

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. PENGERTIAN GELOMBANG

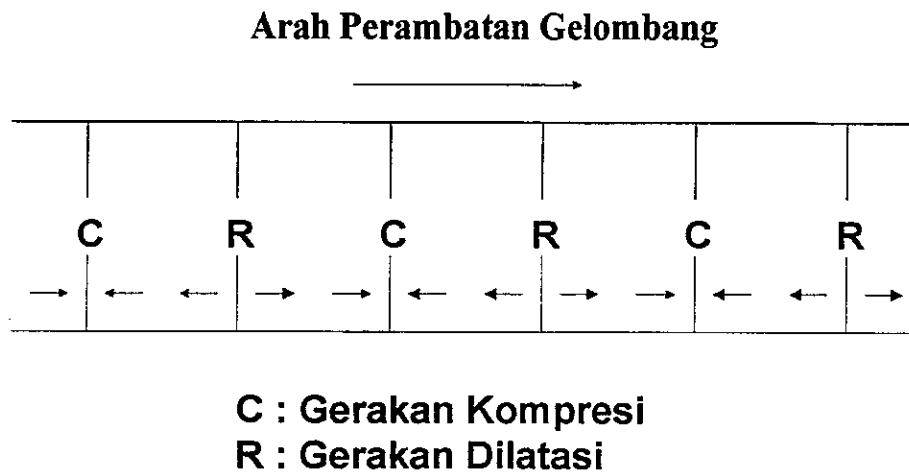
Dalam ilmu fisika, dikenal ada beberapa jenis gelombang yaitu gelombang -P, gelombang -S, dan gelombang lainnya. Gelombang -P disebut juga dengan gelombang primer atau gelombang longitudinal, sedangkan gelombang -S disebut juga dengan gelombang sekunder atau gelombang transversal.

Gelombang -P dan gelombang -S dikategorikan sebagai gelombang tubuh karena kedua gelombang tersebut merambat pada benda yang dilaluinya. Perbedaan gelombang tersebut dicirikan oleh perbedaan cara perambatannya.

Gelombang -P yaitu gelombang yang gerakan partikel-partikelnya dalam medium yang dilalui gelombang searah dengan arah rambat gelombangnya (gambar 2.1).

Sifat-sifat gelombang -P adalah :

1. Longitudinal.
2. Kompresional.
3. Irrotasional.
4. Dapat menjalar pada semua medium
5. Kecepatannya lebih besar dari gelombang -S.



