakan sebagai pegangan untuk menggambarkan sifat gelombang dalam medium yang lain. Hal ini dapat di-lakukan, sebab sifat gelombang tekanan pada batang, gelom-bang radio dan sebagai- nya, adalah sama, semua gelombag juga. Jadi dengan mengetahui sifat-sifat gelombang pada tali, kita dapat mempelajari banyak sifat gelombang lain.

Gelombang pada permukaan air merupakan suatu contoh gelombang dua dimensi, karena medium gelombang ini, yaitu permukaan air, mempunyai dimensi dua, panjang dan lebar. (Gambar 3.1)



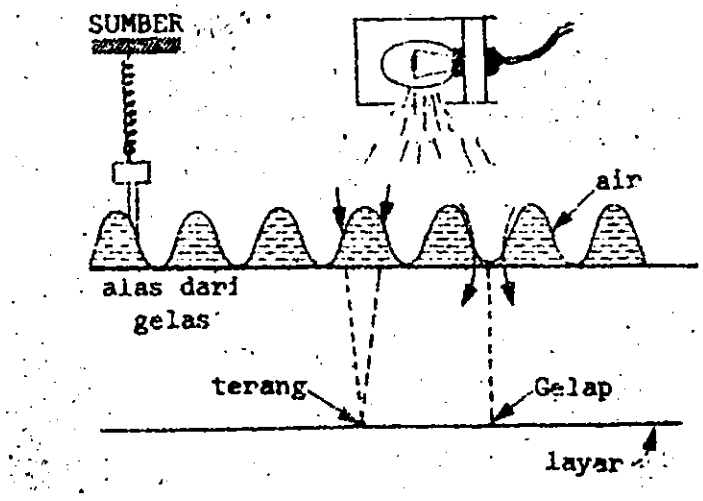
Gambar 3.1a. Gelombang lingkaran pada permukaan air.



Gambar 3.1b. Gelombang lurus pada permukaan air.

Kita dapat membuat gelombang periodik pada permukaan air dengan cara berikut. Sebuah beban M kita ikat pada sebuah pegas. Pegas dan beban tersebut digantungkan diatas permukaan air. Jika badul diayunkan, batang tadi akan keluar masuk permukaan air, dan suatu pola berupa lingkaran konsentris akan menjalar menjauhi jarum. Gelombang semacam ini disebut *gelombang lingkaran*. Jika pada beban bergantung suatu batang secara mendatar tepat pada permukaan air, ayunan beban akan menyebabkan terbentuknya jumlah garis lurus sejajar dengan batang. Garis lurus itu akan menjalar menjauhi sumber gelombang. Gelombang semacam ini disebut *gelombang lurus*. Jika anda melakukan percobaan ini pada air kolam yang cukup besar, mungkin anda dapat melihat penjalaran gelombang air. Untuk air di dalam gelas minum, karena penjalaran gelombang pada permukaan air adalah sangat cepat, maka gelombang yang terjadi sangat sukar untuk diamati dengan mata. Suatu cara yang baik untuk mengamati gelombang air adalah dengan menggunakan kamera. Zat cair yang diperlukan (biasanya air) ditaruh dalam sebuah bejana yang alasnya terbuat dari kaca yang tembus

cahaya. Alat khusus untuk menyelidiki gerak gelombang pada permukaan air disebut tangki riak (*ripple tank*) gambar 3.1b.



Gambar 3.2. Dasar kerja ripple tank.

Karena bentuk dari gelombang, maka cahaya lampu yang jatuh pada puncak gelombang akan dibiaskan pada lensa cembung (positif). Akibatnya pada layar akan kelihatan terang. Sedang cahaya yang datang pada lembah gelombang akan dibiaskan tersebar seperti pembiasan oleh lensa cukung, sehingga pada layar akan tampak bayang-bayang gelap. Jika layar ini kita potret, maka kita akan mendapatkan gambar gelombang lingkaran. Dalam membahas gelombang sinus pada tali (gelombang satu dimensi) kita sudah bicara tentang fasa gelombang. Jadi, misalnya, puncak gelombang mempunyai sudut fasa besar $\phi = kx - \omega t = 90^{o}$. Ini dapat dilihat dari fungsi gelombang $y = A \sin (kx - \omega t) = A \sin 90^{o} = A$. Jadi, simpangan untuk sudut fasa 90°, atau $90^{o} + n \times 360^{o}$, adalah sebesar amplitudo gelombang, dan akan menyalakan puncak-puncak gelombang pada layar. Pada gelombang lingkaran, lingkaran

pada gambar menyatakan puncak gelombang.

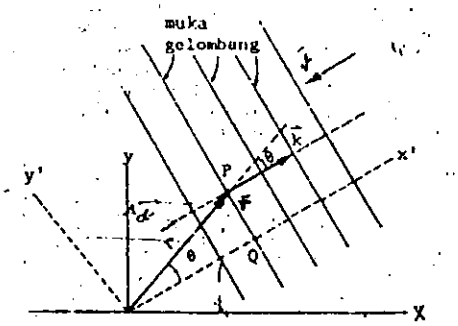
Pada gelombang lingkaran dipuncak air, setiap titik pada puncak lingkaran setiap saat mempunyai fasa yang sama. Jadi puncak lingkaran ini menyatakan tempat kedudukan semua titik pada permukaan air yang setiap saat mempunyai fasa yang sama. Secara umum tempat kedudukan semacam ini disebut *muka gelombang*.

Jadi dapat kita katakan bahwa gelombang lingkaran adalah gelombang dengan muka gelombang berbentuk lingkaran. Begitu juga halnya dengan gelombang lurus, muka gelombangnya berupa garis lurus. Dalam medium berdimensi tiga dikenal gelombang datar, karena permukaan gelombangnya berupa bidang datar, dan gelombang bola.

Suatu garis yang ditarik tegak lurus pada muka gelombang disebut sinar gelombang. Nyata bahwa pada gelombang lingkaran sinar gelombang berarah radial.

3.1 FUNGSI GELOMBANG PERMUKAAN AIR

Untuk menyatakan fungsi gelombang yang merambat dipermukaan air, haruslah diketahui sudut fasa gelombang dan kemana arah rambatan gelombang. Bagaimana kita menyatakan sudut fasa gelombang dalam medium berdimensi dua? Agar lebih mudah, kita perhatikan suatu gelombang lurus *sinus* pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Gelombang sinus menjalar pada arah $\vec{k}$

Dalam medium berdimensi dua vektor kecepatan gelombang dinyatakan sebagai vektor v. Selanjutnya bilangan gelombang k harus dinyatakan dengan vektor k yang memenuhi hubungan $\bar{k} = \omega / \vec{v}$, dengan ω sebagai frekwensi gelombang.

Jadi arah sinar gelombang dapat dinyatakan oleh *vektor gelombang* $\bar{k}$. Pada gambar 3.3 sudut fasa gelombang di titik P sama dengan sudut fasa gelombang di titik Q, karena kedua titik ini terletak pada muka gelombang yang sama. Sudut fasa pada titik Q adalah

$$\phi(Q) = kx' - \omega t$$

sehingga sudut fasa titik P adalah

$$\phi(P) = kx' - \omega t = kr \cos \theta - \omega t$$

dengan θ adalah sudut antara vektor $\vec{r}$ dan $\vec{k}$.

Dalam bahasa vektor, sudut fasa titik pada posisi $\vec{r}$ di dalam medan gelombang dengan vektor gelombang $\vec{k}$ dan frekwensi ω adalah

$$\phi(\vec{r}\ ,\ \vec{t}) = \vec{k}.\vec{r} - \omega t$$

Selanjutnya suatu gelombang lurus atau gelombang datar dapat kita nyatakan dengan fungsi gelombang

$$y = A \cos (\vec{k}.\vec{r} - \omega t + \phi o) \qquad 3.1$$

dengan $\vec{k}.\vec{r}$ menyatakan perkalian skalar antara vektor $\vec{k}$ dan vektor $\vec{r}$.

Contoh 1.

Misalkan suatu gelombang sinus mempunyai fungsi gelombang $y = 5 \cos (\vec{k}.\vec{r} - \omega t)$ cm dengan $k = 2\pi\ (3\hat{i} + 4\hat{j})\ m^{-1}$, dan $\omega = 10\pi$ rad/det.

Tentukan simpangan gelombang pada $r = (\hat{i}10 + \hat{j}15)$m pada saat $t = 10$ det.

Gelombang ini mempunyai panjang gelombang $\lambda = \dfrac{2\pi}{k}$

karena $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \sqrt{(2\pi)^2(3)^2 + (2\pi)^2(4)^2} = (2\pi)(5)$,

maka panjang gelombang $\lambda = \dfrac{2\pi}{(2\pi)(5)}$ m = 20 cm.

sudut fasa pada tempat $\vec{r} = (\hat{i}10 + \hat{j}15)$ m pada saat t = 10 det

adalah $\phi = \vec{k}.\vec{r} - \omega t = k_x r_x + k_y r_y - \omega t$

$= (2\pi)(3)(10) + (2\pi)(4)(15) - (10\pi)(10)$

$= (2\pi)\{30 + 60 + - 50\} = (2\pi)(40)$ radial

Simpangan di titik ini pada saat t = 10 det adalah

$y = 5 \cos \{(2\pi)(40)\} = 5$ cm.

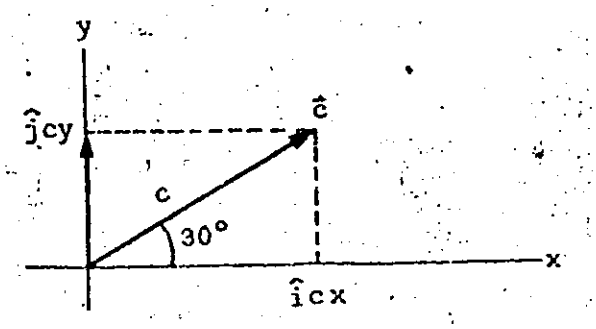
Contoh 2.

