

ANALISIS MODE GETAR MEMBRAN *LOUDSPEAKER*

ANALYSIS OF *LOUDSPEAKER* DIAPHRAGM VIBRATION MODES

Rabani Adiet Pratama*, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta
Agus Purwanto, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta
*e-mail: rabaniadiet.2022@student.uny.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menentukan secara analitik letak titik simpul pada mode getar membran *loudspeaker* dan (2) membuktikan dan mengukur nilai frekuensi resonansi serta letak titik simpul pada mode getar *loudspeaker* secara eksperimen. Penelitian secara analitik dilakukan dengan menyelesaikan persamaan gelombang pada koordinat polar guna memprediksi letak simpul. Secara empiris, identifikasi frekuensi resonansi dan letak simpul divalidasi menggunakan pemetaan sensor piezoelektrik, titik minimum amplitudo merepresentasikan titik simpul. Komparasi kemudian dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian antara model membran ideal dengan kondisi aslinya, baik pada frekuensi resonansi maupun letak titik simpul getarnya. Hasil Penelitian mengonfirmasi keberadaan pola getar mode (1,1), (2,1), (1,2), dan (2,2). Komparasi menunjukkan bahwa seluruh frekuensi resonansi mengalami deviasi penurunan akibat massa tambahan sensor piezoelektrik. Pada pencarian simpul garis mendeteksi fenomena pelengkungan garis simpul dan pada simpul melingkar terjadi pergeseran letak simpul yang menjauhi titik prediksi menggunakan akar fungsi Bessel.

Kata Kunci: *frekuensi resonansi, titik simpul, fungsi Bessel, piezoelektrik, Loudspeaker*

Abstract. This study aims to: (1) analytically determine the locations of nodal points in the vibration modes of a loudspeaker membrane, and (2) experimentally verify and measure the resonance frequencies and the locations of these nodal points. The analytical approach involves solving the wave equation in polar coordinates to predict the positions of the nodes. Empirically, the resonance frequencies and nodal locations are identified and validated through mapping with a piezoelectric sensor, where points of minimum amplitude represent the nodal points. A comparison is then conducted to evaluate the agreement between an ideal membrane model and the actual physical system, specifically regarding resonance frequencies and the locations of vibration nodes. The results confirm the existence of vibration modes (1,1), (2,1), (1,2), and (2,2). The comparison reveals a downward shift in all resonance frequencies, attributed to the additional mass of the piezoelectric sensor. Regarding the nodal lines, a curvature phenomenon is observed, while for the circular nodes, a displacement occurs—shifting the nodes further away from the positions predicted using the roots of the Bessel function.

Keywords: *resonance frequency, nodal point, Bessel function, piezoelectric, loudspeaker*

PENDAHULUAN

Idealnya sebuah membran *loudspeaker* bergerak maju-mundur secara serentak layaknya piston yang kaku, pada umumnya membran *loudspeaker* jauh lebih kompleks. Meskipun realitanya membran memiliki massa dan kekakuan layaknya sebuah plat, pendekatan analitik seringkali menyederhanakannya sebagai membran ideal lentur yang memiliki kecenderungan alami untuk bergetar pada frekuensi-frekuensi tertentu atau yang biasa disebut frekuensi alami. Masalah muncul ketika sinyal audio yang masuk memiliki frekuensi yang sama atau mendekati frekuensi alami tersebut sehingga menyebabkan terjadinya resonansi. Fenomena ini disebut *cone break-up* (Colloms, 2018). Pada kondisi ini, membran tidak lagi bergerak seragam, melainkan mengalami perubahan gerakan dimana sebagian permukaan bergerak maju dan sebagian lainnya bergerak mundur.

Munculnya resonansi yang tidak diinginkan dan mode *break-up* berdampak langsung pada penurunan kualitas suara. Getaran yang tidak terkontrol akan menyebabkan distorsi harmonik, di mana *loudspeaker* menghasilkan bunyi tambahan yang tidak ada dalam rekaman aslinya, serta menciptakan respon frekuensi yang tidak rata. Akibatnya, suara yang dihasilkan terdengar cacat, pecah, atau mengalami pewarnaan (*coloration*) yang mengganggu pendengar (Kinsler *et al.*, 2000). Oleh karena itu, bagi perancang sistem audio, mengetahui secara presisi dimana letak frekuensi alami membran adalah syarat mutlak.