Gambar 2.1 Arah gerakan partikel pada gelombang -P

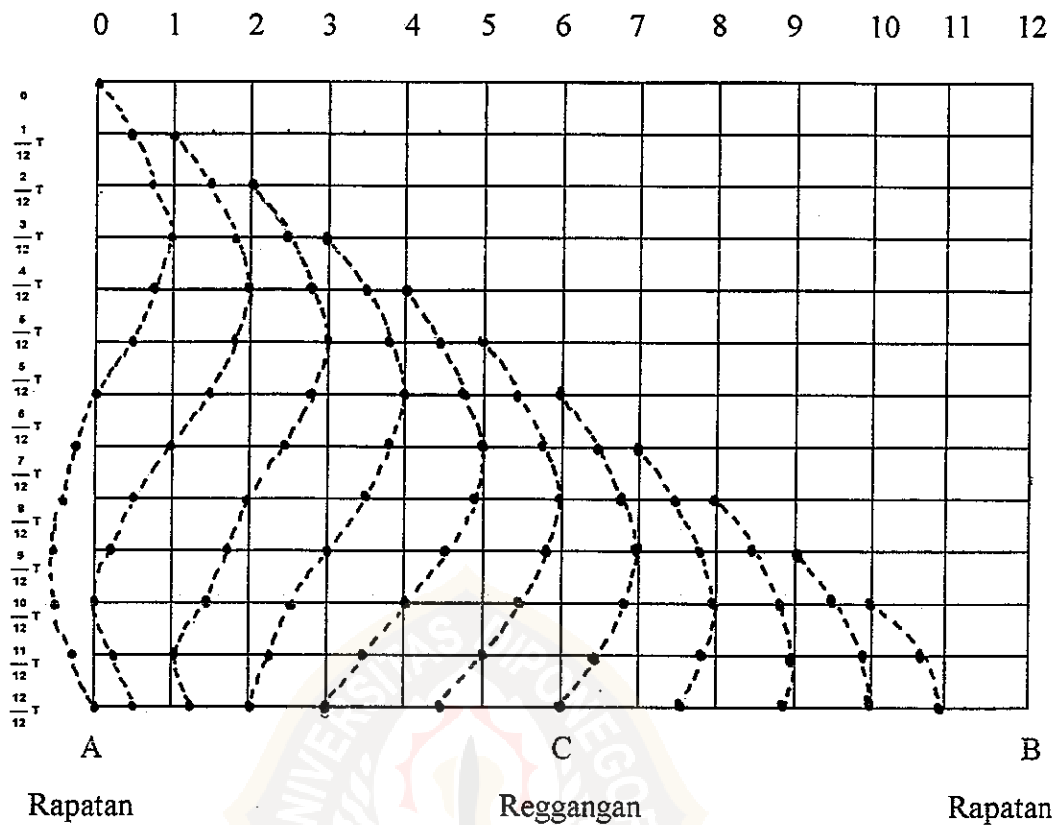
2.2. GERAK GELOMBANG

Sifat-sifat dasar yang umum dari semua jenis gelombang ialah bahwa tiap gelombang itu mempunyai mekanisme untuk memindahkan energi dari sebuah titik ke titik yang lain tanpa pemindahan materi antara kedua titik itu.

Bunyi adalah suatu contoh gerak gelombang mekanik. Untuk menimbulkan gelombang mekanik diperlukan sumber energi dan untuk perambatannya diperlukan suatu medium.

2.2.1. Melukis Gelombang Longitudinal

Pada gelombang longitudinal tidak terdapat suatu bentuk gelombang, melainkan suatu rapatan dan renggangan yang merambat dalam arah rambatan.



Gambar 2.2 Melukis gelombang longitudinal

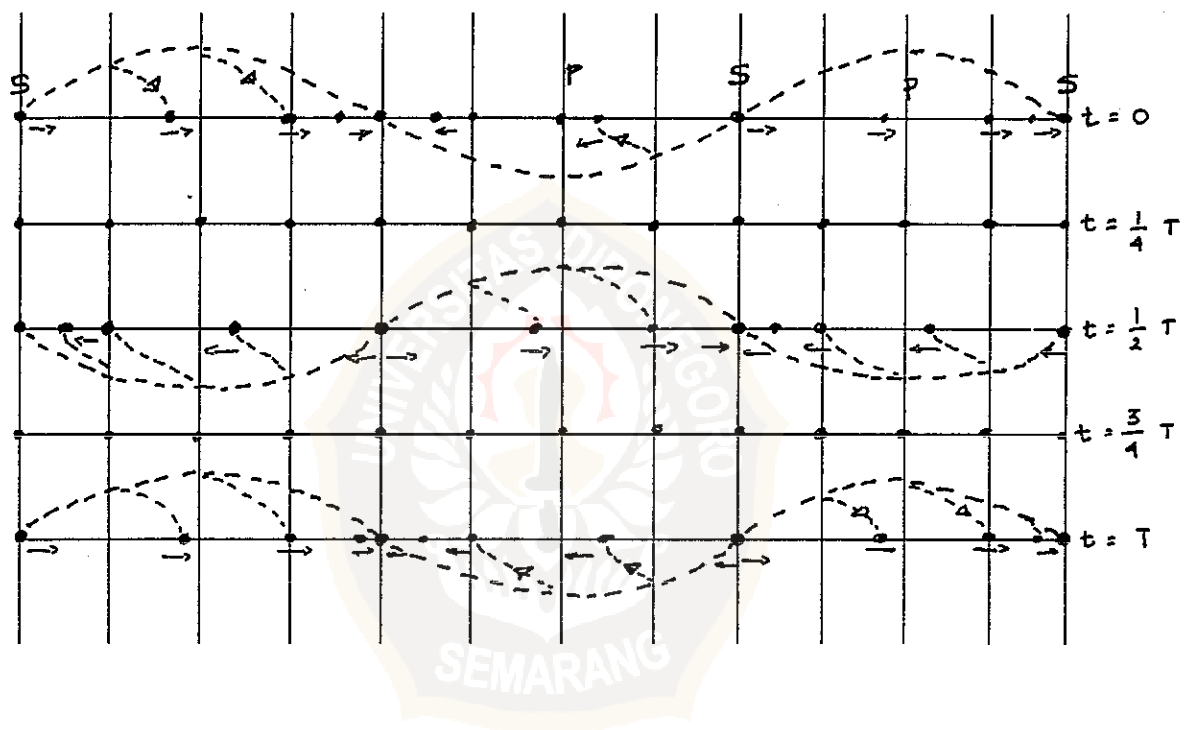
Satu gelombang sempurna terjadi apabila titik pertama telah melakukan satu getaran sempurna yaitu dalam waktu T detik.

