

Analisis Mode Gelombang Suara Dalam Ruang Kotak

Ery Wahyuni, Agus Purwanto dan Sumarna

Laboratorium Getaran dan Gelombang, Jurdik Fisika, FMIPA, UNY

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis mode gelombang suara dalam ruang kotak yang di-*drive* pada frekuensi tertentu. Mode yang muncul merupakan penyelesaian persamaan gelombang pada koordinat kartesius dimensi tiga, dengan orde mode l , m dan n .

Metode penelitian yang digunakan adalah metode resonansi. Getaran suara dari *loudspeaker* digunakan untuk men-*drive* ruangan. Mode akan muncul ketika terjadi resonansi antara partikel udara dalam ruangan dengan *loudspeaker*.

Dari hasil penelitian pada ruang kotak dengan ukuran 79 cm x 60 cm x 66 cm yang terbuat dari kaca setebal 5 mm diperoleh tiga jenis mode yaitu mode *axial*, mode *tangensial* dan mode *oblique*. Mode *axial* yang diperoleh pada penelitian adalah mode (1,0,0) muncul pada frekuensi 226 Hz, mode (0,1,0) frekuensi 300 Hz, mode (0,0,1) frekuensi 274 Hz, mode (2,0,0) muncul pada frekuensi 446 Hz, mode (0,2,0) frekuensi 593 Hz dan mode (0,0,2) frekuensi 540 Hz. Mode *tangensial* antara lain: mode (0,1,1) frekuensi 403 Hz, mode (1,0,1) frekuensi 353 Hz dan mode (1,1,0) frekuensi 373 Hz. Dan mode *oblique* yang diperoleh adalah mode (1,1,1) pada frekuensi 462 Hz.

Kata kunci: mode, gelombang suara, ruang kotak dan frekuensi resonansi

PENDAHULUAN

Ruangan yang tidak mempunyai bentuk, bahan dan ukuran sesuai dengan kegunaannya akan banyak memunculkan masalah akustik yang dapat menurunkan kualitas suara. Salah satu masalah pada akustik ruangan adalah mode ruangan, yang sering muncul pada frekuensi 20 Hz sampai 200 Hz. Mode ruangan dapat mengakibatkan ketidakmerataan intensitas suara pada setiap titik dalam ruangan. Munculnya mode ruangan bergantung pada frekuensi sumber suara dan ukuran ruangan.

Untuk mempelajari mode ruangan atau mode gelombang suara dalam ruang dapat digunakan metode resonansi atau metode gelombang tegak. Pada metode ini *loudspeaker* digunakan sebagai sumber suara yang diletakkan pada sudut ruang dan *microphone* digunakan untuk mengukur tekanan suara pada setiap titik dalam ruang. Dengan menggunakan metode tersebut, penelitian ini akan menganalisis mode gelombang suara dalam ruang kotak pada frekuensi tertentu.

TEORI

Persamaan gelombang suara pada koordinat Kartesius dimensi tiga adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \tag{1}$$

dengan c_f merupakan kecepatan suara pada fluida (Elmore and Heald, 1969: 138). Sebuah ruang kotak memiliki dimensi L_x , L_y dan L_z dengan seluruh permukaan dinding ruangan rigid sempurna, dapat diasumsikan bahwa udara yang berada di sekitar dinding diam (tidak bergerak) sehingga:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=0} &= \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=L_x} = 0 \\ \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_{y=0} &= \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_{y=L_y} = 0. \\ \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{z=0} &= \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{z=L_z} = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Syarat batas tersebut digunakan untuk menentukan solusi umum dari persamaan (1). Persamaan (1) dapat diselesaikan dengan metode separasi variabel yang mempunyai solusi berbentuk:

$$p(x, y, z, t) = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \cdot T(t). \tag{3}$$

Substitusi $p(x,y,z,t)$ ke persamaan (1) menghasilkan:

$$YZT \frac{d^2 X}{dx^2} + XZT \frac{d^2 Y}{dy^2} + XYT \frac{d^2 Z}{dz^2} = \frac{XYZ}{c_f^2} \frac{d^2 T}{dt^2}. \tag{4}$$

Kemudian kedua ruas persamaan (4) dikalikan dengan $\frac{c_f^2}{XYZT}$, menghasilkan:

$$c_f^2 \left(\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} \right) = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2}. \tag{5}$$

