

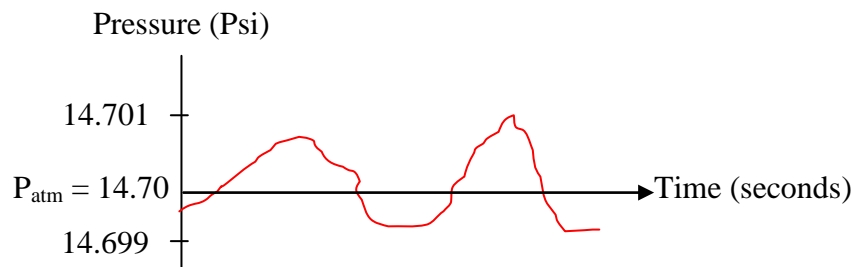
## BAB 5. PROPERTIS FISIKA BUNYI

Definisi: Suara - gangguan yang menyebar melalui bahan elastis pada kecepatan yang merupakan karakteristik dari bahan tersebut. Suara biasanya disebabkan oleh radiasi dari bergetar padat permukaan atau cairan gangguan.

### 5.1. VARIABEL AKUSTIK

Suara menyebar melalui udara (atau media elastis), hal itu menyebabkan fluktuasi terukur dalam tekanan, kecepatan, suhu dan kepadatan. Kita bisa menggambarkan keadaan fisik dalam keadaan steady dan fluktuasi nilai kecil tentang artinya. Untuk tujuan akustik dan kontrol kebisingan, semua yang kita pedulikan adalah tentang berfluktuasi.

Besaran Fisika	Variabel	Satuan
Tekanan	$P_{\text{total}} = P + p(r, t)$	(Pascals)
Kecepatan	$U_{\text{total}} = U + u(r, t)$	(meters / second)
Temperatur	$T_{\text{total}} = T + \tau(r, t)$	(° Celsius)
Densitas	$\rho_{\text{total}} = \rho + \sigma(r, t)$	(kg/m <sup>3</sup> )



Gambar 29. Variasi tekanan suara tentang nilai per 1 atm

$$P = 1\text{atm} = 14,7 \text{ Psi} = 1.013 \text{ bars} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Kegunaan factor konversi

$$1\text{Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10\mu \text{ Bar}$$

1Psi = 6894 Pa

Tipe tekanan suara magnitude berkisar dari yang tak terdengar, 20  $\mu\text{Pa}$  atau  $3 \times 10^{-9}$  psi (0 dB, ambang pendengaran) ke ambang nyeri pada perkiraan 60 Pa atau .009 psi (130 dB). Sebuah tingkat percakapan adalah 0,1 Pa (74 dB).

Hal ini paling mudah untuk mengukur tekanan suara di udara dengan sebuah mikrofon. Hal ini dimungkinkan, tapi lebih sulit untuk mengukur kecepatan akustik. Itu sebabnya kita kebanyakan berbicara tentang tekanan suara, karena itu paling mudah untuk diukur.

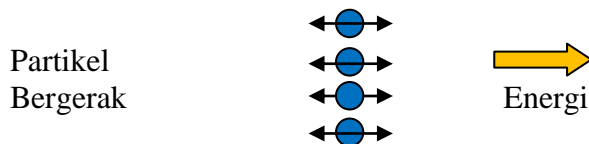
Rasio tekanan untuk kecepatan partikel yaitu dengan jumlah kegunaanya dan itu disebut Impedansi: - impedansi akustik tertentu adalah rasio kompleks (karena kedua  $p$  dan  $u$  adalah jumlah kompleks) dari tekanan efektif suara pada suatu titik pada perangkat media atau mekanis akustik ke partikel kecepatan efektif pada saat itu. Unit mks rayl (Newton / meter kubik)

$$Z = \frac{P}{u}$$

## 5.2. GELOMBANG BUNYI

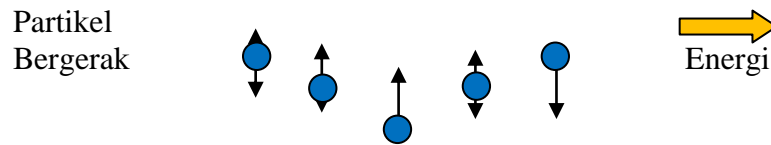
Gangguan suara di perjalanan ruang angkasa. Ada energi transportasi (gangguan menyebar), tetapi tidak ada transfer bersih dari massa (bukan konveksi). Setiap partikel dalam cairan bergerak kembali dan sebagainya seterusnya menjadi satu posisi. Secara umum, gelombang suara dalam media apapun bisa menjadi campuran antara gelombang longitudinal dan gelombang geser, tergantung pada kondisi batasnya.