2.2.2 Gelombang Longitudinal Stasioner

Gelombang stasioner juga dapat timbul pada gelombang longitudinal, contohnya gelombang bunyi. Disini terdapat simpul dan perut.

Pada simpul simpangan partikel-partikel senantiasa nol. Pada perut simpangan partikel mempunyai amplitudo terbesar.

Titik-titik yang berada sebelah menyebelah simpul berlawanan fasenya dan bergerak serentak mendekati dan menjauhi simpul itu. Pada perut semua titik pada saat yang sama bergerak dalam arah yang sama.



Gambar 2.3 Gelombang longitudinal stasioner

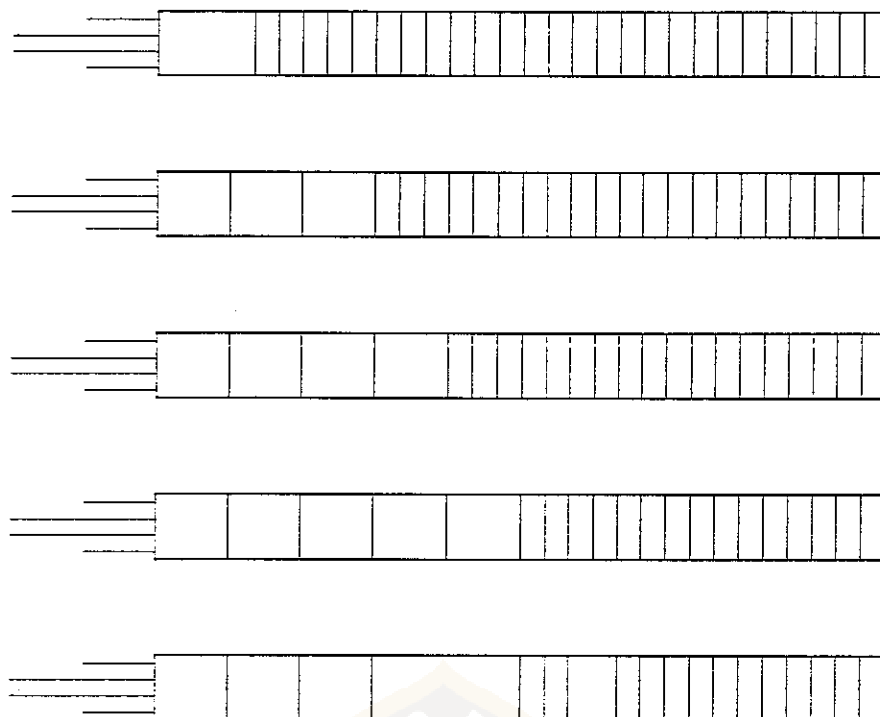
2.3. GELOMBANG BUNYI

Gelombang bunyi adalah gelombang longitudinal. Gelombang tersebut dapat dijalarkan di dalam benda padat, benda cair dan gas. Partikel-partikel bahan

yang mentransmisikan sebuah gelombang beresilasi di dalam arah penjalaran gelombang itu sendiri. Ada jangkauan frekuensi yang besar dimana dapat dihasilkan gelombang longitudinal. Gelombang bunyi yang dapat merangsang telinga dan otak manusia kepada sensasi pendengaran dengan frekuensi kira-kira 20 H sampai kira-kira 20.000 Hz dan dinamakan jangkauan suara yang dapat didengar. Gelombang bunyi longitudinal yang frekuensinya berada di bawah jangkauan frekuensi pendengaran manusia dinamakan gelombang infrasonik dan gelombang yang frekuensinya berada di atas jangkauan frekuensi pendengaran dinamakan gelombang ultrasonik.

2.3.1 Penjalaran dan Laju Gelombang Bunyi

Gelombang bunyi jika tidak dirintangi akan menyebar ke semua arah dari sebuah sumber. Dalam penjalaran gelombang yang berdimensi satu, ditinjau tranmisi gelombang-gelombang longitudinal dalam sebuah penghispap. Salah satu ujung penghispap diisi dengan medium termampatkan. Garis-garis vertikal membagi medium kompresi menjadi irisan-irisan tipis berisi massa fiuida yang sama. Garis-garis tersebut relatif dekat satu sama lain. Tekanan dan massa jenis fiuida lebih besar daripda tekanan dan massa jenis di dalam fiuida normal yang tak terganggu. Disini fiuida diperlukan sebagai suatu medium kontinue.



Gambar 2.4 Gelombang bunyi yang dihasilkan di dalam sebuah tabung. Garis-garis vertikal membagi medium termampatkan di dalam tabung menjadi lapisan-lapisan massa yang sama.