Pada persamaan (5) ruas kiri hanya merupakan fungsi posisi dan ruas kanan hanya fungsi waktu. Persamaan tersebut dipenuhi jika dan hanya jika kedua ruas sama dengan konstanta, misal $-\omega^2$, sehingga persamaan (5) menjadi:

$$c_f^2 \left(\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} \right) = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2. \quad (6)$$

Tanda minus dipilih untuk mendapatkan penyelesaian persamaan tersebut dalam bentuk sinus atau cosinus. Persamaan (6) dapat dipecah menjadi dua persamaan yakni:

$$\frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2 \quad (7)$$

dan

$$c_f^2 \left(\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} \right) = -\omega^2. \quad (8)$$

Persamaan (7) dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) = 0, \quad (9)$$

yang mempunyai solusi riil:

$$T(t) \propto \begin{matrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{matrix}. \quad (10)$$

Karena penyelesaiannya dapat dalam bentuk sinus dan cosinus maka persamaan (10) dapat dituliskan dalam bentuk eksponensial seperti berikut:

$$T(t) \propto e^{i\omega t}. \quad (11)$$

Persamaan (8) menjadi:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -\frac{\omega^2}{c_f^2}. \quad (12)$$

Kemudian didefinisikan $k = \frac{\omega}{c_f}$, maka persamaan (12) menjadi:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 = 0. \quad (13)$$

Suku pertama dari persamaan (13) merupakan fungsi x yang bebas terhadap y dan z , demikian juga dengan suku kedua dan ketiga. Keempat bentuk suku dalam persamaan tersebut tidak dapat bernilai sama dengan nol untuk sembarang nilai x , y ataupun z , sehingga (Kinsler.et.all, 1982: 81):

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + k_x^2 X(x) = 0, \quad \frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + k_y^2 Y(y) = 0, \quad \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} + k_z^2 Z(z) = 0, \quad (14)$$

dengan $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$. Solusi riil dari persamaan (14) adalah sebagai berikut:

$$X(x) \propto \frac{\cos k_x x}{\sin k_x x}, \quad Y(y) \propto \frac{\cos k_y y}{\sin k_y y}, \quad Z(z) \propto \frac{\cos k_z z}{\sin k_z z}. \quad (15)$$

Solusi pada persamaan (15) tersebut menunjukkan bahwa persamaan gelombang dapat dalam bentuk cosinus maupun sinus. Secara matematis bentuk kesebandingan dapat dituliskan menjadi bentuk persamaan dengan menambahkan suatu konstanta di depannya. Misal diambil nilai konstanta A , dimana A adalah nilai maksimum p . Untuk mendapatkan persamaan gelombang yang sesuai dengan kondisi ideal sebuah ruangan, seperti yang disebutkan pada persamaan (2)

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_{y=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{z=0} = 0,$$

dapat dipilih persamaan gelombang yang berbentuk cosinus, karena turunan pertama bentuk cosinus terhadap dimensi panjang adalah bentuk sinus yang akan bernilai nol setiap argumennya bernilai nol. Persamaan gelombang sementara yang diperoleh adalah $p(x, y, z) = A \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z$. Untuk mengujinya dapat dilakukan dengan menurunkan persamaan tersebut, misalnya terhadap x , sehingga $\partial p / \partial x = -A k_x \sin k_x x \cos k_y y \cos k_z z$. Jika diambil nilai $x = 0$ akan diperoleh hasil $\partial p / \partial x = 0$. Keadaan tersebut sudah sesuai dengan syarat batas yang diberikan pada $x = 0$. Dengan menggunakan asumsi yang sama maka persamaan gelombang bentuk cosinus tersebut dapat memenuhi semua syarat batas pada $x = 0$, $y = 0$ dan $z = 0$. Setelah menggabungkan bentuk solusi dari $T(t)$ maka diperoleh persamaan gelombang sebagai berikut:

$$p(x, y, z, t) = A \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z e^{i\omega t}. \quad (16)$$

Dengan menerapkan kembali syarat batas bagian kedua persamaan (2) pada persamaan (16) seperti berikut:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = A(-k_x \sin k_x x) \cos k_y y \cos k_z z e^{i\omega t} \quad (17)$$

syarat batas tersebut dapat dipenuhi jika dan hanya jika $\sin k_x L_x = 0$, sehingga:

$$k_x = \frac{l\pi}{L_x}, l = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (18)$$