Suatu gelombang lurus pada permukaan air menjalar dengan arah membuat sudut 30^0 terhadapa sumbu x. Bila diketahui frekwensi getar sumber adalah 60 Hz, dan panjang gelombang adalah 2 cm, sedang pada posisi $\vec{r} = 0$ dan saat t = 0 simpangan gelombang sama dengan nol, medium bergerak ke bawah, tentukan fungsi gelombang tersebut. Misalkan amplitudo gelombang adalah 0,5 cm. Secara umum fungsi gelombang lurus adalah

$$y = A \cos(\vec{k}.\vec{r} - \omega t + \phi o).$$

Arah penjalaran membuat sudut 30°, berarti kita dapat tuliskan vektor gelombang $\vec{k}$ sebagai $\vec{k} = \hat{c}k$, dengan $\hat{c}$ vektor satuan membuat sudut 30 dengan sumbu x, dan bilangan gelombang $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Kita dapat peroleh vekor satuan $\hat{c}$ dari hubungan $\hat{c} = \left|\frac{\hat{c}}{c}\right|$ dengan $\hat{c}$ adalah suatu vektor sebarang membuat sudut 30°, seperti gambar 3.4.



Gambar 3.4. Vektor $\hat{c}$ adalah sebarang vektor yang membuat sudut 30° terhadap sumbu x.

Dari gambar diatas, tampak bahwa

$c_x = c \cos 30^o = 1/2\ c\sqrt{3}$ dan

$c_y = c \sin 30^o = 1/2\ c$, sehingga

$\vec{c} = i\ 1/2\ c\sqrt{3} + j\ 1/2\ c$ dan vektor satuan

$\hat{c} = \frac{\vec{c}}{c} = \hat{i}\ 1/2\ \sqrt{3} + j\ 1/2$.

Jadi vektor gelombang $\hat{k}$ dapat kita peroleh

$$\vec{k} = (i\ 1/2\ \sqrt{3} + j\ 1/2\ )\frac{2\pi}{\lambda}$$

$$= (i\ 1/2\ \sqrt{3} + j\ 1/2\ )\frac{2\pi}{2}\ cm^{-1}$$

Selanjutnya tetapan fasa ϕo dapat kita tentukan dari pernyataan bahwa di $\vec{r} = 0$ saat $t = 0$ pada saat $t = 0$ simpangan $y = 0$, sehingga

$$y(\vec{r}=0, t=0) = A \cos \phi o = 0$$

Berarti $\phi o = -90^{o}$ atau $+ 90^{o}$. Bila ditambahkan pada $\vec{r} = 0$ saat $t = 0$ medium sedang bergerak ke bawah, maka

$\phi o = -90 = -\frac{\pi}{2}$, sehingga fungsi gelombang menjadi

$$y = 0{,}5 \cos (k.r - \omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ cm}$$

$$= 0{,}5 \sin\{(i\tfrac{1}{2}\sqrt{3} + j\tfrac{1}{2})(\frac{2\pi}{2}).r - (2\pi)(60)t\}\text{cm}$$

dengan $\omega = 2\pi f = (2\pi)(60)$ radial/detik, dan $\vec{r}$ dalam cm.

3.2. GERAK MEDIUM PADA GELOMBANG AIR.

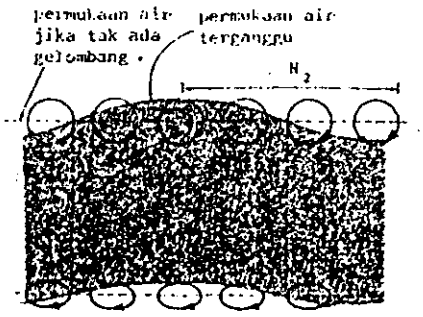
Jika kita perhatikan gerak suatu benda yang terapung di permukaan air, pada waktu adal gelombang lewat, maka benda tersebut tampak bergerak vertikal.

Jadi gerak medium adalah tegak lurus dengan arah pen-jalaran. Sebetulnya gerak molekul air karena gelombang tidaklah vertikal, akan tetapi membentuk jejak yang ter-tutup seperti tampak pada gambar 3.5. Tampak bahwa molekul air pada permukaan bergerak dalam lingkaran, jadi bukan dalam suatu garis vertikal seperti halnya pada gelombang tali.

Pada umumnya, amplitudo gerakan molekul adalah makin kecil bila makin dalam letak molekulnya. Kapal selam yang berada di dasar laut tidak merasakan goncangan ombak di permukaan laut. Gelombang di permukaan air sangatlah sulit dianalisa secara matematik. Kecepatan jalar gelombang

permukaan air ini berhubungan dengan tegangan permukaan, tekanan hidrostatik, kedalaman dasar, rapat massa, dan gaya berat. rumus kecepatan jalar di berikan oleh persamaan (3.2)

$$v = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi}\right) + \left(\frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}\right) \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} \qquad 3.2$$



Gambar 3.5 Penggesekan molekul-molekul karena gerak gelombang pada permukaan air.
(Sears-Zemansky. 1985 ; 502)

dimana g = percepatan grafitasi, λ = panjang gelombang, γ = tegangan permukaan zat cair, ρ = rapat massa zat cair, dan h = jarak permukaan ke dasar cair, sedangkan fungsi

$\tanh x = \dfrac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}}$ dan e = 2,72 adalah bilangan natural.

Fungsi tangen hiperbolikus (tanh) ini berpengaruh, jika h mempunyai harga sekitar panjang gelombang. Jadi pada harga kedalaman h ini, kecepatan jalar gelombang bergantung pada kedalaman dasar zat cair.

Fungsi tanh x mempunyai harga sama dengan nol untuk x = 0, bertambah besar dengan x, dan untuk harga x >> 1 fungsi ini mendekati harga sama dengan satu. Jadi pada daerah h tidak terlalu besar terhadap panjang gelombang, makin

tinggi permukaan air dari dasar, jalar gelombang itu makin besar kecepatanya. Untuk, harga h >>1, kecepatan jalar gelombang tidak bergantung pada h lagi.

Untuk 2π h/λ >>1, maka tanh 2π h/λ $\simeq$1, sehingga kecepatan jalar gelombang dapat ditulis sebagai

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}} \qquad 3.3$$

Untuk harga panjang gelombang yang besar sekali, dimana suku kedua pada persamaan (3.3) dapat diabaikan, kecepatan jalar gelombang diberikan oleh

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{\rho\pi}} \qquad 3.4$$

Dalam hal ini kecepatan jalar gelombang tidak bergantung pada macam zat cairnya lagi. Gelombang semacam ini disebut gelombang *gravitas*. Untuk gelombang semacam ini makin besar λ, makin cepat penjalarannya. Jika panjang gelombang λ kecil maka suku pertama pada persamaan 3.3 dapat diabaikan, dan kita peroleh kecepatan jalar gelombang

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}}$$

Gelombang semacam ini disebut *riak*. Gelombang ini adalah ombak yang tampak jika ada angin kecil meniup permukaan air, atau gelombang yang terjadi dalam tangki riak.

Untuk semua hal di atas, kita lihat bahwa kecepatan jalar gelombang bergantung pada pajang gelombang λ. Hal ini ada hubungannya dengan sifat dispersi cahaya oleh prisma.

Medium, dimana kecepatan gelombang bergantung pada panjang gelombang dikatakan bersifat dispersif.

3.3. PEMANTULAN DAN PEMBIASAN PADA GELOMBANG AIR

Pada permukaan air, suatu gelombang yang datang pada suatu perbatasan, yaitu suatu perobahan kedalaman zat cair dengan batas tegas, juga akan mengalami hal yang serupa dengan geloombang pada tali. Setelah gelombang datang sampai pada batas sambungan, maka gelombang ini akan terpecah menjadi dua gelombang, gelombang pantul (refleksi) dan gelombang yang diteruskan (transmisi). Berhubung disini medium gelombang berdimensi dua, maka terjadi hal yang baru; ternyata arah jalar gelombang yang diteruskan (gelombang transmisi) pada umumnya lain dengan arah gelombang datang. kecuali jika arah jalar gelombang datang adalah tegak lurus pada perbatasan.

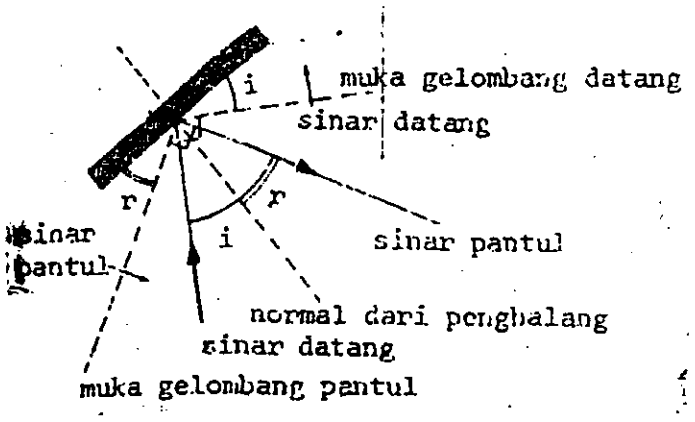
Marilah kita perhatikan suatu pulsa gelombang lurus pada permukaan air. Ingat, gelombang lurus berarti gelombang dengan muka gelombang berupa garis lurus. Arah jalar atau sinar dari gelombang mempunyai arah tegak lurus pada muka gelombang ini. Pandanglah suatu pulsa lurus yang menjalar keluar dari sumbernya menuju dinding tanki di seberang. Sebagai pemantul kita pergunakan suatu penghalang berupa penggaris di tengah-tengah tangki. Penggaris ini kita letakkan sejajar dengan muka gelombang. Pulsa lurus yang datang pada penggaris akan dipantulkan kembali seperti halnya gelombang pulsa pada tali. Sekarang marilah kita ubah

arah dari penggaris ini sehingga tidak lagi sejajar dengan muka gelombang. Dalam gambar terlihat dua pulsa garis, yang satu bergerak ke arah penghalang dan yang lain adalah pulsa yang dipantulkan. Sudut yang dibuat antara muka gelombang pulsa datang dengan penggaris diberi nama i`, Sedang sudut antara pulsa refleksi dengan peng-halang disebut r`.