Jika penghisap dari gambar 2.4 didorong ke depan, maka fluida yang ada di depan akan dimampatkan. Tekanan dan massa jenis fluida akan naik melebihi nilai-nilai normalnya yang tidak terganggu. Fluida yang dimampatkan bergerak ke depan dan sebuah denyut kompresi berjalan sepanjang tabung tersebut. Jika penghisap ditarik mundur maka fluida yang ada didepannya akan mengembang, tekanan dan massa jenisnya akan turun dibawah nilai-nilai normalnya yang tidak terganggu.

2.3.2. Gelombang Longitudinal Tegak

Gelombang longitudinal yang berjalan sepanjang tabung yang berisi gas dipantulkan di ujung-ujung tabung tersebut. Interferensi di antara gelombang-gelombang yang berjalan di dalam arah-arah yang berlawanan akan menghasilkan gelombang longitudinal tegak.

Jika ujung tabung tersebut tertutup, maka gelombang yang dipantulkan mempunyai perbedaan fasa sebesar 180° . Hasil ini menunjukkan bahwa pergeseran elemen-elemen volume yang kecil diujung tertutup adalah titik simpul pergeseran. Jika ujung tabung tersebut terbuka, maka elemen fluida diujung tersebut akan bebas bergerak. Akan tetapi sifat pantulan di ujung tersebut tergantung pada apakah tabung tersebut berdiameter lebar atau sempit dibandingkan terhadap panjang gelombang, dimana gelombang yang dipantulkan mempunyai fasa yang hampir sama seperti gelombang yang masuk. Maka ujung terbuka tersebut merupakan titik perut pergeseran.

2.4. VARIASI TEKANAN PADA GELOMBANG BUNYI

Masuknya gelombang bunyi ke telinga mengakibatkan bergetarnya partikel-partikel udara pada selaput gendang pada frekuensi dan dengan amplitudo tertentu. Getaran ini dapat pula diterangkan berdasarkan variasi tekanan udara pada selaput tersebut. Tekanan udara pada selaput gendang itu naik melebihi tekanan atmosfer, lalu turun lagi sampai di bawahnya dengan grafik harmonik yang frekuensinya sama

dengan frekuensi partikel udara tadi. Selisih maksimum antara tekanan udara pada selaput gendang dan tekanan atmosfer disebut amplitudo tekanan.

2.4.1 Intensitas Gelombang bunyi

Dari segi fisika, yang dirambatkan gelombang adalah energi. Intensitas (I) gelombang yang merambat didefinisikan sebagai jumlah rata-rata energi yang dibawa persatuan oleh gelombang persatuan luas permukaan yang tegak lurus pada arah rambatan. Singkatnya intensitas itu ialah daya rata-rata yang dibawa persatuan luas.

Daya yang dibangkitkan oleh suatu gaya sama dengan hasil kali gaya kecepatan. Jadi daya persatuan luas dalam gelombang bunyi sama dengan hasil kali kelebihan tekanan (gaya persatuan luas) dengan kecepatan partikel. Harga rata-rata untuk satu daur gelombang adalah :

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} \quad (2.1)$$

Dengan P ialah amplitudo tekanan, ρ rapat massa rata-rata udara, dan c kecepatan gelombang bunyi.

4.2. 2. Persamaan-Persamaan Gelombang Bunyi

Secara umum persamaan gerak gelombang bunyi yang merambat dalam suatu medium adalah :

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Dengan P = tekanan gelombang bunyi

C = cepat rambat gelombang bunyi

t = waktu

∇^2 = operator Laplace

Energi gelombang bunyi yang merambat dalam suatu medium terdiri dari energi kinetik dan energi potensial. Energi kinetik berasal dari gerakan-gerakan partikel, sedangkan energi potensial berasal dari perapatan dan perenggangan medium setelah dilalui gelombang bunyi. Gelombang bunyi yang merambat dalam suatu medium terjadi karena adanya perpindahan energi dari suatu tempat ke tempat lainnya. perbedaan tekanan medium antara keadaan semula dengan tekanan sewaktu terjadinya perapatan atau perenggangan disebut tekanan gelombang bunyi.

Dari persamaan (2.2) gelombang merambat tidak mengalami absorpsi. Akan tetapi pada kenyataannya, gelombang bunyi yang merambat dalam suatu medium lama kelamaan semakin berkurang intensitasnya, hal ini berarti bahwa energi gelombang bunyi tersebut mengalami penurunan yang disebabkan absorpsi selama gelombang merambat dalam medium yang dilaluinya.