Dengan menggunakan cara yang sama maka diperoleh:

$$k_y = \frac{m\pi}{L_y}, m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

$$k_z = \frac{n\pi}{L_z}, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (20)$$

Substitusi persamaan (18), (19) dan (20) ke persamaan (16) menghasilkan:

$$p(x, y, z, t) = A \cos\left(\frac{l\pi}{L_x}\right)x \cos\left(\frac{m\pi}{L_y}\right)y \cos\left(\frac{n\pi}{L_z}\right)z e^{i\omega_{lmn}t}. \quad (21)$$

Menggunakan persamaan (18), (19) dan (20) juga dapat didefinisikan nilai f seperti di bawah ini:

$$f = \frac{c_f}{2} \left[\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2 \right]^{1/2}, \quad (22)$$

dengan f merupakan frekuensi resonansi ruangan. Pada frekuensi resonansi tersebut akan muncul mode-mode ruang. Munculnya mode ditandai dengan terbentuknya bidang *nodal* dalam ruang. Bidang *nodal* merupakan bidang pada ruang yang simpangan getarannya nol atau minimum. Bentuk persamaan (21) memberikan gelombang tegak dimensi tiga pada ruang dengan bidang *nodal* paralel terhadap dinding dan di antara dua bidang *nodal*, tekanan akan bervariasi secara sinusoidal (Kinsler.et.all, 1982: 216).

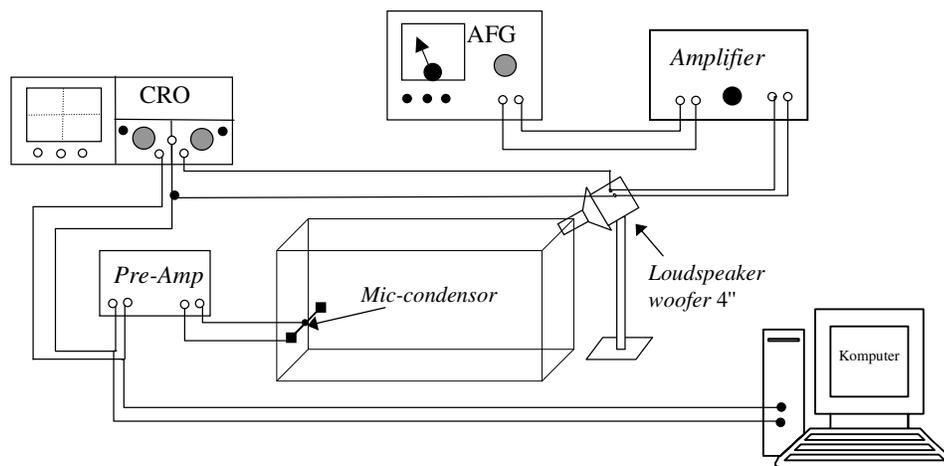
Mode-mode normal pada ruang bergantung pada nilai l , m dan n dari penyelesaian persamaan gelombang. Ketika hanya salah satu yang bernilai satu, misal $l = 1$, $m = 0$ dan $n = 0$, $Y(y)$ dan $Z(z)$ tidak lagi bergantung pada nilai y dan z sehingga persamaan (21) menjadi $p(x, t) = A \cos(l\pi/L_x)x e^{i\omega_{lmn}t}$. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai p akan berfluktuasi secara cosinus hanya pada sumbu x saja. Jika nilai $l = 1$, maka akan muncul mode dengan satu bidang *nodal* pada $x = L_x/2$. Mode yang mempunyai *nodal* hanya pada salah satu sumbu

disebut sebagai mode *axial*. Dengan asumsi yang sama maka dapat diperoleh beberapa bentuk mode yang lain. Mode dimana muncul *nodal* pada dua sumbu yang berbeda secara bersamaan disebut sebagai mode *tangensial*. Dan mode yang memiliki *nodal* pada ketiga sumbu disebut sebagai mode *oblique*.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di laboratorium Getaran dan Gelombang, Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY. Rangkaian alat yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 1. Metode yang digunakan adalah metode resonansi. Pada metode ini *loudspeaker* digunakan sebagai sumber suara yang diletakkan pada sudut ruang kotak dengan ukuran 79 cm x 60 cm x 66 cm yang terbuat dari kaca setebal 5 mm. *Microphone* digunakan untuk mengukur tekanan suara pada setiap titik dalam ruang pada saat terjadi resonansi antara partikel udara dalam ruangan dengan *loudspeaker*.