**Gelombang Longitudinal:** - Tipe ini paling sederhana dari gelombang kompresional (atau gelombang longitudinal) dimana osilasi partikel dalam arah yang sama dengan transportasi energi. Gangguan itu menyebar di arah gerakan partikel. Ini adalah mekanisme utama dalam cairan dan gas karena tegangan geser dapat diabaikan.



**Gelombang Geser:** - partikel bergerak secara ortogonal (tegak lurus) untuk arah di mana gangguan (dan energi) merambat. Dalam padatan, kita dapat memiliki geser transversal dan torsi

gelombang. Gelombang lentur (dalam balok) dan gelombang air adalah campuran antara gelombang geser dan gelombang longitudinal.



### 5.3. KECEPATAN SUARA

Untuk gelombang longitudinal dalam media terbatas, suara bergerak dengan kecepatan  $c$ :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Dimana:

$E$  = Modulus Young untuk material padat atau modulus bulk untuk cairan

$\rho$  = Densitas material

$V$  = Volume

$$\text{Bulk Modulus} = -\frac{V}{\partial V / \partial P}$$

Dalam gas normal, frekuensi terdengar, fluktuasi tekanan terjadi di bawah dasar kondisi adiabatik (panas tidak ditransfer antara partikel gas yang berdekatan). Kecepatan suara kemudian menjadi:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma E}{\rho}}$$

Dimana:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4 \text{ untuk air} \quad \text{dan } P = \rho RT \text{ (Hukum Gas Ideal)}$$

Untuk gas, kecepatan suara adalah semata-mata fungsi dari suhu dan untuk sebagian kecil kelembaban karena yang mengubah campuran gas dan densitasnya.

$$c = \sqrt{\gamma RT} = 20.05\sqrt{T}(K) \quad (\text{meter/sekon}) \quad {}^\circ\text{K} = {}^\circ\text{C} + 273.15$$

$$= 49.03\sqrt{T}(R) \quad (\text{feet/sekon}) \quad {}^\circ\text{R} = {}^\circ\text{F} + 459.7$$

Contoh: @20 °C  $c = 343$  m/s atau 1126 ft/s

\* Kecuali bila tekanan akustik melebihi ~ 10 Pa, dalam hal ini kecepatan suara bervariasi dengan tekanan. Ini termaksud non-linear akustik yang mana berada di luar bahasan ini. Selain itu, biasanya terjadi pada *sonic booms*. (Berapa banyak dB adalah 10 Pa?)

Tergantung pada apa yang media kembangkan dan kecepatan suara yang dapat berubah dengan frekuensi.

**Non-Dispersif Menengah** – Kecepatan suara yang tidak tergantung pada frekuensi, sehingga kecepatan energi transportasi dan perkembangan suara adalah sama. Udara adalah media-non-dispersif.

**Dispersif Menengah** - kecepatan suara adalah fungsi dari frekuensi. Para spasial dan temporal distribusi merupakan gangguan yang akan berkembang terus dan berubah. Setiap komponen frekuensi merambat pada kecepatan fase sendiri, sedangkan energi gangguan menjalar dikecepatan kelompoknya:  $C_g$ . Air adalah contoh dari media dispersif.