Absorpsi yang terjadi disebabkan oleh medium dan dinding yang membatasi medium tersebut. Bila faktor absorpsi diabaikan tekanan gelombang bunyi P dapat ditulis dengan :

$$P = \rho_0 C^2 s \quad (2.3)$$

Dengan P = tekanan gelombang bunyi

C = cepat rambat gelombang bunyi

s = kondensasi medium di setiap titik yang didefinisikan sebagai $(\rho - \rho_0)/\rho_0$

ρ = rapat massa fluida

ρ_0 = rapat massa fluida dalam keadaan setimbang

Sedangkan bila faktor absorpsi diperhatikan, maka oleh Stokes dinyatakan bahwa hubungan P dan s diberikan oleh :

$$P = \rho_0 C^2 \left(1 + \tau \frac{\partial}{\partial t} \right) s \quad (2.4)$$

dengan,

τ = waktu relaksasi

Dari persamaan Euler dapat ditulis sebagai :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla P / \rho_0 \quad (2.5)$$

dengan \bar{U} = Kecepatan partikel

∇ = Operator gradien

dan persamaan kontinuitas yang dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \nabla \cdot U = 0 \quad (2.6)$$

Dengan ∇ = Operator divergen

Bila persamaan (2.6) dideferensialkan dua kali terhadap t dan disubstitusikan kedalam persamaan (2.5), diperoleh

$$\nabla^2 P = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Bila persamaan (2.4) dideferensialkan dua kali terhadap t dan disubstitusikan ke dalam persamaan (2.7) maka diperoleh persamaan gerak gelombang bunyi yang mengalami absorpsi :

$$(1 + \tau \partial/\partial t) \nabla^2 P = \frac{1}{C^2} \frac{\partial P}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Pengurangan dari amplitudo pada absorpsi muncul secara eksklusif eksponensial dengan jarak untuk gelombang bunyi. Kemudian dapat kita tuliskan untuk pengurangan dalam amplitudo sebagai berikut :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.9)$$

dengan A dan A_0 adalah fungsi amplitudo pada jarak x dan α adalah koefisien absorpsi.

$$\ln A = -\alpha x + \ln A_0 \quad (2.10)$$

Koefisien gelombang bunyi (α) dinyatakan per meter, sedangkan perubahan tingkat intensitas dari gelombang bunyi yang mengalami penurunan dinyatakan dalam decibel per meter (dB/m) dengan hubungan :

$$\begin{aligned} \text{IL}(0) - \text{IL}(X) &= 10 \log I(0)/I(X) \\ &= 10 \log \exp 2\alpha x \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dengan :

$\text{IL}(0)$ = Tingkat Intensitas pada $x = 0$

$\text{IL}(X)$ = Tingkat Intensitas pada jarak X

$I(0)$ = Intensitas pada $X = 0$

$I(X)$ = Intensitas pada jarak X

Bila diambil $\text{IL}(0) - \text{IL}(X) = ax$, maka persamaan (2.11) menghasilkan $a = 8,6886$ merupakan satuan dari penurunan tingkat intensitas gelombang bunyi yang dinyatakan dalam dB/m.

2.5 ABSORBSI GELOMBANG BUNYI

Dalam medium fluida peristiwa absorpsi terhadap gelombang bunyi disebabkan oleh adanya pengaruh viskositas, proses konduksi panas dan peristiwa relaksasi molekuler. Viskositas merupakan salah satu sifat fisis dari fluida yang dapat dianggap sebagai gesekan bagian dalam dari fluida. Absorpsi yang disebabkan viskositas timbul karena adanya perbedaan suhu antara bagian medium yang

mengalami peregangan. diakibatkan tekanan gelombang bunyi, sehingga panas akan mengalir dalam bagian medium yang tertekan menuju bagian yang renggang, akan menyerap energi gelombang tersebut. Herzfeld dan Rice mengemukakan faktor absorpsi karena relaksasi molekuler dalam medium fluida, tersusun dari molekul-molekul atomik. Masing-masing molekul mempunyai tiga derajat kebebasan dalam perambatannya. Dimana molekul mempunyai energi translasi (energi eksternal) serta energi vibrasi dan rotasi (energi internal). Molekul dalam keadaan setimbang energi eksternal sebanding dengan energi internal.

Bila terjadi gangguan oleh perubahan tekanan, atau perubahan suhu yang mendadak, dengan spontan energi eksternal berubah. Namun perubahan energi eksternal tidak dapat diikuti energi internal. Akibatnya energi eksternal tidak seimbang lagi dengan energi internal. Untuk memperoleh keseimbangan baru kembali, maka energi internal memerlukan waktu untuk menyesuaikan diri. Dalam hal ini sebagian energi eksternal akan diserap.