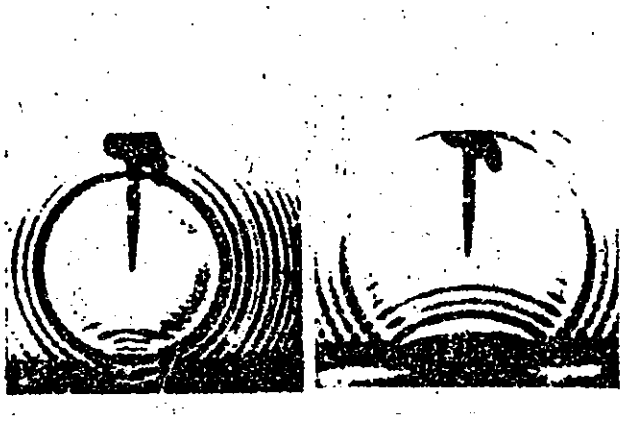
Gambar 3.6. Muka gelombang lurus datang membuat sudut i` dengan penghalang. Muka gelombang pantul membuat sudut r`.

Dalam gambar (3.6) dapat diukur bahwa r` = i`. Jika percobaan ini diulangi kita akan selalu mendapatkan bahwa r` = i`. Hasil ini mirip dengan yang didapat jika cahaya dipantulkan oleh cermin. Dalam gambar (3.7) ditunjukkan bahwa sudut antara muka gelombang dengan penghalang adalah sama dengan sudut antara *sinar gelombang* dengan garis normal pada penghalang. *Suatu pulsa lingkaran* (muka gelombang berbentuk lingkaran), juga dapat dipantulkan oleh penghalang lurus pada gambar 3.8. Kita lihat bahwa pulsa yang dipentulkan juga mempunyai bentuk lingkaran . Pusat dari lingkaran pantul ini adalah pada titik P´. yang terletak di belakang penghalang pada jarak yang sama dengan dengan jarak

sumber P pada gelombang. Gelombang pantul seolah-olah datang dari titik P'



Gambar 3.7. Dari pengamatan pada gelombang air dalam tanki riak disimpulkan bahwa sudut datang i sama dengan sudut datang r.

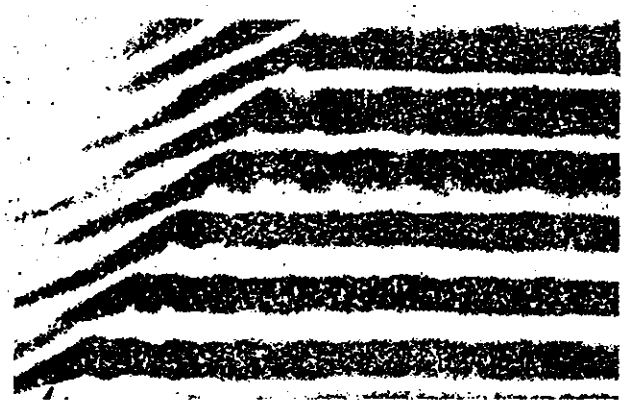


Gambar 3.8. Gelombang lingkaran dipantulkan oleh penghalang.

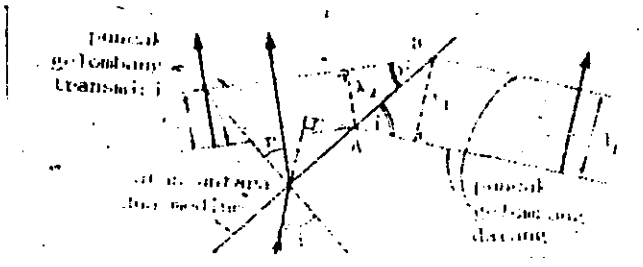
Pembiasan gelombang pada permukaan air akan terjadi jika gelombang datang tiba pada perbatasan antara dua medium yang berlainan. Sudah disebutkan di depan bahwa laju penjalaran dari gelombang bergantung dari sifat mediumnya. Dalam hal gelombang pada permukaan air, laju penjalaran bergantung pada dalamnya air. Jadi air dengan kedalaman yang berbeda dapat dianggap sebagai dua medium yang berbeda. Ini adalah suatu sifat yang penting, sebab hanya dengan merubah kedalam air pada bagian dari tangki riak, kita dapat mempelajari sifat-sifat penjalaran gelombang dari suatu medium ke medium lain. Untuk membuat agar dalam tanki riak terdapat dua medium gelombang, pada dasar dari tanki riakkita taruh suatu plat kaca yang tebal. Untuk mudahnya kita pasang sedemikian hingga perbatasan medium adalah sejajar dengan muka gelombang. Ingat bahwa frekwensi gerak gelombang dalam kedua medium adalah sama. hal ini karena frekwensi getaran dalam kedua medium harus sama dengan frekwensi getaran sumber. Karena kecepatan jalar dari gelombang dalam kedua medium ini berlainan, maka panjang gelombang dalam medium juga akan berlainan. Frekwensi f untuk kedua medium adalah sama, maka kita dapatkan

$$\lambda_1 : \lambda_2 = v_1 : v_2$$

Gambar 3.9. Panjang Gelombang λ_1 lebih besar dari panjang gelombang λ_2 berarti $v_1 > v_2$
(Sutrisno. 1984 ; 54)



Gambar 3.10. Gelombang lurus datang miring pada batas dua medium
(Sutrisno. 1984 ; 54)



Gambar 3.11. Lukisan pembiasan gelombang lurus yang datang miring pada batas dua medium.
(Sutrisno. 1984; 54)

Sekarang mari kita lihat hasil pemotretan pada tangki riak dalam gambar (3.9) dimana garis putih menyatakan puncak dari gelombang air. Kita lihat bahwa λ_1, yaitu panjang

gelombang pada daerah yang dalam, adalah lebih besar dari pada panjang gelombang λ_2 pada daerah yang dangkal. Dari hubungan di atas tampak bahwa gelombang pada permukaan air bagian dalam (λ_1) mejalar *lebih cepat* daripada bagian yang dangkal (λ_2). marilah kita ulangi percobaan kita dengan sedikit perubahan. Batas dari kedua medium dibuat agar membentuk sudut dengan muka gelombang. Sekarang kita sudah tahu bahwa panjang gelombang pada daerah yang dangkal adalah lebih pendek dari pada panjang gelombang pada daerah yang dalam. Akan tetapi perubahan yang terjadi bukan hanya ini, gelombangnya tetap besifat sebagai gelombang yang lurus hanya arah jalarnya berubah. Arah yang baru ini lebih mendekati garis normal terhadap perbatasan. Untuk menentukan arah gelombang yang diteruskan atau dibiaskan, kita lukiskan lagi gambar (3.11). Dari gambar (3.11) dapat segerah diambil kesimpulan bahwa :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Harga sin i dan sin r berubah dari suatu percobaan dengan yang lain tetapi hasil baginya sin i/ sin r adalah te-tapan, tidak bergantung pada sudut datang i. Jadi :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12}$$

Ini tidak lain adalah hukum Snellius untuk pembiasan gelombang. Tetapan $n_{12} = v_1/v_2$ disebut indeks bias.

BAB. 4

GELOMBANG BUNYI

Manusia sebagai makluk yang sempurna mempunyai panca indera, salah satu diantaranya adalah telinga yang ber-fungsi untuk mendengar bunyi yang ada disekitarnya.

Bunyi merupakan gelombang mekanik longitudinal yang dapat menjalar dalam medium padat, cair dan gas. Medium gelombang bunyi ini adalah berupa molekul dari medium ter-sebut. Jika terjadi gangguan gelombang bunyi yang bersifat longitudinal, maka molekul melakukan gataran dalam arah yang sejajar dengan arah penjalaran.

Jika gangguan ini sampai ketelinga manusia maka sela-put gendang telinga bergetar, dan getaran ini diubah menja-di denyut listrik yang disampaikan oleh syaraf pendengar ke-otak.

Bunyi dihasilkan oleh benda-benda yang bergetar dan benda-benda ini disebut sumber bunyi. Gelombang bunyi yang dapat menimbulkan rangsangan mendengar pada telinga manusia mempunyai batas frekwensi antara 20 Hertz sampai dengan 20000 Hertz, hal ini disebut dengan batas pendengaran.
Gelombang bunyi yang mempunyai frekuensi dibawah batas frekuensi pendengar manusia desebut gelombang infrasonik (infrasonik wave) dan gelombang bunyi yang mempunyai frekuensi diatas batas frekuensi pendengaran manusia disebut gelombang ultrasonik (ultrasonik wave).

Gelombang bunyi adalah gelombang tiga dimensi, kerena medium gelombangnya bersifat tiga dimensi.

Jadi gelombang dapat menjalar didalam ruang tiga dimensi. Jika sumber bunyi merupakan titik akan menghasilkan gelombang bola (sferis), sedanngkan sumber bunyi merupakan plat yang bergetar menghasilkan gelombang datar.

4.1. KECEPATAN RAMBAT BUNYI

Kita mengetahui udara atau gas pada umumnya tidak dapat melawan perubahan bentuk. Oleh sebab itu dalam medium ini tidak mungkin terjadi gelombang geser atau gelombang transversal. Medium udara atau gas ini mempunyai respon terhadap kompresi volume. Pada tekanan (p) tertentu besarnya respon ini ditentukan oleh Modulus Bult (K).Pada keadaan setimbang besarnya K dapat ditentukan dengan persamaan :

$$K = \rho_o \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_o \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 1$$

Karena $\rho = \frac{m}{V}$, maka :

$$d\rho = - \frac{m^2}{V^2} dV \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 2$$

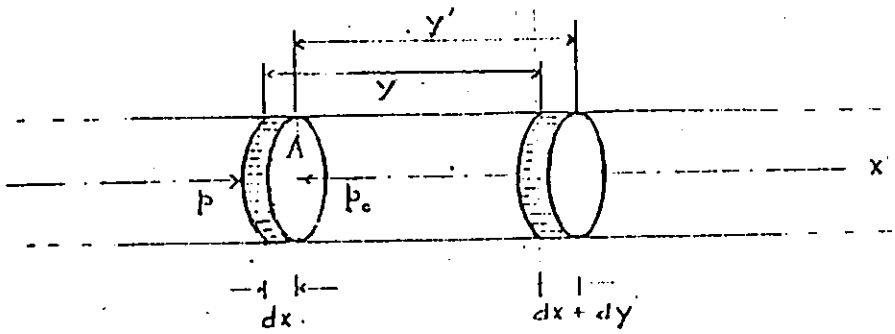
$$K = \rho_o \left(\frac{dp}{d\rho}\right) \times \left(\frac{- V^2}{m^2}\right)_o$$

$$= - V_o \left(\frac{dp}{dV}\right)_o \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 3$$

Modulus K akan selalu berharga positif karena dp/dV selalu negatif.