#### 5.4. PERSAMAAN GELOMBANG

Fenomena akustik umumnya terkait dengan fluktuasi kecil (akustik linear) yang dijelaskan secara matematis oleh persamaan gelombang linier:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

#### 5.5. PERKEMBANGAN GELOMBANG BIDANG

Untuk perkembangan gelombang bidang (tekanan bervariasi hanya dalam satu dimensi,  $x$ ) gelombang linierisasi persamaan tereduksi menjadi:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Sebagai contoh gelombang bidang yang akan menjadi pembicara pada saluran akhir. Jika kita melihat dengan mikrofon maka kita akan menemukan bahwa tekanan suara konstan terjadi di seluruh dalam tabung. Jika memindai sepanjang penampang pipa maka akan terlihat semua partikel di sepanjang lintas yang bergerak dalam fase pipa. Dengan kata lain, dasar gelombang akan memancar pada bidang. Contoh lain yaitu perkembangan gelombang bidang yang memiliki permukaan datar yang besar getaran yang seragam. Kedekatan langsung dengan permukaan akan menyebabkan tekanan suara konstan.

Secara umum solusi untuk gelombang bidang yaitu memakai tekanan  $p$  yang dibuat antara arah gelombang positif dan negatif:

$$p(x, t) = f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

Secara fisik sesuai dengan tekanan gelombang berjalan di dalam arah  $+x$  dan tekanan gelombang berjalan di dalam arah  $-x$ .

Kecepatan partikel akustik berhubungan dengan tekanan yaitu:  $u(x, t) = \frac{1}{\rho c} p(x, t)$

Impedansi adalah:  $Z = \frac{p(x, t)}{u(x, t)} = \rho c$

( $\rho c$  kadang-kadang disebut impedansi karakteristik medium)

Sejak fungsi apapun dapat diwakili oleh analisis Fourier sebagai jumlah dari potongan harmonik, dasar solusi "*building block*" adalah gelombang sinusoidal yang merambat dalam arah  $x +$ :

$$p(x, t) = A \sin[kx - \omega t + \beta]$$

Dimana:

$\omega$  = Frekuensi (rad/sec)

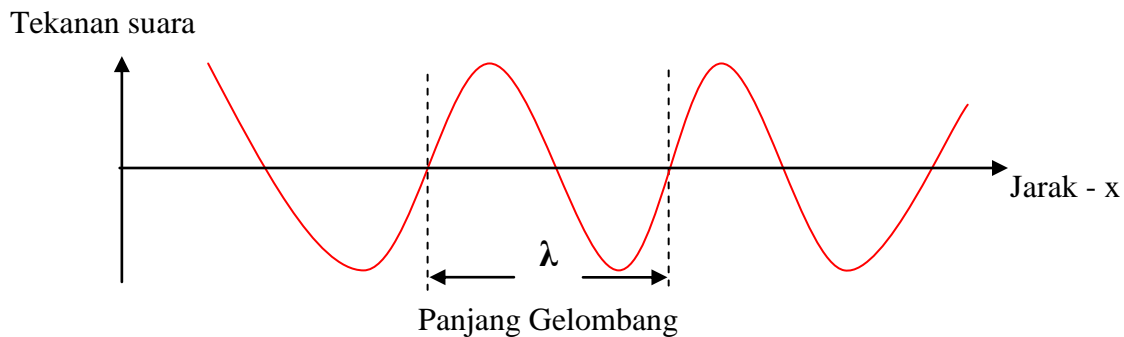
$\beta$  = Sudut fase (radian)

$k = \omega/c = \text{konstanta}$

Ini adalah gelombang yang amplitudo ( $A$ ) tidak bervariasi. Gelombang itu terus berulang sampai  $2\pi n$  radian. Perubahan tersebut dapat disebabkan oleh variasi dalam waktu ( $t$ ), jarak ( $x$ ), atau keduanya. Jika pada waktu diam maka dapat dilihat pada posisi  $x$ , pola spasial mengulangi setiap kali jarak memiliki nilai:

$$X_n = \frac{2\pi n}{k} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Jika kita bisa menghentikan waktu dan melihat distribusi tekanan dalam ruang (lihat Gambar 30):