Lamanya waktu yang diperlukan oleh energi internal untuk menyesuaikan diri ke dalam keadaan setimbang kembali, diukur dengan apa disebut waktu relaksasi (τ). Absorpsi yang disebabkan oleh relaksasi molekuler ini terjadi karena perpindahan energi internal, sehingga sebagian energi eksternal akan diserap.

Pengukuran absorpsi gelombang bunyi dalam medium fluida yang dibuat di laboratorium dengan cara memasukkan fluida ke dalam pipa. Pengukuran yang dilakukan dengan cara seperti ini hasilnya selalu lebih besar dari pada pengukuran yang dilakukan di tempat terbuka. Hal ini menunjukkan absorpsi tidak hanya terjadi

pada medium, tetapi juga terjadi pada dinding yang membatasi fluida. Absorpsi pada dinding pipa tidak dapat diabaikan bila diameter pipa yang digunakan cukup kecil dan frekuensinya cukup tinggi

Besar absorpsi total gelombang bunyi dalam pipa dengan jari-jari yang berisi medium fluida dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\alpha = \frac{1}{r C} \sqrt{\frac{\eta_e \omega}{2 \rho_0}} \quad (2.12)$$

dengan

α = absorpsi total dalam pipa

r = jari-jari pipa

C = cepat rambat bunyi dalam medium

= 340 m/det

η_e = koefisien viskositas efektif fluida

= 0,000181 Pa . s

ω = frekuensi gelombang bunyi

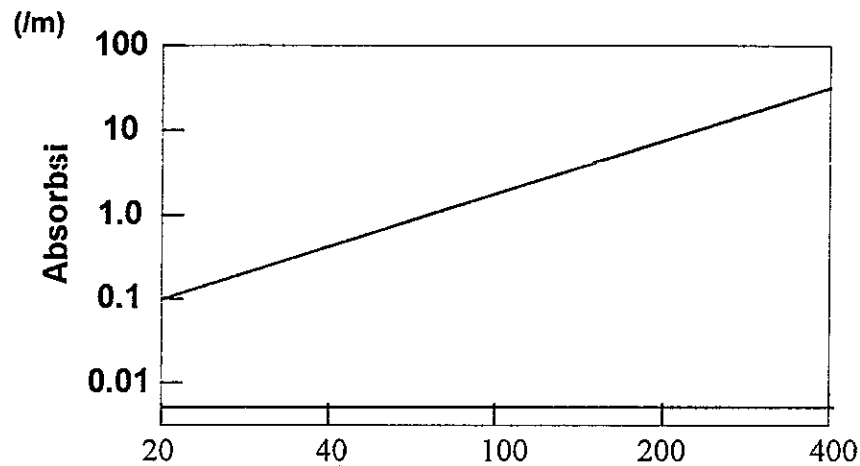
= $2 \pi f$

ρ_0 = rapat massa fluida

= 1,121 kg/m³

Suatu sumber yang menambah besarnya absorpsi gelombang bunyi dalam pipa telah dikemukakan oleh Helmholtz tahun 1963 yaitu adanya pengaruh resistans viskositas terhadap gerakan fluida pada dinding pipa. Dia mengatakan bahwa amplitudo kecepatan partikel medium pada dinding adalah nol. Sedangkan sumber yang lain disebabkan oleh perubahan energi panas antara fluida dan dinding. Masalah ini pertama kali dikemukakan Kirchoff tahun 1968.

Di bawah ini diberikan gambar absorpsi gelombang bunyi di udara untuk berbagai frekuensi.



Gambar 2.5 Absorpsi gelombang bunyi di udara

2.6. ABSORBSI GELOMBANG BUNYI DENGAN PIPA SILINDER

Pengukuran di laboratorium tentang penyerapan akustik sering dilakukan pada pipa silinder. Dalam satu metode probe mikropon digunakan untuk mengangkat amplitudo tekanan dari sebuah bidang bergerak pada dua atau lebih posisi sepanjang pipa tersebut. Jika P_1 adalah tekanan amplitudo X_1 dan P_2 pada X_2 , maka konstanta atenuasi dapat ditetapkan dari persamaan :