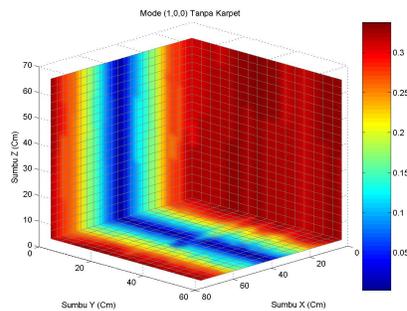
Data yang sudah diperoleh disusun dalam bentuk matrik tiga dimensi menggunakan program *Matlab 2006a*. Matrik yang diperoleh ditampilkan dalam koordinat Kartesius dimensi tiga menggunakan *plot tool* yang sudah tersedia dalam *Matlab 2006a*. Mode yang dimaksudkan dapat ditampilkan dalam bentuk degradasi warna. Skala warna yang digunakan sesuai dengan skala amplitudo yang diperoleh dari data.



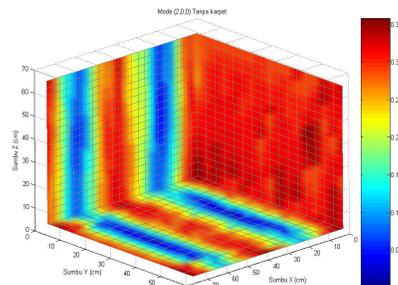
Gambar 1. Rangkaian alat pada penelitian

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

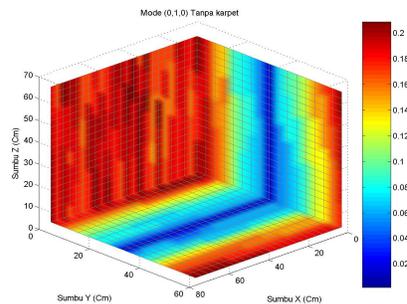
Dengan mempertimbangkan ukuran kotak yang tidak terlalu besar, maka mode yang dimunculkan dibatasi hanya pada mode yang mempunyai jumlah bidang *nodal* sedikit, yakni satu atau dua pada setiap sumbunya. Dari hasil penelitian yang diperoleh dapat dilihat bahwa ruang kotak mempunyai tiga macam mode ruang, yaitu mode *axial*, *tangensial* dan *oblique*. Hasil pemunculan mode dapat dilihat pada Gambar 2.



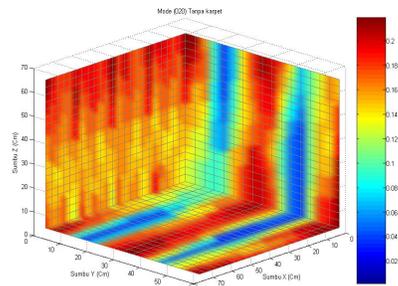
(a) Mode (1,0,0)



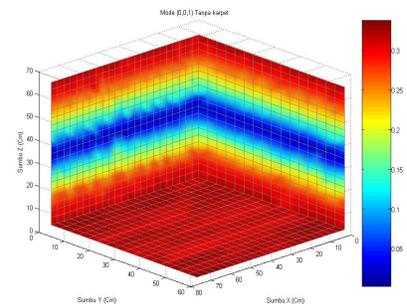
(b) Mode (2,0,0)



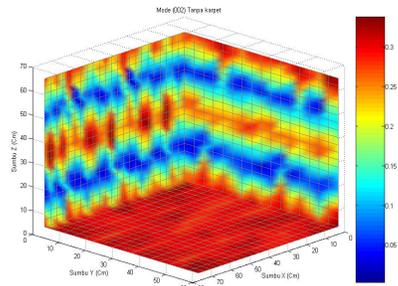
(c) Mode (0,1,0)