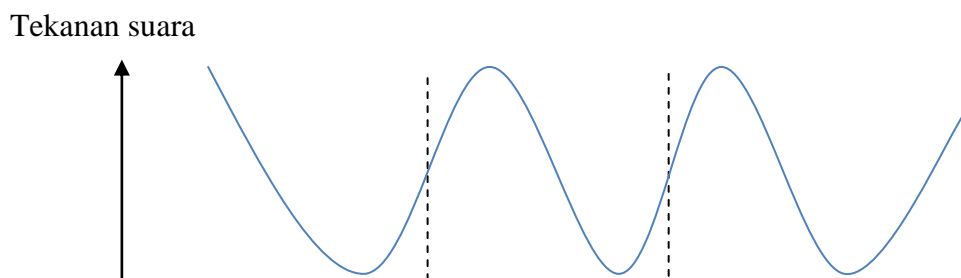


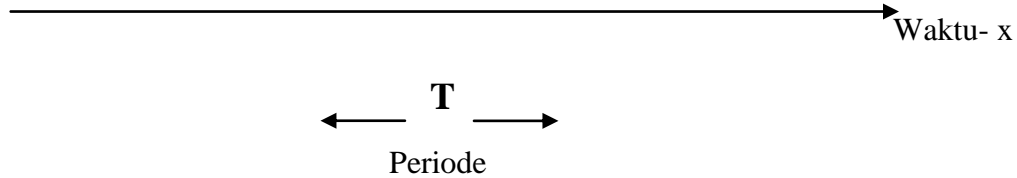
Gambar 30. Hubungan distribusi tekanan pada gelombang bidang per waktu

Kita mendefinisikan  $\lambda$  adalah panjang gelombang sebagai jarak antara pengulangan gelombang:

$$\lambda = \frac{\omega}{c} = 2\pi/k$$

Bagian  $x$  dari persamaan, sekarang bagaimana dengan ketergantungan waktu? Jika kita menempatkan mikrofon dalam ruang (tahan  $x$  konstan dalam persamaan) dan melihat sebuah osiloskop jejak apa mendengar mikrofon, yaitu dapat dilihat pada (Gambar 31):





Gambar 31. Variasi tekanan pada bidang gelombang per jarak

Waktu untuk pengulangan gelombang (periode nya) :  $T = 2\pi / \omega = 1 / f$

Persamaan lain yang berhubungan frekuensi dengan panjang gelombang adalah:  $c = f\lambda$

### 5.6. INTENSITAS GELOMBANG BIDANG

Tekanan akustik dan kecepatan partikel berada dalam fase untuk gelombang bidang, dan karena itu kekuatannya adalah ditransmisikan. Intensitas adalah kekuatan yang ditransmisikan per satuan luas permukaan bertepatan dengan sebuah gelombang depan pada posisi tetap dalam ruang. Definisi umum yang berlaku untuk setiap geometri:

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T pu \, dt = \overline{pu}$$

(Catatan:  $\overline{\quad}$  di atas adalah notasi singkat untuk rata-rata waktu yang lama)

Karena  $p$  dan  $u$  berada dalam fase dan  $p / u = \rho c$  untuk gelombang bidang, kita bisa menulis:

$$I = \frac{\langle p^2 \rangle}{\rho c} = \rho c \langle u^2 \rangle$$

(Catatan: Tanda kurung adalah notasi singkat untuk nilai rata-rata)

Mean (dari) tekanan akustik persegi adalah:  $\langle p^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^2 \, dt$

Tekanan r.m.s. (root mean square) =  $p_{\text{rms}} = \sqrt{\langle p^2 \rangle}$

Sebuah tingkatan suara biasanya mengukur  $p_{\text{rms}}$ .

(Catatan: Untuk gelombang sinus Asinot, tingkat rms adalah 0,707 A)

Ringkasan Gelombang bidang:

- Bidang gelombang memancar dalam satu arah
- Tekanan amplitudo adalah jarak konstan
- Intensitas suara sebanding dengan  $p_{\text{rms}}^2$
- Tekanan dan kecepatan berada dalam fase (yaitu impedansi nyata dan  $= \rho c$ )

### 5.7. PERKEMBANGAN GELOMBANG BOLA

Jika kita memiliki sumber suara titik (dimensi fisik dari sumber jauh lebih kecil dari panjang gelombang), tekanan suara akan konstan pada lingkup sekitar sumber.