Sebuah tabung yang berisi udara seperti dalam gambar 4-1, pada keadaan setimbang tekanan yang bekerja pada kedua sisi elemen volume udara p_o dan kerapatan masanya ρ_o. Akibat

dari gangguan luar, tekanan yang bekerja pada sis kiri dan kanan berubah menjadi p dan p_o



Gambar 4-1 : Pergerasan dan perubahan dimensi elemn volume udara dalam tabung fiktif yang diambil searah gaya gangguan.
(ALONSO/FINN. 1983;304).

Perbedaan tekanan menimbulkan 2 macam perubahan yaitu :

a. Pergeseran kedudukan kedua sisi elemen udara masing-masingnya dari x ke x + y dan dari x + dx ke x + y' = x + y + dy

b. Perubahan tebal elemen volume dari dx menjadi dx + dy, rapat massa ρ_o berubah menjadi ρ

Menurut hukum kekekalan massa :

$$\rho A (dx + dy) = \rho_o A\, dx \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 4$$

Atau

$$\rho = \frac{\rho_o}{1 + dy/dx} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 5$$

Jika dy/dx << 1

Maka persamaan 4-5 menjdi :

$$\rho = \rho_o (1 - dy/dx) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 6$$

Atau :

$$\frac{\rho_o - \rho_o}{\rho_o} = - \frac{dy}{dx} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 7$$

Pada umumnya proses gerak gelombang dalam udara bersifat adiabatik, dan berlaku hubungan :

$$p\, V^{\gamma} = p_o\, V^{\gamma}$$

$$p = (p_o V_o^{\gamma}) V^{-\gamma} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 8$$

$$\gamma = {}^{c}p/{}^{c}v$$

Karena m harganya tetap dan $V^{\gamma} = (\rho/m)^{-1}$, p dapat dipandang sebagai fungsi ρ. Untuk pentederhanaan persamaan 4-6, kita dapat mengabaikan harga $(\rho - \rho_o)^2$, dalam turunan deret Tailor untuk p disekitar ρ_o. Sehingga diperoleh :

$$p = p_o + (\rho - \rho_o) \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_o \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 9$$

dengan mensubsitusikan persaman 4-1, maka persamaan ini menjadi :

$$p = p_o + K (\rho - \rho_o) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 10$$

kemudian persamaan 4-7 disubsitusikan kepersamaan 4-10, didapatkan :

$$p = p_o - K \frac{dy}{dx}$$

atau :

$$p = p_o - K \frac{dy}{dx} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 11$$

dari persamaan ini dapat diperoleh hubungan :

$$\frac{dp}{dx} = K \frac{d^2 y}{dx^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 12$$

Persamaan gerak elemen medium bermassa dan dalam gam-bar 4-1, menurut Hukum II Newton adalah sebagi berikut :

$$dF = (dm)\, a \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 13$$

$$dm = \rho_o A\, dx$$

jika dalam waktu t pergeseran pusat massa sama dengan 1/2 (1 + y) = y, maka percepatan pusat elemen :

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Resultan gaya pada elemen udara dalam arah +x adalah :

$$dF = A\ dp \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 14$$

dimana :

$$dp = p\ (x + dx) - p(x) = \frac{\partial p}{\partial x}\ dx \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4 - 15$$

beradasarkan persamaaan 4 - 12 :

$$dF = A\ K\ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\ dx \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 16$$

Subsitusikan ungkapan dF, dm dan a kedalam persamaan (4-13) akan didapatkan persamaan gelombang bebas satu dimensi :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\rho_o}{K}\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{1}{v^2}\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 17$$

maka kecepatan jalar bunyi :

$$v = K/\rho_o \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 18$$

Karena volume V merupakan fungsi tekanan p dan $V = m/\rho$, maka persamaan 4-8 menjadi :

$$p = \gamma\ p_o\ \rho^{-\gamma}\ \rho^{\gamma} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 19$$

Jika didefferensialkan terhadap ρ, persamaan ini menjadi :

$$\left| \frac{dp}{d\rho} \right| = \gamma\ p_o\ \rho_o^{-\gamma}\ \rho^{\gamma-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 20$$

dan

$$\left| \frac{dp}{d\rho} \right|_o = \gamma\ p_o\ \rho_o^{-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 21$$

Jika persamaan 4-21 disubsitusikan kedalam persamaan (4.1) maka :

$$K = \rho_o \left| \frac{dp}{d\rho} \right|_o$$

$$= \rho_o \gamma p_o \rho_o^{-1}$$

$$= \gamma p_o \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 22$$

dengan demikian, persamaan kecepatan jalar bunyi dari persamaan 4-18 menjadi :

$$v = \gamma p_o/\rho_o \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 23$$

Pada keadaan standar uyntuk udara diketahui :

p_o = 1 atm = $1{,}01 \times 10^6$ dyne/cm^2

$$\rho_o = \frac{29 \text{ gram/mole}}{2{,}24 \text{ liter/mole}} = 1{,}29 \times 10^{-3} \text{ gram/cm}^3$$

γ = 1,4

dengan p_o, ρ_o dan γ diatas, maka diperoleh kecepatan rambat bunyi udara :

$$v = \sqrt{\gamma p_o/\rho_o}$$

$$v = \sqrt{1{,}4 \ (1{,}01 \times 10^6 / \ 1{,}29 \times 10^{-3})}$$

$$v = 332 \text{ m/det}$$

Bila gas terdiri dari n mol pada suhu t dapat memenuhi persamaan gas ideal :

$$p V = n R T \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.24$$

Kemudian dengan mensubsitusikan persamaan 4-23, ρ = m/V dan n = n/m, kedalam persamaan 4-24 diperoleh :

$$p = \rho \frac{R\,T}{M} \text{ atau } p_o = \rho_o \frac{R\,T}{M} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 25$$

dimana M = jumlah gram mole, R = konstanta gas umum. Dengan

mensubsitusikan persamaan 4-25 kedalam persamaan 4-23 didapatkan kecepatan rambat bunyi :

$$v = \gamma \frac{R\ T}{M} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 26$$

4.2 GELOMBANG BUNYI SEBAGAI VARIASI SIMPANGAN DAN TEKANAN

Dengan adanya gelombang bunyi pada arah longotudinal akan terjadi pergesaran molekul gas yang harganya sebagai fungsi posisi setimbang dari molekul (x) dalam waktu t dan fungsi gelombangnya :

$$y = y_m \cos (kx - wt) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 27$$

y_m = Amplitudo getaran.

k = bilangan gelombang

w = frekuensi sudut

Jika dp menyatakan perubahan tekanan gas, karena adanya gengguan gelombang bunyi maka dp dihubungkan dengan perubahan volume relatif dV/V oleh modulus benda K, diperoleh

$$dp = - K\ (dV/V)$$

$$= - K \frac{A\ dy}{A\ dx}$$

$$dp = - K \frac{dy}{dx} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 28$$

dari persamaan 4 - 27 diperoleh :

$$\frac{dy}{dx} = - k\ y_m \sin (kx - wt)$$

maka persamaan 4-28 menjadi :

$$dp = K\ k\ y_m \sin (kx - wt) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 29$$

bila perubahann tekanan dp dinyatakan sebagai p dan $v = \sqrt{K/\rho_o}$ dirobah menjadi $K = v^2/\rho_o$ maka persamaan 4-29 dapat ditulis dalam bentuk :

$$p = k\ \rho_o\ v^2\ y_m \sin (kx - wt) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4 - 30$$

Persamaan ini merupakan persamaan gelombang tekanan dengan

amplitudo tekanan.

$$p_m = k \rho_o v^2 y_m \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 31$$

4.3 PEMANTILAN DAN TRANSMISI BUNYI PADA BIDANG BATAS ANTARA MEDIUM

Gelombang bunyi yang merambat dalam gas, jika sampai pada bidang batas dengan medium lain dapat mengalami pemantulan dan transmisi.

Pemantulan gelombang bunyi akan terjadi bila medium gas berbatasan dengan medium yang bersifat memantulkan seperti dinding tembok, lereng gunung dan dinding goa.

Sesuai dengan teori gelombang Huygens, gelombang bunyi yang datang pada batas akan dipantulkan sedemikian rupa sehingga sudut datang sama dengan sudut pantul.

Bila jarak antara sumber bunyi dengan dinding yang memantulkan tidak terlalu jauh maka pantulan gelombang bunyi dapat bersuperposisi dengan gelombang datang se-hingga dapat memperkuat bunyi asli. Seandainya gelombang bunyi yang dipantulkan hanya sebahagian yang bersuper-posisi dengan gelombang datang, hal ini ,menyebabkan bunyi asli tidak jelas dan peristiwa ini disebut gaung (kerdam).

Untuk menghindari terjadinya kerdam ini, dinding-dinding ruang yang besar yang bersifat memantulkan, harus dilapisi dengan bahan yang bersifat dapat meredam gelombang bunyi seperti karton, karet, busa, wol dan sebagainya. Jika gelombang bunyi dipantulkan oleh dinding yang jaraknya besar dari 17 m dari sumber bunyi, maka bunyi pantul akan

terdengar beberapa saat setelah bunyi aslinya, peristiwa ini disebut dengan gema.