$$P_2 = P_1 e^{-(X_2 - X_1)} \quad (2.13)$$

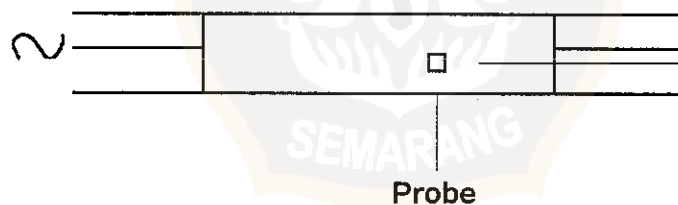
Apabila metode ini digunakan langkah yang harus diambil adalah mengurangi sejumlah pengaruh gelombang-gelombang pantulan melalui bidang-bidang non pantulan pada ujung pipa tersebut atau melalui pulsa-pulsa yang pendek atau pipa-

pipa yang panjang pada pengukuran dan X_1 dan X_2 dapat dilakukan sebelum pulsa tersebut dipantulkan kembali. Jelasnya metode kedua menyangkut pengukuran amplitudo tekanan pada simpul-simpul dan antinode dari pola gelombang tegak seperti yang ditunjukkan gambar 2.7. Sekarang dengan menganggap bahwa piston pemantul B dari gambar 2.6 adalah tegar tak hingga maka amplitudo dari gelombang yang terpantul dihasilkan pada piston ini sebanding dengan gelombang datang dari sumber bunyi A. Berdasarkan ini tekanan akustik keadaan tunak menyatakan sejumlah posisi sepanjang pipa-pipa tersebut :

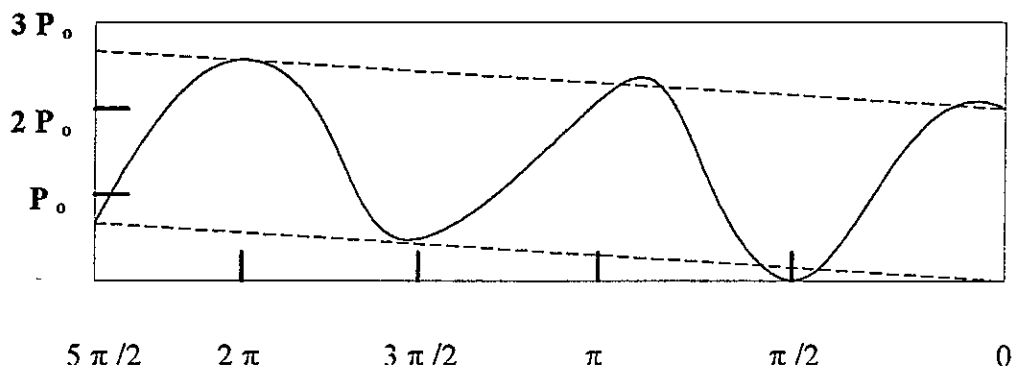
$$P = \nabla P_0 \cdot e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - kx)} + P_0 e^{\alpha x} e^{(\omega t - kx)} \quad (2.14)$$

dengan $x = 0$ pada piston B. Amplitudo tekanan yang dihasilkan pada posisi sepanjang pipa tersebut dapat ditunjukkan :

$$P = 2 P_0 (\cosh^2 \alpha x \cos^2 kx + \sinh^2 \alpha x \sin^2 kx)^{1/2} \quad (2.15)$$



Gambar 2.6 Pengukuran dari gelombang tegak.



Gambar 2.7 Amplitudo tekanan dari gelombang tegak

Titik simpul dari tekanan minimum yang terjadi :

$$-kx = \frac{2n-1}{2} \pi : n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

dan bunyi amplitudo

$$P_{\min} = 2P_0 \sinh \alpha x \approx 2P_0 (\alpha x) \quad (2.17)$$

Amplitudo tekanan pada simpul-simpul tersebut dapat diukur secara langsung, tentu saja dengan probe mikropon kecil atau probe tabung yang dihubungkan dengan kondensor mikropon. Nilai dapat ditentukan dengan melukiskan kurva curam melalui titik-titik ini. Antinode terjadi di $-kx = n$ dengan $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ dan memberikan amplitudo tekanan maksimum :

$$P_{\max} = 2P_0 \cosh \alpha x \approx 2P_0 (1 + \alpha^2 x^2)^{1/2} \quad (2.18)$$

Penentuan atenuasi akustik secara eksperimen seperti yang ditentukan dengan metode di atas selalu besar jika dibandingkan terhadap pengukuran dalam volume fluida yang besar. Ini disebabkan oleh berkurangnya tempat pada dinding-dinding

pipa tersebut yang harus diperhatikan dan diabaikan. Sumber bunyi ini meningkatkan antenuasi fluida yang terdapat dalam pipa tersebut dengan tahanan viskositas besar terhadap gerak fluida di dinding pipa tersebut. Hasil ini dalam bentuk laminar melalui tampang lintang pipa dengan kecepatan kecil yang dapat mendekati nilai maksimum di jarak $(2\pi / \rho_0 \omega)^{1/2}$ dari dinding-dinding yang sesuai dengan :

$$u = \frac{P}{\rho_0} \left[1 - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Ka)} \right]$$