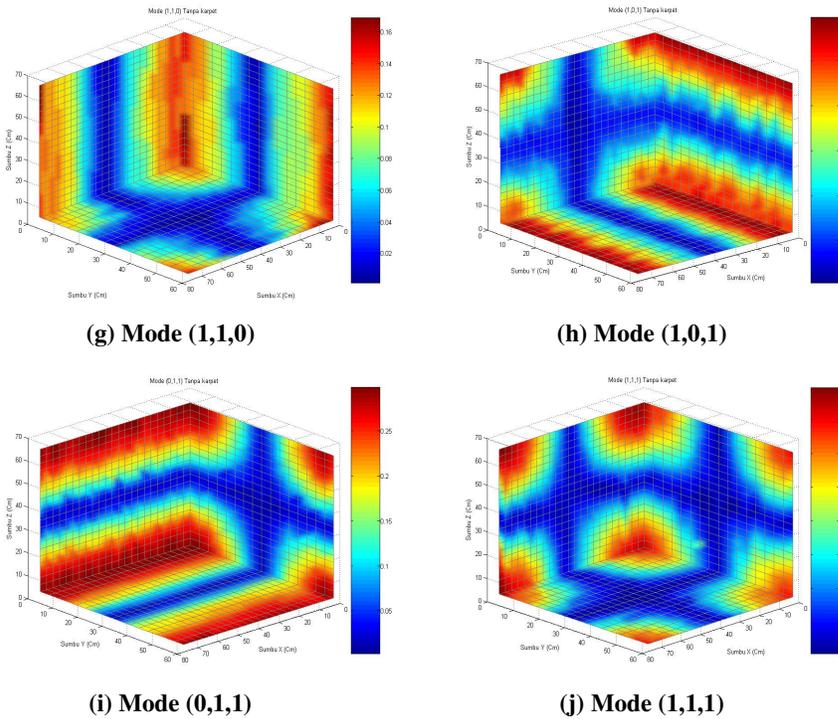
(d) Mode (0,2,0)



(e) Mode (0,0,1)



(f) Mode (0,0,2)



Gambar 2. Mode-mode gelombang suara dalam ruang kotak yang berhasil dimunculkan

Ketidaktepurnaan beberapa mode, seperti pada mode (0,2,0) dan mode (0,0,2) disebabkan oleh ukuran ruangan yang kurang besar untuk memunculkan dua bidang *nodal* pada satu sumbu secara bersamaan. Berikut perbandingan data frekuensi pemunculan mode pada penelitian dengan frekuensi terhitung.

Tabel 1. Perbandingan frekuensi pemunculan mode hasil penelitian dengan teori

Mode	Frekuensi (Hz)	
	Teori	Percobaan
(1,0,0)	217,7	226
(0,1,0)	286,6	300
(0,0,1)	262,5	274
(2,0,0)	435,4	446
(0,2,0)	573,3	593
(0,0,2)	525,2	540
(1,1,0)	359,9	373
(1,0,1)	341,1	353
(0,1,1)	388,8	403
(1,1,1)	445,0	462

Data frekuensi hasil penelitian dengan frekuensi hasil perhitungan secara teoritis mempunyai selisih nilai yang tidak begitu besar. Pada tabel di atas terlihat bahwa frekuensi resonansi mode yang terukur seluruhnya bernilai lebih tinggi dari pada frekuensi resonansi hasil perhitungan secara teori. Frekuensi teori tersebut dihitung dengan anggapan bahwa dinding ruangan rigid sempurna, padahal pada penelitian ini dinding yang digunakan masih juga bergetar walaupun sudah digunakan bahan kaca yang cukup tebal. Dengan menggunakan bahan kaca tersebut, faktor serapan bahan tidak dapat diabaikan begitu saja. Serapan bahan berpengaruh pada pergeseran bidang *nodal*, sehingga jarak bidang *nodal* yang terukur lebih kecil dari pada jarak bidang *nodal* seandainya dinding ruang benar-benar rigid. Dengan demikian nilai λ yang digunakan untuk menentukan nilai c juga lebih pendek. Akibat dari hal tersebut frekuensi yang dihitung secara teori bernilai lebih kecil.

KESIMPULAN

Dengan mengatur frekuensi *loudspeaker* sebagai sumber suara, hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi resonansi dapat memunculkan mode-mode gelombang suara dalam ruang kotak. Diperoleh tiga jenis mode dalam ruang kotak yaitu mode *axial*, mode *tangensial* dan mode *oblique*.

DAFTAR PUSTAKA

- Elmore, William.C, Heald, Mark.A. (1969). *Physics of Wave*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
- Kinsler, Lawrence.E, Frey, Austin.R, Coppens, Alan.B, Sanders, James.V. (1982). *Fundamental of Acoustics, 3rd ed*. New York: John Willey & Sons.