Gelombang bunyi yang merambat dalam gas pada bidang batas dengan medium lainnya ditransmisikan bila medium tersebut tidak bersifat memantulkan atau menyerap gelombang. Gelombang bunyi yang ditransmisikan merambat dengan suatu kecepatan v yang besarnya tergantung pada modulus elastis medium dan massa jenis medium. Bila me-diumnya adalah zat cair, maka kecepatan rambat gelombang bunyi memenuhi persamaan :

$$v = \sqrt{K/\rho} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 32$$

Sedangkan untuk medium yang berypa batang padat, kecepatan rambat gelombang bunyi memenuhi persamaan :

$$v = \sqrt{y/\rho} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4 - 33$$

dimana :

K = Modulus Bulk.

y = mudulus Young.

ρ = Massa jenis atau rapat massa medium.

4.4 SUPERPOSISI GELOMBANG BUNYI

Bila gelombang bunyi atau lebih merambat dalam satu medium dalam waktu yang bersamaan, maka akan terjadi peng-gabungan (penjumlahan) gelombang yang disebut superposisi. misalkan dua buah gelombang yang mempunyai frekuensi, amplitudo sama menjalar pada arah dan kecepatan yang sama pula, sedangkan fasenya berbeda. fungsi untuk kedua gelom-

bang ini dapat dinyatakan sebagai :

$$y_1 = y_m \sin (kx - wt - \phi_{01})$$

$$y_2 = y_m \sin (kx - wt)$$

Menurut prinsip superposisi gelombang, jika ada dua gelombang dalam satu medium, maka gangguan total pada masing-masing gelombang. Dengan demikian simpangan total dari superposisi kedua gelombang adalah :

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = y_m \sin (kx - wt - \phi_{01}) + y_m \sin (kx - wt)$$

$$= y_m \sin (kx - wt - \phi_{01}) + \sin (kx - wt)$$

$$= y_m (2 \sin \tfrac{1}{2}(kx-wt-\phi_{01}+kx-wt)\cos\tfrac{1}{2}(kx-wt-\phi_{01}-kx+wt))$$

$$= 2\, y_m(2 \sin \tfrac{1}{2}(2kx-wt-\phi_{01}) \cos \tfrac{1}{2} (-\phi_{01}))$$

$$= 2\, y_m (\sin (kx-wt-\frac{\phi_{01}}{2}) \cos \frac{\phi_{01}}{2})$$

$$= 2\, y_m \cos \frac{\phi_{01}}{2} \sin (kx-wt-\frac{\phi_{01}}{2})$$

Hasil superposisi gelombang ini:

$$y = y_1 + y_2$$

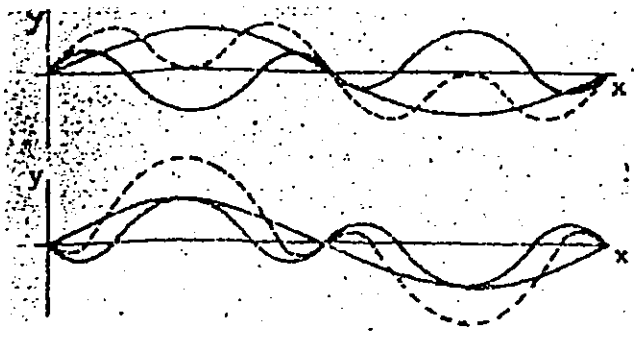
$$= y_m \sin (k_1x - w_1t) + y_m \sin (k_2x - w_2t)$$

$$= y_m \cos (\frac{k_1-k_2}{2} x - \frac{w_1-w_2}{2} t) \sin(\frac{k_1-k_2}{2} x - \frac{w_1-w_2}{2} t) \quad \ldots\ldots 4.34$$

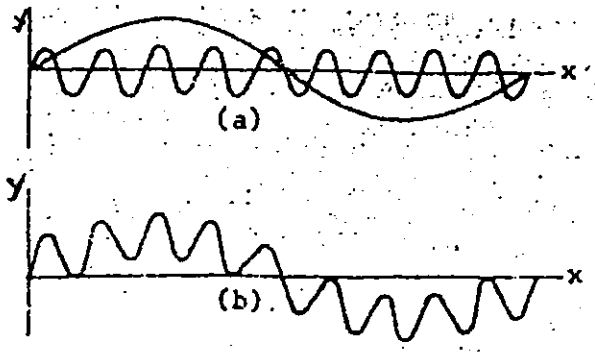
Hasil superposisi dari gelombang y_1 dan y_2 adalah suatu gelombang sinus dengan amplitudo $2\, y_m \cos \frac{\phi_{01}}{2}$ dan pebedaan sudut fase $\frac{\phi_{01}}{2}$, jika beda sudut fase gelombang y_1 dan ϕ_{01} sangat kecil maka harga $\cos \frac{\phi_{01}}{2}$ cos 0=1, sehingga resultan amplitudo $2\, y_m \cos \frac{\phi_{01}}{2} = 2\, y_m$. Dengan demikian superposisi dari dua gelombang yang mempunyai frekuensi amplitudo dan fase sama akan saling memperkuat, hal ini disebut superposi-

si bersifat konstruktif, jika beda sudut fase $\phi_{01}=180^{o}$, maka $\cos \frac{\phi_{01}}{2} = \cos 90^{o} = 0$, sehingga resultan amplitudo gelombang = 0 . Jadi superposisi dari 2 buah gelombang yang mempunyai frekuensi dan amplitudo yang sama, tetapi fasenya berlawanan (berbeda 180°) akan saling meniadakan disebut superposisinya bersifat destruktif.

Jika dua gelombang bunyi dengan frekuensi berlainan dijumlahkan hasilnya suatu gelombang yang bentuknya berubah menurut fungsi waktu, gelombang yang diperoleh tidak lagi merupakan bentuk sinus seperti gambar 3-3 dan 3-4 :



Gambar 4-2 : Jumlah kedua gelombang dengan frekuensi berbanding 3:1, menghasilkan gelombang (garis putus-putus) yang bentuknya bergantung pada hubungan fasa antara gelombang komponen. (seri fisika Dasar gelombang dan Optik, 1984. 35)



Gambar 4-3 : a. dua gelombang dengan frekuensi yang jauh berbeda dijumlahkan
b. Hasil superposisi.
(seri fisika Dasar gelombang dan Optik, 1984. ;35)

Terlihat hasil superposisinya bukan merupakan fungsi sinus dan bentuknya bergantung pada hubungan fase antara kedua komponan gelombang. Misalnya 2 gelombang y_1 dan y_2 merambat dalam suatu medium dengan kecepatan sama dan amplitudonya sama. Gelombang y_1 mempunyai sudut w_1 dan bilangan gelombang k_1 sedangkan gelombang y_2 mempunyai frekuensi sudut w_2 dan bilangan gelombang k2 maka y_1 dan y_2 dapat ditulis :

$y_1 = y_2 \sin (k_1x - w_1t)$; $y_2 = y_m \sin (k_2x - w_2t)$

Hasil superposisi kedua gelombang ini :

$y = y_1 + y_2$

$= y_m \sin (k_1x - w_1t) + y_m \sin (k_2x - w_2t)$

$$= 2y_m \cos \left(\frac{k_1 - k_2}{2} x - \frac{w_1 - w_2}{2} t\right) \sin \left(\frac{k_1 - k_2}{2} x - \frac{w_1 - w_2}{2} t\right) \quad \text{.....} \quad 4\text{-}35$$

Jadi hasil penjumlahan dua gelombang sinus memberikan suatu gelombang dengan fungsi gelombang tidak berbentuk sinus lagi. Jika Jika frekwensi kedua gelombang y_1 dan y_2 hampir sama besarnya maka dapat ditulis :

$$w_1 = w + \Delta w \quad ; \quad w_2 = w$$

$$k_1 = k + \Delta k \quad ; \quad k_2 = k$$

sehingga :

$$\frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{2w + \Delta w}{2} = w$$

$$\frac{k_1 + k_2}{2} \simeq k$$

$$\frac{w_1 - w_2}{2} \simeq \frac{\Delta w}{2}$$

$$\frac{w_1 - w_2}{2} \simeq \frac{\Delta w}{2}$$

Persamaan 4.34 dapat ditulis :

$$y = 2y_m \cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta w}{2}t\right) \sin\ (kx - wt) \quad \ldots\ldots 4.36$$

Didapatkan suatu gelombang sinus dengan sudut fase (kx-wt) dengan amplitudo berobah-robah dengan waktu dan tempat yaitu

$$A_o = 2\ y_m \cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta w}{2}t\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4.37$$

Hasil superposisi kedua gelombang ini akan terdengar berobah-robah kerasnya secara periodik peristiwa ini disebut pelayangan gelombang.

Gelombang superposisi dapat dipandang memiliki frekwensi sudut w dan bilangan gelombang k sebagai gelombang pembawa (carrier wave) yang amplitudonya $2y_m \cos\left(\frac{\Delta k}{2}x \quad \frac{\Delta w}{2}t\right)$. Karena amplitudo gelombang superposisi juga merupakan fungsi gelombang disebut gelombang modulasi. Jadi gelombang superposisi terdiri dari gelombang pembawa yang fungsi gelombang sin (kx-wt) ditumpangi oleh gelombang modulasi dengan fungsi gelombang cos (Δkx-Δwt). Frekwensi layangan yang dihasilkan merupakan dua kali frekwensi gelombang modulasi yaitu

$$w_L = 2\left(\frac{\Delta w}{2}\right)$$

$$w_L = 2\left(\frac{\Delta w}{2}\right)$$

$$w_L = 2\left(\frac{w_1 - w_2}{2}\right) \ ; \ w_l = w_1 - w_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4.37$$

Perlayangan dapat dipergunakan untuk mengukur frekwensi gelombang bunyi yang tidak dikertahui, misalnya suatu nada murni yang merupakan fungsi sinus frekwensinya belum diketahui dan dapat diubah-ubah bila dibunyikan bersama dengan nada tersebut, maka kita akan mendengar pelayangan . Frekwensi layangan yang terjadi dapat ditentukan dengan

mengukur beda waktu antara 2 bunyi keras dari polayangan yang terjadi.