Demi mengatasi permasalahan resonansi dan distorsi tersebut agar tidak memerlukan proses uji coba berulang yang memakan biaya dan waktu, pendekatan melalui pemodelan matematika menjadi solusi yang mutlak diperlukan. Sifat dinamis membran dapat disimulasikan dan diprediksi secara teori sebelum bentuk fisiknya dirancang. Hal ini memberikan kebebasan bagi perancang untuk mengoptimalkan parameter fisis seperti tegangan permukaan, densitas material, dan dimensi jari-jari guna menjaga frekuensi alami agar berada di luar rentang kerja yang kritis (Beranek & Mellow, 2012). Metode ini diperkuat oleh penelitian dari Liechti (2021) yang membuktikan bahwa kalkulasi matematis yang presisi pada tahap perancangan awal sangat menentukan keberhasilan fabrikasi *loudspeaker* berkinerja tinggi, terutama dalam memprediksi respons impedansi dan efisiensi akustik yang akurat.

Dalam pemodelan matematika kerucut *loudspeaker*, pendekatan sebagai membran melingkar seringkali digunakan untuk memprediksi pola getaran tersebut. Investigasi mengenai karakteristik getaran ini telah lama dirintis secara visual melalui metode pola Chladni, yakni dengan menaburkan material ringan seperti pasir atau serbuk di atas permukaan membran yang digetarkan untuk melihat letak simpulnya. Namun, penerapan metode visual ini pada bentuk kerucut memiliki kendala fisik yang mendasar; kemiringan membran dan gaya gravitasi menyebabkan material taburan terus merosot menumpuk ke bagian tengah kerucut. Meskipun beberapa eksperimen adaptif terdahulu mencoba mengatasi hal ini dengan memutar perangkat kerucut secara sentrifugal agar gaya lecutannya dapat menahan pasir tetap berada pada garis simpul di lereng membran, metode tersebut dinilai sangat rumit secara teknis dan rentan terhadap ketidakakuratan pengukuran spasial (Partridge, 1950). Secara analitik, letak garis-garis simpul dan frekuensi alami dari sebuah membran melingkar yang bergetar dapat diprediksi melalui penyelesaian persamaan gelombang yang melibatkan akar dari fungsi Bessel.

METODE

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan antara lain *Loudspeaker Curve 8 Inch – Woofer*, mikrofon, Piezoelektrik berdiameter 12 mm, Magnet Neodymium, *Audio Frequency Generator*, *amplifier*, dan osiloskop.

Tahap Eksperimen

Prosedur eksperimen diawali dengan menstabilkan instrumen elektronik dan mengatur keluaran gelombang sinusoidal beramplitudo konstan dari AFG menuju *loudspeaker*, lalu memvariasikan frekuensinya untuk mengidentifikasi titik-titik frekuensi resonansi murni menggunakan mikrofon. Pemetaan pola vibrasi dilakukan menggunakan sensor piezoelektrik pada setiap frekuensi resonansi yang ditemukan untuk melacak garis simpul azimuth (pemindaian memutar dari 0° hingga 360°) dan cincin simpul radial (pemindaian linear menuju tepi membran). Titik-titik simpul tersebut secara fisis diidentifikasi ketika osiloskop menampilkan amplitudo tegangan minimum absolut, di mana jarak radiusnya kemudian diukur secara presisi menggunakan jangka sorong.