Dalam persamaan ini n adalah jari-jari pipa, r adalah jarak dari pusat pipa, dan k adalah konstanta kompleks, dengan n adalah koefisien viskositas ruang. Diplot dalam gambar yang hasilnya diperoleh dari persamaan (2.19), dengan :

$$K = (1 - j) \sqrt{\frac{\rho_1 - \omega}{2\mu}} \quad (2.20)$$

Tidak hanya menggunakan persamaan di atas yang menghasilkan gradien kecepatan radial tapi juga dapat memperkirakan beberapa persamaan fase antara kecepatan partikel fluida dan tekanan akustik. Konskuensi perbedaan fase ini dapat kita antisipasi dengan kedua antenuasi dan dispersi. Deduksi ini adalah benar karena itu memungkinkan untuk menunjukkan gelombang antenuasi dan dalam daerah tersebut dengan persamaan :

$$\alpha = \frac{1}{rC} \sqrt{\frac{\eta \omega}{2\rho_0}} \quad (/m) \quad (2.21)$$

dan didapat kecepatan fase tereduksi :

$$v = C \left[1 - \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega}} \right]$$

Perlu dicatat bahwa pengaruh viskositas pada perambatan gelombang akustik dalam fluida yang terdapat dalam pipa, seperti yang ditunjukkan persamaan atas tergantung pada rasio η/ρ_0 yang adakalanya menyatakan sebagai koefisien viskositas kinematik. Pengaruh viskositas pada gelombang bunyi lebih besar di udara dibanding di air. Secara eksperimen nilai-nilai yang terukur dari konstanta atenuasi di atas (α) untuk udara kering dalam pipa, mendekati 50% dari nilai yang diperkirakan dari persamaan fase tereduksi. Jika koreksi tersebut dilakukan untuk penjumlahan atenuasi dari konduksi panas pada dinding-dinding pipa maka perbedaan dari nilai-nilai yang diperkirakan dan yang teramati jauh lebih besar. Pengaruh yang tampak penting dari panas yang dibangkitkan dan hubungan dengan konduksi terhadap temperatur. Analisa ini dinyatakan oleh Rayleigh, yang menunjukkan bahwa persamaan di atas harus dimodifikasi dengan menempatkan koefisien viskositas mutlak yang benar dengan koefisien efektif η_e . Kemudian nilai tersebut didefinisikan

$$\eta_e = \eta \left[1 + \left(\sqrt{\gamma} - \frac{1}{\gamma} \right) \sqrt{\frac{k}{C_p \eta}} \right]^2 \quad (2.23)$$

Dengan k adalah konduktifitas termal cairan, adalah rasio panas jenisnya, dan C_p adalah panas jenis pada tekanan konstan. Pengaruh konduksi panas terhadap dan dari udara pada dinding-dinding pipa di atenuasi gelombang dalam persamaan :

$$\alpha = \frac{1}{r C} \sqrt{\frac{\eta \omega}{2 \rho_0}} \quad (/m) \quad (2.24)$$

Pengaruh viskositas dan konduksi pada kecepatan perambatan gelombang dalam kecil. Dalam daerah tersebut persamaan ini :

$$v = \left[1 - \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega}} \right] \quad (2.25)$$

diberlakukan tidak lebih dari beberapa persen. Dalam perlakuan perambatan gelombang melalui larutan-larutan dalam pipa, pengaruh konduksi panas pada dinding-dindingnya dapat diabaikan untuk sejumlah larutan dan konsekuensinya hanyalah koefisien ruang yang biasa dari viskositas yang perlu diperhatikan.

Mekanisme ketiga adalah energi akustik yang dihasilkan dari pipa-pipa tersebut. Sebelumnya dalam bagian ini kita telah menganggap bahwa dinding-dinding tersebut merupakan benda tegar tak hingga agar bentuk absorpsi dapat diabaikan. Bagaimanapun keadaannya beberapa energi akustik selalu ditransmisikan secara irreversibel ke dalam dinding-dindingnya dan maka dari itu mengurangi fluida tersebut. Ini mungkin direduksi dengan menggunakan pipa-pipa yang mempunyai dinding yang tebal atau menggunakan dinding tipis di sekitar fluida dengan impedansi akustik yang lebih kecil daripada fluida yang terdapat dalam pipa tersebut.