Persamaan gelombang dalam koordinat bola untuk sumber titik memancar secara seragam adalah:

$$\frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2}$$

Solusi umum adalah gelombang keluar dan masuk dengan jarak radial:

$$p(r, t) = \frac{1}{r} f_1 \left( t - \frac{r}{c} \right) + \frac{1}{r} f_2 \left( t + \frac{r}{c} \right)$$

(keluar)                      (masuk)

Gelombang keluar mirip dengan kasus gelombang bidang, tetapi besarnya sekarang tergantung pada jarak dari sumber:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \sin[\omega t - kx + \beta]$$



Kecepatan akustik partikel adalah:  $\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$

Jika gelombang keluar, maka kecepatan adalah:

$$u(r, t) = \frac{1}{\rho r^2} \int_0^1 dt + \frac{p(r, t)}{\rho c}$$

Untuk besar nilai  $r$  (dalam hal ini panjang gelombang), istilah ini menjadi diabaikan dan impedansi konvergen  $\rho c$ . Kelengkungan pada bagian depan gelombang menjadi diabaikan dan gelombang berperilaku seperti gelombang bidang. Sebuah jarak akustik besar biasanya didefinisikan sebagai:  $kr \gg 1$

(Jarak yang diukur dalam panjang gelombang adalah besar), di luar jarak ini disebut medan jauh (dengan asumsi tidak ada refleksi).

## 5.8. INTENSITAS GELOMBANG BOLA DAN DAYA

Intensitas gelombang bola di medan jauh adalah sama dengan gelombang bidang:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T pu \, dt = \frac{\langle p^2 \rangle}{\rho c} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

Daya: Sebuah ekspresi umum untuk daya yang berlaku untuk setiap sumber

$$W = \int_s^0 I \, dS$$

(catatan bahwa daya tidak tergantung pada jarak dari sumber).

Jika sumber adalah non-directional, radiator bola, intensitas yang seragam atas bola di sekitar sumber (luas permukaan adalah  $4\pi r^2$ ). Total daya radiasi adalah:

$$W = 4\pi r^2 I$$

Ringkasan Gelombang Bola:

Di jarak jauh ( $kr \gg 1$ ):

Tekanan dan Kecepatan  $u$  berada dalam fase

Tekanan:  $p \propto 1/r$

Intensitas:  $I \propto 1/r^2 p^2$

Impedansi:  $Z = \rho c$  (nyata)

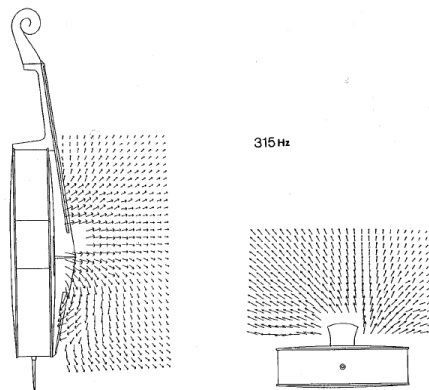
Di jarak dekat:

Impedansi kompleks

Hubungan antara  $p$ ,  $u$  dan  $r$

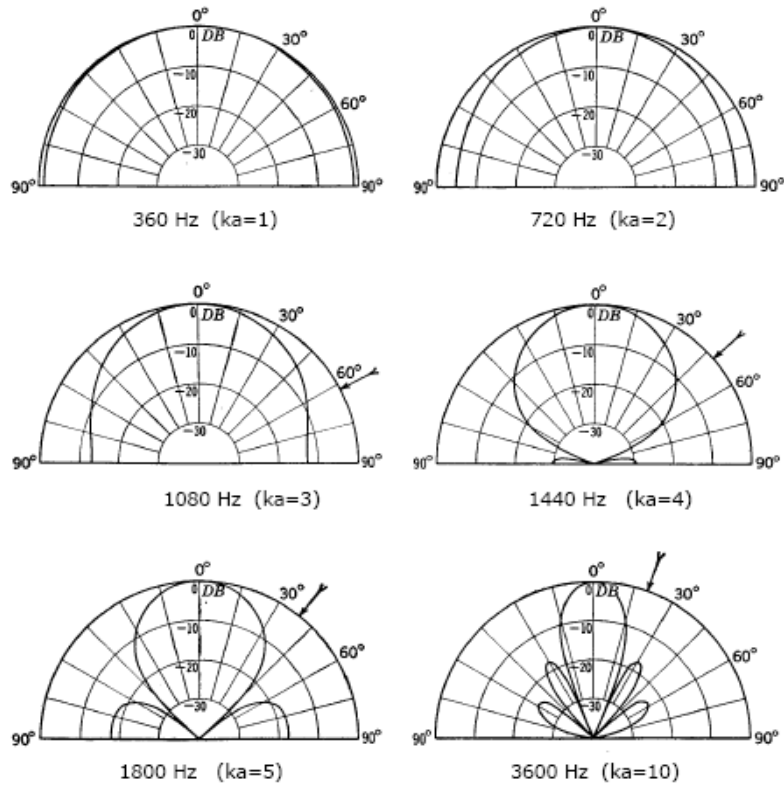
## 5.9. ARAH SUMBER

Sebagian besar sumber nyata tidak memancar secara seragam ke segala arah dan cukup terarah. Wilayah sirkulasi kembali energi lokal yang jelas sangat dekat dengan permukaan selo (di jarak dekat).

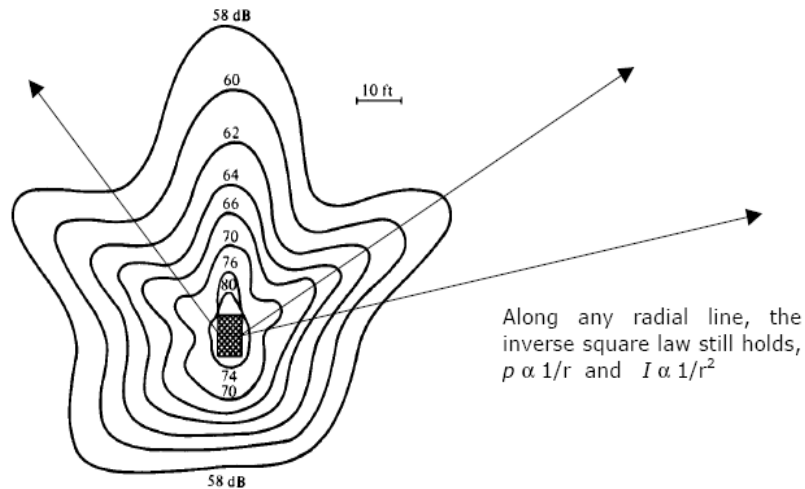


Gambar 32. Pola radiasi dari cello, yang diukur dengan teknik dua mikrofon. Besar dan arah dari intensitas suara ditandai oleh panjang dan arah anak panah.

Tingkat arah tergantung pada ukuran permukaan relatif terhadap radiasi akustik panjang gelombang. Sumber yang relatif fisik besar dengan panjang gelombang suara ( $ka \gg 1$ ) cenderung untuk radiator yang terarah. Seperti yang terlihat pada Gambar 5, misalnya speaker 12", akan hampir Omnidirectional pada 360 Hz ( $ka = 1$ ), tetapi sangat terarah (ditunjukkan oleh pola lobed) pada 3600 Hz ( $ka = 10$ ). Kecenderungan ini diamati untuk sumber dengan frekuensi rendah cenderung memancarkan radiasi sangat seragam, sementara radiasi frekuensi tinggi menjadi sangat terarah.



Gambar 33. Pola radiasi terarah dari piston 12” lingkaran dalam penyekat tak terbatas – sebuah model terbaik untuk penguas suara. (radius = piston)



Gambar 34. Suara tingkat kontur tekanan sekitar sebuah transformator listrik

Pola radiasi dari sebuah transformator listrik yang ditunjukkan pada Gambar 34. Meskipun sumber-sumber ini tidak memancarkan secara seragam tetapi bersama di setiap garis radial yang

ke luar dari sumber dengan jarak jauh, tanpa refleksi, tekanan suara masih sebanding dengan  $1 / r$  dan intensitas sebanding dengan  $1/r^2$ . Konstanta proporsionalitas berbeda untuk setiap radial baris.