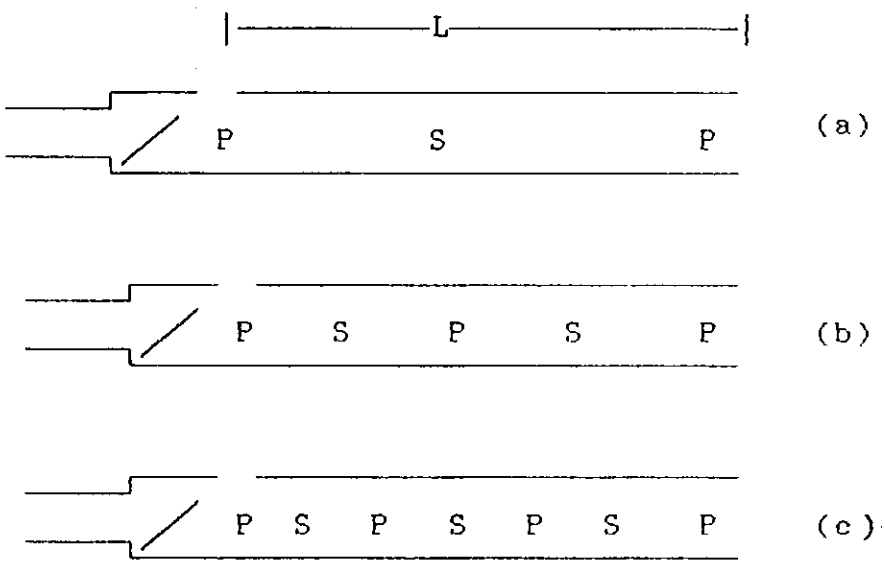
4.5. RESONANSI GELOMBANG BUNYI

Bila suatu benda yang dapat bergetar bekerja serentetan impuls berkala yang frekwensinya sama dengan salah satu frekwensi alami getaran benda itu, maka akan timbul padanya getaran yang amplitudonya relatif besar, gejala ini disebut resonansi.

Gejala resonansi dapat diperlihatkan berdasarkan gelombang longitudinal yang ditimbulkan di udara oleh garputala yang bergetar. Jika dua buah garputala mempunyai frekwensi sama diletakkan berdekatan, kemudian salah satunya diketuk, maka akan terdengar bunyi garputal yang satu lagi. Jika garputal yang I diredam tiba-tiba dengan cara memegangnya, kemudian dilakukan dengan cara yang sama dengan dua buah garputala yang berbeda frekwensinya ternyata garputala yang kedua tidak terdenganr bunyyinya, hal ini membuktikan tidak terjadi peristiwa resonansi.

Dalam kehidupan sehari-hari terjadinya resonansi udara dijumpai pada pipa organa. Bunyi yang terjadi pada pipa organ berasal dari kolom udara yang bergetar. Pipa organa dapat dibedakan atas pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup. Pipa organa terbuka yaitu : pipa organa yang mempunyai ujung terbuka.

Pada saat pipa organ ditiup aliran udara yang diarahkan pada pinggiran lobang di salah satu ujung pipa, menimbulkan getaran udara dan resonansi dari kolom udara dalampipa yangkemudian membentuk gelombang longitudinal yang berdiri. Dalam hal ini frekwensi nada dasar f_1 yang bersesuaian dengan terbentuknya perut (P) gelombang berdiri pada tiap ujung dan sebuah simpul (S) ditengahnya. Seperti terlihat pada gambar (4.4a) :



Gambar 4.4 : Cara bergetar pipa terbuka organ

Bila panjang pipa = L , maka panjang gelombang berdiri :
$\lambda_1 = 2\ L$ dan diperoleh $f_1 = \frac{v}{2L}$ dimana v = kecepatan rambat bunyi di udara. Pipa akan menghasilkan nada atas pertama bila dalam pipa terbentuk perut (P), simpul (S) seperti gambar (4.4b) dimana panjang gelombangnya :

$\lambda = L$, dan diperoleh

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

Kemudian pipa akan menghasilkan perut (P) dan simpul (S) seperti gambar (3.1c). Dimana panjang gelombangnya :

$$\lambda_3 = \frac{2}{3} L \text{ , dan diperoleh}$$

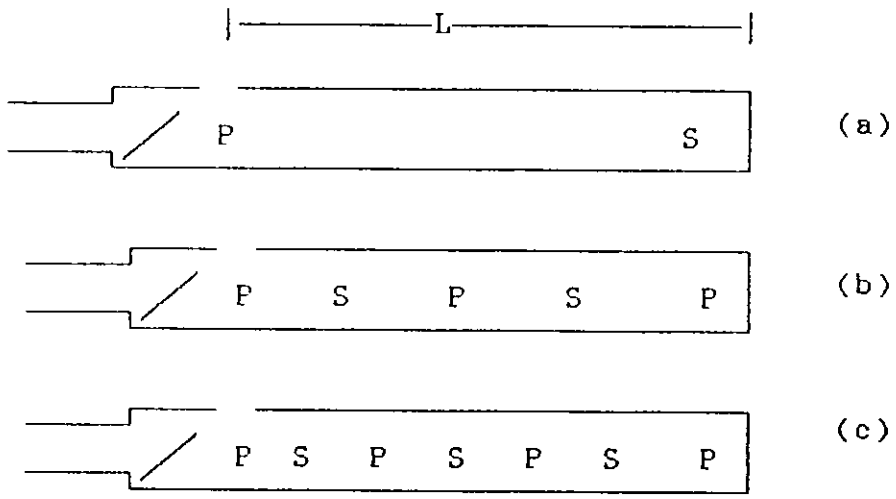
$$f_3 = \frac{v}{2/3\ L} = 3\ f_1$$

Dengan demikian secara umum organ terbuka dapat menghasilkan resonansi bunyi dengan frekwensi alami yang memenuhi persamaan :

$$f_n = \frac{n}{2L}\ v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.38$$

dimana n = 1,2,3

Pipa organ tertutup yaitu pipa organ yang ujungnya tertutup. Pada saat pipa organ tertutup ditiup, maka pada bagian ujung tertutupnya terbentuk simpul (S) dan pada ujung lainnya merupakan perut (P) simpul dari gelombang berdiri yang terbentuk dalam pipa . Jika ujung tertutup merupakan simpul (S) dan lobang pada ujung yang lain merupakan perut (P) seperti pada gambar (4.5a).



Gambar 4.5 : Cara bergetar pipa organ tertutup.

Sehingga panjang gelombang berdiri dalam pipa $\lambda_1 = 4\ L$, maka pipa akan menghasilkan nada dasar dengan frekwensi $f_1 = \frac{v}{4L}$, pipa akan menghasilkan nada atas pertama, bila dalam pipa terbentuk perut (P) dan simpul (S) seperti gambar (4.5b), sehingga panjang gelombang berdiri dalam pipa $\lambda_3 = \frac{4\ L}{3}$ dan frekwensinya

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

$$f_3 = 3f_1$$

Selanjutnya pipa akan menghasilkan nada atas ke dua, jika dalam pipa terbentuk perut (P) dan simpul (S), seperti pada gambar (4.5c), dimana panjang gelombang berdiri dalam pipa $\lambda_5 = \frac{4\ L}{5}$ dan frekwensinya

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

$$f_5 = 5\ f_1 .$$

Frekwensi-frekwensi yang dihasilkan pipa organa tertutup secara umum memenuhi persamaan :

$$f_n = \frac{n}{4\ L}\ v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.39$$

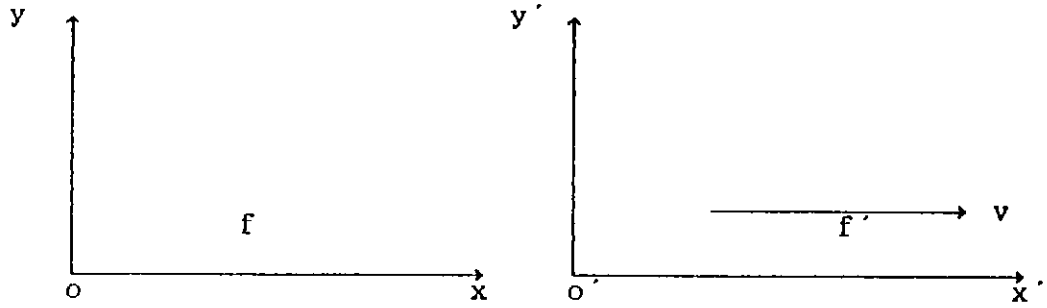
Dimana n merupakan bilangan ganjil (n=1,3,5,...). Resonansi kolom udara dalam bentuk lain dapat dijumpai pada alat musik seperti gitar, biola, dan lain-lain.

4.6. EFFEK DOPLER

Effek Dopler dalam bunyi adalah peristiwa perubahan frekwensi atau nada bunyi, karena adanya gerakan sember bunyi atau pendengar. Sebuah kereta api bergerak sambil membunyikan pluit bunyinya akan terdengar lebih nyaring sewaktu mendekati dan lebih rendah sewaktu menjauhi, jadi

frekwensi bunyi mengalami perobahan oleh adanya gerakkan, baik sumber bunyi maupun pendengar.

Ditinjau dua kerangka koordinat untuk melukiskan gerakkan sumber dan pendengar seperti gambar (4.6).