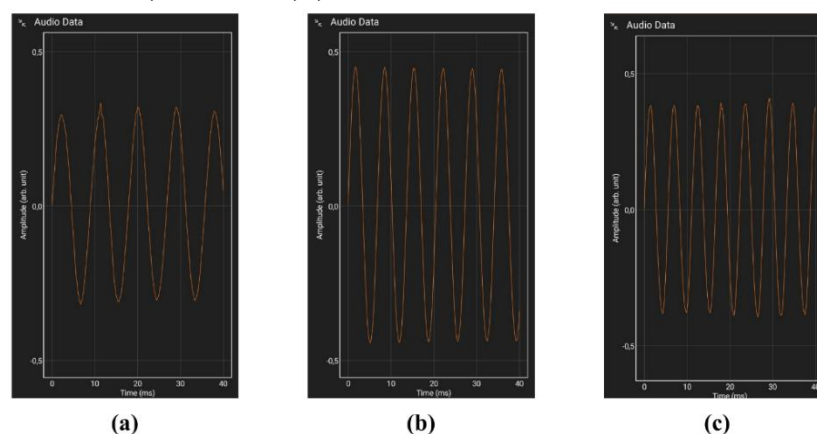
Tahap Perhitungan analitik

Tahap perhitungan analitik dilakukan dengan menggunakan frekuensi hasil eksperimen dan letak titik simpul untuk memprediksi letak frekuensi resonansi dan mode getar berikutnya. Serta menghitung deviasi pergeseran frekuensi resonansi akibat pembebanan massa dari piezoelektrik yang ditambah magnet neodimium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Loudspeaker yang digunakan pada penelitian ini adalah *woofer* berdiameter 18 cm dengan material membran berbahan dasar *weatherproof cone paper*. Pada penelitian ini serangkaian alat yang digunakan terdiri dari *Audio Frequency Generator*, *amplifier*, osiloskop digital RIGOL DS1052, dan *loudspeaker*. Masukan sinyal berasal dari *Audio Frequency Generator* yang berupa sinusoidal dengan frekuensi tertentu yang selanjutnya dikuatkan oleh *amplifier* dan kemudian diteruskan ke *loudspeaker*.

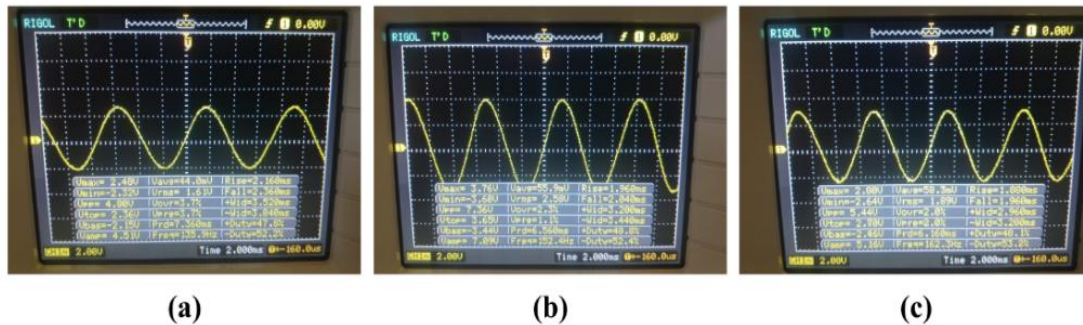
Pengambilan data frekuensi resonansi pada penelitian ini dilakukan melalui dua pendekatan sensor, yaitu menggunakan mikrofon yang didekatkan dengan *loudspeaker* tanpa menyentuhnya dan piezoelektrik yang dilekatkan dengan magnet neodimium. Pada saat pengambilan data, *loudspeaker* di beri frekuensi mulai dari 100 Hz hingga 350 Hz; ketika menggunakan mikrofon terdapat 4 frekuensi resonansi yang terdeteksi yaitu pada frekuensi 162,3 Hz pada Gambar ; 187,9 Hz pada Gambar ; 277,5 Hz pada Gambar ; dan 300,4 Hz pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4.



Gambar 4. 1. Bukti frekuensi resonansi: (a) Amplitudo pada frekuensi 160,0 Hz, (b) Amplitudo maksimum pada frekuensi 162,3 Hz, (c) Amplitudo pada frekuensi 165,0 Hz

Tahap pembuktian yang memvalidasi bentuk fisis dari mode-mode getar membran *loudspeaker* adalah melalui pemetaan secara langsung. Berbeda dengan mikrofon yang menangkap variasi tekanan gelombang akustik di udara, penelitian ini mendayagunakan

piezoelektrik berdiameter 12 mm untuk mengukur parameter regangan mekanis secara langsung. Piezoelektrik memiliki karakteristik transduser murni yang mengubah regangan material menjadi muatan listrik. Besaran muatan listrik ini secara empiris direpresentasikan sebagai fluktuasi amplitudo tegangan puncak ke puncak (*peak to peak voltage/Vpp*) pada layar osiloskop.