Gambar 4.6. Koordinat diam o dan bergerak o'

Misalkan pendengar yang tidak bergerak berada di koordinat diam o. Kereta api yang sedang bergerak ke kanan berada di koordinat o' dengan kecepatan v membunyikan pluit dengan frekwensi f'. Kecepatan bunyi dalam kereta api = v, maka di tempat bergerak o' : $\lambda' = v/f'$ atau $f' = v/\lambda'$ bila dilihat dari luar kecepatan bunyi akan dipengaruhi oleh gerakan, bertambah cepat atau bertambah lambat bergantung kepada arah gerakkan. jika arahnya menjauhi seperti gambar di atas maka kecepatan bunyi yang diamati di temapat diam adalah :

$v_o = v - \mu$, sedangkan frekwensi bunyi yang didengar di o adalah

$$f = \frac{v_o}{\lambda} = \frac{v - \mu}{\lambda} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.40$$

Karena panjang gelombang bunyi tidak dipengaruhi oleh gerakan, maka besarnya sama dengan di tempat bergerak maupun sewaktu sampai di tempat pendengar, hanya datangnya mengalami kelambatan, maka $\lambda = \lambda'$, persamaan 4.40 dapat

ditulis :

$$f = \frac{v - \mu}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda'} \left(1 - \frac{\mu}{v} \right)$$

$$f = f' \left(1 - \frac{\mu}{v}\right)$$

Jika kereta api bergerak kekiri berarti mendekati ke o, maka kecepatan bunyi yang didengar di o bertambah yaitu

$$v_o = v + \mu$$

frekwensi yang didengar di temapt diam o adalah

$$f_o = \frac{v_o}{\lambda} = \frac{v + \mu}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda'} \left(1 + \frac{\mu}{v}\right)$$

$$f_o = f'\left(1 + \frac{\mu}{v}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.42$$

Dari persamaan (4.40) dan (4.42) secara umum Effek Dopler dapat ditulis :

$$f = f' \left(1 \pm \frac{\mu}{v}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.43$$

Sekarang bila orang di tempat diam membunyikan pluit dengan frekwensi f. Orang yang sedang berada dalam kereta api yang bergerak mendekat, merasa bahwa dia yang diam, sedangkan orang yang di luar bergerak mendekati dengan kecepatan μ. Dalam hali ini situasinya hampir sama dengan peristiwa di atas bahwa pendengar diam, sumbernya bergerak sehingga frekwensi yang diamati dari dalam kereta api yang bergerak menuju sumber diam dapat ditulis :

$$f' = f \,)1 \pm \frac{\mu}{v}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.44$$

Sewaktu kereta api menjauhi, tampak dari dalam kereta api, orang yang diam sambil membunyikan pluit bergerak menjauhi. Dengan demikian frekwensi bunyi yang terdengar di dalam kereta api yang sedang bergerak menjauhi dapat ditulis

$$f' = f \left(1 - \frac{\mu}{v}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.45$$

Secara umum persamaan effek dopler dapat ditulis :

$$f' = f\left(1 \pm \frac{\mu}{v}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.46$$

persamaan ini sama bentuknya dengan persamaan (4.43), jadi persamaan Effek Dopler adalah tetap, tidak bergantung kepada sumber bergerak atau pendengar.

Bila sumber bunyi mendekati pendengar tanda $\frac{\mu}{v}$ menjadi positif (+) dan bila sumber bunyi menjauhi pendengar maka tanda $\frac{\mu}{v}$ menjadi negatif (-).

Perbandingan perubahan frekwensi yang di dengar dengan frekwensi sumber disebut faktor pergeseran Dopler. dari persamaan (4-43) dapat diturunkan faktor pergeseran Dopler :

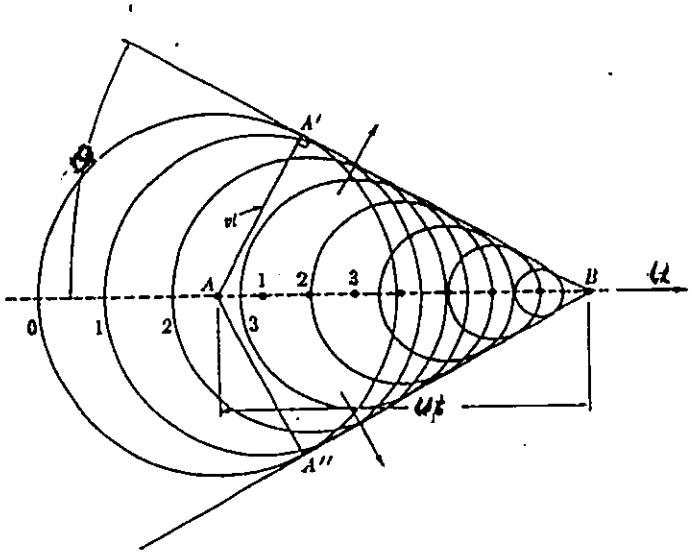
$$D = \frac{\Delta f}{f} = \frac{f' - f}{f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.47$$

Jika kecepatan gerak sumber = kecepatan bunyi v maka waktu mendekati $f' = 2f$ dan waktu menjauhi $f' = 0$. Dengan demikian pendengar tidak lagi mendengar bunyi dari sumber bergerak dengan kecepatan $\geq$ v. untuk sumber bunyi bergerak lebih dari kecepatan suara (340 m/det) disebut supersonik, biasanya dinyatakan dengan Mach, dimana 1 Mach = kecepatan suara.

Bila kecepatan sumber atau suatu pesawat melebihi 1 Mach akan terjadi kerucut Mach yang dibentuk oleh permukaan muka gelombang bunyi seperti gambar (3-7).

Pada saat t sesudah di pancarkan bunyi dari pesawat maka gelombang buyi berupa bola berjalan berjari-berjari $R = v.t$ dan pesawat sudah mencapai jarak $S = \mu.t$. Sudut Mach dinyatakan dengan Mach dengan θ dimana :

$$\sin\theta = \frac{v.t}{\mu.t} = \frac{v}{\mu} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4.48$$



Gambar 4.7. Pola gelombang dan muka gelombang yang terjadi jika sumber lebih cepat dari gelombang.

Makin besar kecepatan pesawat makin kecil sudut Machnya.

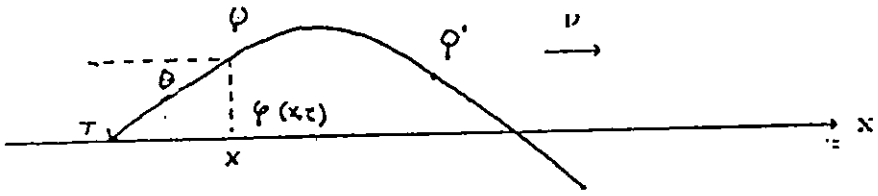
Pesawat terbang yang kecepatannya menca[ai beberapa Mach dapat menimbulkan ledakan sonik (Somk Boom), ledakan ini terjadi karena udara yang dilewati pesawat terbelah dengan cepat dan terjadi kekosongan udara dan kemudian diisi oleh udara sekitarnya, maka terjadilah benturan udara dan terdengar ledakkan yang keras.

BAB 5

DAYA DAN INTENSITAS PADA GERAK GELOMBANG

5.1. ARUS ENERGI

Gerak gelombang adalah peristiwa perambatan suatu gangguan lokal. Terjadinya gangguan pada titik tertentu berarti adanya masukan (input) energi pada titik medium tersebut. Karena itu, gerak gelombang juga merupakan perambatan energi yang berawal dari lokasi gangguan semula itu.



Gambar 5.1. Bentuk gelombang sinusoida yang menjalarkan masukan energi di x ke arah kanan.

Untuk perumusan yang konkrit, kembali kita tinjau gelombang sinusoida yang merambat ke kanan pada tali akibat suatu gaya sinusoida yang bekerja pada ujung kiri tali. Selanjutnya kita ambil titik sembarang Q seperti yang dilukiskan dalam gambar 5-1. Bagi medium di sebelah kanan Q, masukan energi ysang diterima berupa kerja yang dilakukan oleh gaya tegangan tali di sebelah kirinya. Mengingant bahawa gerak titik Q hanya berlangsung dalam arah vertikal, maka secara efektif gaya penggerak yang bersangkutan diungkapkan oleh:

$$F = -T \sin\theta$$

$$= -(T \cos\theta) \tan\theta$$

$$= -To \tan\theta$$

$$\simeq To \frac{\delta y}{\delta x} \qquad 5.1$$

Sebagai latihan, turunkan persamaan ini dengan mengambil titik Q′ sebagai ujung kiri tali. Selanjutnya <u>daya sesaat</u> yang diberikan kepada tali sebelah kanan adalah

$$P = \frac{\delta y}{\delta t} \qquad 5.2$$

Subsitusikan persamaan (5.1) untuk F pada persamaan (5.2) menghasilkan ungkapan :

$$P = \left(To \frac{\delta y}{\delta x}\right)\frac{\delta y}{\delta t} \qquad 5.3$$

Gelombang y(x-vt) yang menerima daya dari sebelah kiri dan menjalarkannya ke arah kanan akan memenuhi persamaan :

$$\frac{\delta \psi}{\delta x} = -\frac{1}{v}\frac{\delta y}{\delta t} \qquad 5.4$$

sehingga <u>besarnya</u> arus energi yang bersangkutan diungkapkan oleh rumus :

$$P = +\frac{To}{v}\left(\frac{\delta y}{\delta t}\right)^2 = To\ v\left(\frac{\delta y}{\delta x}\right)^2 \qquad 5.5$$

Rumus ini berlaku pula untuk gelombang y(x+vt) dengan pengertian arah yang berlawanan. Sebaliknya rumus (5.3) akan memperoleh tanda berlawanan untuk kasus ini.