Gambar 4. 2. Bukti frekuensi resonansi: (a) Amplitudo pada frekuensi 135.9 Hz, (b) Amplitudo maksimum pada frekuensi 152,4 Hz, (c) Amplitudo pada frekuensi 162.3 Hz

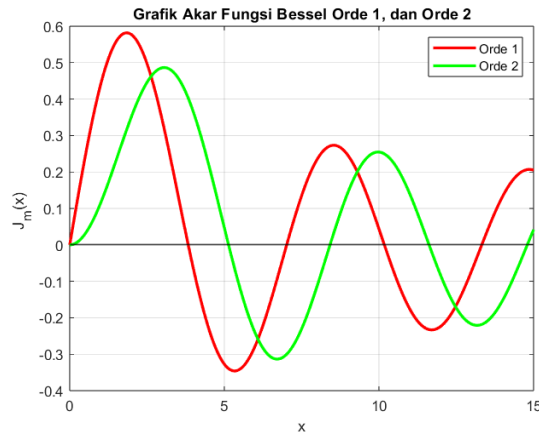
Selanjutnya, pengambilan data frekuensi resonansi dilakukan menggunakan sensor piezoelektrik melalui metode pemindaian spasial di sepanjang permukaan membran *loudspeaker*. Pemetaan menggunakan piezoelektrik secara fisis memberi beban tambahan pada membran yang mengakibatkan terjadinya deviasi pada titik frekuensi resonansi yang awalnya bernilai 162,5 Hz, mengalami penurunan menjadi 152,4 Hz seperti pada Gambar 4.5.

Penelusuran dilanjutkan untuk mencari mode (2,1). Namun, pada saat menggunakan sensor piezoelektrik, fluktuasi amplitudo tegangan yang menjadi penanda utama terjadinya resonansi pada mode ini sangat sulit teramati. Kondisi ini tidak merujuk pada kegagalan instrumen, melainkan dapat diinterpretasikan sebagai konsekuensi fisis dari efek redaman mekanis. Massa fisis sensor sebesar 6,8 gram menginduksi rasio pembebanan yang berlebih terhadap getaran pada mode (2,1).

Mengingat visualisasi simpul sulit teramati secara langsung menggunakan sensor piezoelektrik, maka penentuan mode (2,1) pada frekuensi 187,9 Hz didasarkan pada pendekatan dari akar fungsi Bessel. Secara matematis dan fisis, letak frekuensi resonansi pada membran sirkular berbanding lurus dengan nilai akar fungsi Bessel (Kinsler *et al.*, 2000). Berdasarkan akar fungsi Bessel, nilai akar fundamental orde pertama $j_{1,1}$ adalah 3,8317, dan nilai diskrit terdekat yang menyusul tepat setelahnya adalah akar orde kedua $j_{2,1}$ yaitu 5,1356. Visualisasi letak akar-akar fungsi Bessel tersebut disajikan pada Gambar 4. 6. dan Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1. Akar Fungsi Bessel jenis pertama orde $m = 1,2$.

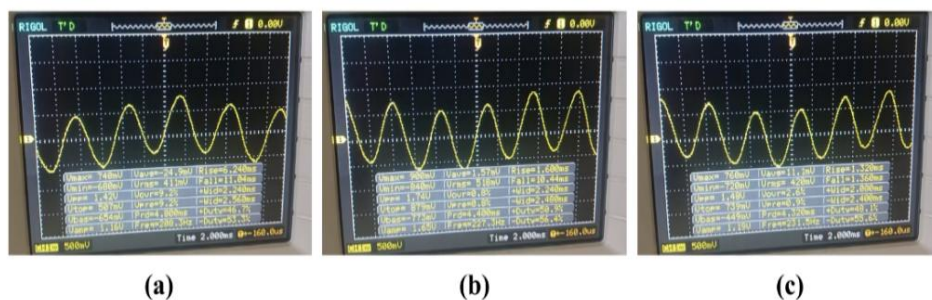
$j_1(x)$	$j_2(x)$
3,8317	5,1356
7,0156	8,4172
10,1735	11,6198
13,3237	14,7960



Gambar 4. 3. Grafik Fungsi Bessel jenis pertama orde $m = 1,2$.