Andaikan gelombang yang ditinjau memenuhi persamaan :

$$y(x,t) = y_m \cos(kx-\omega t)$$

maka diperoleh :

$$\frac{\delta y}{\delta x} = + \omega\ y_m \sin(kx-\omega t),\ \frac{\delta y}{\delta t} = -\ k\ y_m \sin(kx-\omega t)$$

Selanjutnya persamaan (5.5) dapat ditulis menjadi

$$P = To\ v\ k^2 y_m^2 \sin^2(kx-\omega t) = P(x,t) \qquad 5.6$$

Persamaan ini menggambarkan perambatan energi ke kanan dengan kecepatan v, Harganya pada titik tertentu lebih tepat diungkapkan sebagai harga rata-rata P menurut rumus :

$$\langle P\rangle = To\ v\ \langle(\frac{\delta y}{\delta x})^2\rangle$$

$$= To\ v\ k^2 y_m^2\ \langle\sin^2(\omega t-kx)\rangle \qquad 5.7$$

Dengan definisi harga rata-rata :

$$\langle\sin^2(\omega t-kx)\rangle = \frac{1}{To}\int_0^T \sin^2(\omega t-kx)\ dt = \frac{1}{2}$$

maka

$$\langle P\rangle = \frac{1}{2}\ To\ v\ k^2 y_m^2 \qquad 5.8$$

Selanjutnya dari persamaan $v = \frac{To}{\rho}$ dapat ditulis

$$To = v^2\rho = (\frac{\omega^2}{k^2})\ \rho \qquad 5.9$$

sehingga persamaan dapat pula ditulis dalam bentuk :

$$\langle P\rangle = v\ (\ \frac{1}{2}\ \rho\omega^2 y_m) = v(\frac{1}{2}\ \rho\ y_{maks}) \qquad 5.10$$

dengan

$$U_{maks} = \frac{\omega}{m} = \text{kecepatan osilasi maksimum} \qquad 5.11$$

Untuk osilator harmonis, energi total persatuan panjang sama dengan jumlah rapat energi potensial dan energi kinetik atau

salah satu harga maksimumnya :

$$\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_p$$

$$= \frac{1}{2}\rho\omega^2 y_m^2 = \text{rapat energi kinetik maksimum} \qquad 5.12$$

dan harga ini merupakan suatu konstanta, $\langle\varepsilon\rangle = \varepsilon$. maka secara eksplisit, $\langle P\rangle$ dapat dituliskan dalam bentuk arus energi :

$$\langle P\rangle = \langle\varepsilon\rangle\, v = \varepsilon v \qquad 5.13$$

Bentuk ungkapan ini serupa dengan rapat arus muatan listrik $j = \rho v$ dengan ρ = rapat muatan listrik, atau rapat arus fluida dengan ρ = rapat massa fluida.

Untuk gelombang dalam medium berdimensi tiga membawa daya rata-rata :

$$\langle P\rangle = 2\,\pi^2 y_m^2 f^2 \rho v A \qquad 5.14$$

5.2 DAYA DAN INTENSITAS BUNYI

Bunyi yang dihasilkam sumber bunyi terdengar kuat atau lemah, bergantung kepada intensitas bunyi. Intensitas gelombang merupakan daya persatuan luas yang dirambatkan oleh gelombang. Pada kenyataannya daya rata-rata yang dibawa gelombang bunyi adalah sebanding dengan amplitudo dan kwadrat gelombang yang dapat dihitung dengan persamaan (5.14)

$$\langle P\rangle = 2\,\pi^2 y_m^2 f^2 \rho v A$$

dimana

y_m = Amplitudo gelombang

A = Luas bidang gelombang

Sedangkan intensitas rata-rata gelombang adalah :

$$\langle I \rangle = \frac{\langle P \rangle}{A} = \frac{2\,\pi^2\, y_m^2\, f^2\, \rho v A}{A}$$

$$\langle I \rangle = \frac{1}{2}\,\omega^2\, y_m^2\, \rho\, v \qquad 5.15$$

Gelombang bunyi dalam gas menjalarkan dua macam gangguan yaitu simpangan longitudinal pada molekul-molekul gas dan gangguan pada tekanan gas, sehingga intensitas gelombang bunyi dapat dinyatakan sebagai :

$$I = \frac{p_m^2}{2\, v\, \rho_o} \qquad 5.16$$

(Sutrisna 1984; 65)

dimana p_m = Amplitudo tekanan.

Dalam prakteknya intensitas gelombang bunyi sering dinyatakan sebagai taraf intensitas yang merupakan logaritma perbandingan antara intensitas ambang ge-lombang bunyi $\langle I \rangle$ dengan ambang gelombang bunyi $\langle I_o \rangle$, dinyatakan dengan persamaan :

$$B = 10 \log \frac{I}{I_o} \qquad 5.17$$

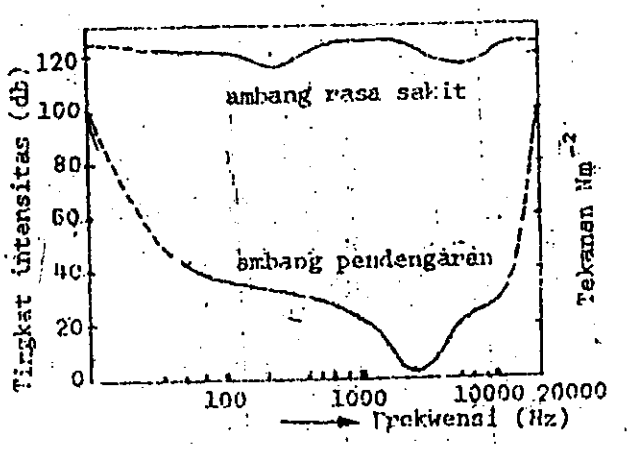
dimana

I_o = Intensitas ambang pendengaran gelombang bunyi $= 10^{-16}$ watt cm^{-2}.

Taraf intensitas bunyi dinyatakan dalam satuan desibel (d.B).

Kepekaan telinga manusia terhadap gelombang bunyi mempunyai batas-batas tertentu yang dinyatakan dalam bentuk ambang pendengaran dan ambang rasa sakit. Gelombang bunyi yang frekwensi antara 20 Hz s/d 200000 Hz, dengan intensitas

lebih kecil dari intensitas ambang pendengaran tidak dapat didengar lagi. Daerah pendengaran manusia dapat diperlihatkan grafik bentuk hubungan taraf intensitas bunyi dengan frekwensi bunyi seperti pada gambar 5.2



Gambar 5.2 : Daerah pendengaran manusia
(Sutrisno.1984 : 66)

Berdasarkan hasil penyelidikian yang dilakukan oleh Noise Abatement Commision New York, terhdap berbagai macam suara bising sehari-hari diperoleh seperti tabel berikut ini.

Tabel 5.1. Tingkat bising berbagai sumber bunyi.

Sumber atau keterangan bunyi	Taraf Intensitas (dB)
Ambang rasa sakit	120
Alat pemasangan paku kling (Riveter)	95
Kereta api di atas jalan raya	90
Jalan ramai	70
Percakapan biasa	65
Mobil yang mulus	50
Bunyi biasa radio dalam rumah	40
Bisik-bisik	20
Desiran daun-daun	10
Ambang pendengaran	0

(Sears Zemansky, 1962;524)

5.3. IMPEDANSI GELOMBANG

Sebagai respons terhadap gangguan gaya luar F, tali akan memperoleh kecepatan gerak osilasi lokal. Untuk media resistif, respon ini bersifak linear. Maka itu, besarnya respons terhadap F tertentu bergantung pada suatu konstanta kerakteristik Z menurut rumus :

$$\frac{\delta y}{\delta t} = \frac{1}{Z} F \qquad 5.18$$

Untuk gelombang yang merambat <u>ke kanan</u>,

$$\frac{\delta y}{\delta t} = \frac{1}{Z} \left(-To \frac{\delta y}{\delta t}\right) \quad ; \quad Z = \frac{To\ \delta y/\delta x}{\delta y/\delta t} \qquad 5.19$$

Hubungan ini mengingantkan kepada analogi dengan rang-rankaian listrik. Dalam rangkaian listrik, beda potensial V sebagai penggerak muatan listrik akan menimbulkan arus I pada kawat dengan inpedansi Z menurut rumus ohm : I = V/Z.

Berdasarkan analogi yang erat ini, Z disebut <u>inpedansi gelombang</u>. Harga Z ditentukan oleh karakteristik gelombang dan medium yang bersangkutan. Jelas bahwa untuk gangguan gelombang tertentu, makin besar inpedansi gelombang makin kecil kecepatan osilasi yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut. Khusus untuk gelombang tali y(x-vt), persamaan (5-5) memberikan hubungan :

$$Z = \frac{To}{v}, \qquad 5.20$$

dan persamaan (5-5) menjadi

$$P = Z \left(\frac{\delta y}{\delta t}\right)^2 = \frac{1}{Z} \left(To \frac{\delta \psi}{\delta x}\right)^2 \qquad 5.21$$

Dapat ditunjukkan bahwa rumus (5.20) dan (5.21), berlaku pula untuk gelombang y(x+vt). Perhatikan bahwa rumus (5-21) memiliki bentuk serupa dengan rumus disipasi energi ohmik dalam rangkaian listrik.

Selanjutnya dari persamaan (5.20) dapat diperoleh ungkapan Z yang lain untuk gelombang tali :

$$Z = \sqrt{To\ \rho} \qquad 5.22$$

Bentuk ini menarik untuk dibandingkan dengan persamaan kecepatan :

$$v = \sqrt{To/\rho}$$

Akhirnya untuk melengkapi ketentuan inpedansi bagi berbagai jenis media dapat dibedakan menurut analogi dalam rangkaian listrik sebagai berikut

medium resistif : $F = Z\left(\frac{\delta y}{\delta t}\right)$: $Z \sim R$ 5.23

medium reaktif : $F = Zy$: $Z \sim C^{-1}$ 5.24

$= Z\left(\frac{\delta y^2}{\delta t^2}\right)$; $Z \sim L$ 5.25

DAFTAR PUSTAKA

Alonso/Finn, 1983. Fundamental Univesity Physics Volume II, Addison-Wesley, Amsterdam.

Akiro Hirose & Karl E Longer, 1984. Inntroduction To Wave Phenomena, Jhon Willey & Son, New York.

Halliday & Resnick, 1984. Fisika Jilid I. (Terjemahan Pantur Silaban & Erwin Sucipto), Erlangga, Jakarta.

Sears-Zemansky, 1962. Fisika Untuk Universitas I, (Terjemahan Soedarna & Amir Ahmad), Bina Cipta, Jakarta.

Sutrisno, 1984. Seri Fisika Dasar Gelombang dan Optik, Penerbit ITB, Bandung.