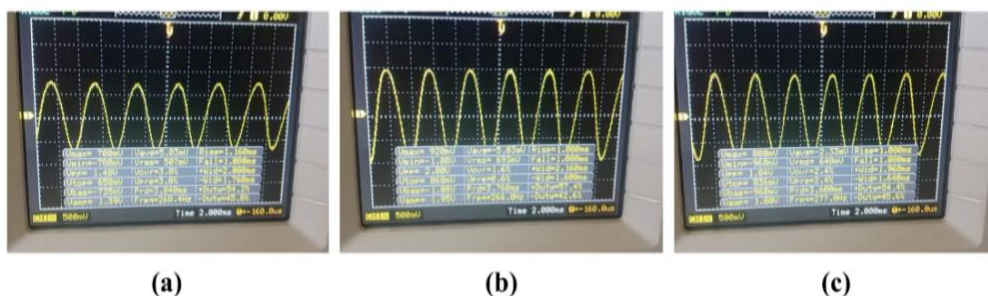
Berdasarkan urutan titik potong akar pada Gambar 4.6. terkonfirmasi secara teori bahwa setelah melewati mode (1,1), mode pada frekuensi resonansi berikutnya adalah mode (2,1). Kalkulasi ini berkorelasi linear dengan data frekuensi resonansi hasil mikrofon, di mana puncak frekuensi yang muncul tepat setelah frekuensi resonansi 162,3 Hz terekam pada nilai 187,9 Hz. Maka titik frekuensi 187,9 Hz ditetapkan sebagai Mode (2,1).

Berdasarkan deret akar fungsi Bessel, setelah melewati mode (2,1), mode yang terbentuk pada frekuensi resonansi berikutnya adalah mode (1,2). Merujuk pada frekuensi resonansi yang terekam menggunakan mikrofon, frekuensi resonansi berikutnya terekam pada nilai 277,0 Hz. Akan tetapi, ketika proses pemetaan menggunakan sensor piezoelektrik efek pembebanan massa menyebabkan frekuensi resonansi mengalami pergeseran dan terdeteksi pada frekuensi 227,0 Hz seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 4. Bukti frekuensi resonansi: (a) Amplitudo pada frekuensi 200,3 Hz, (b) Amplitudo maksimum pada frekuensi 227,3 Hz, (c) Amplitudo pada frekuensi 231,5 Hz

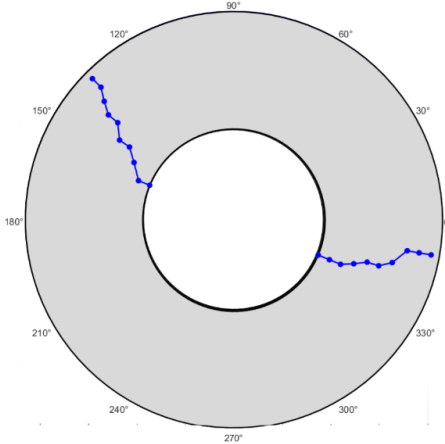
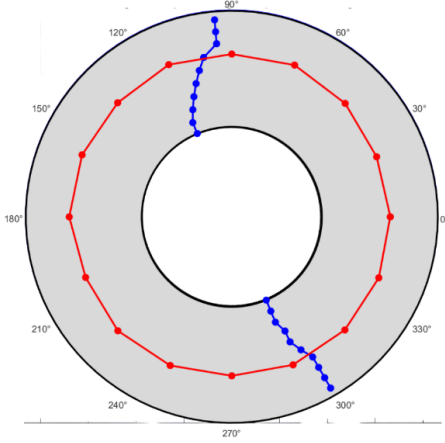
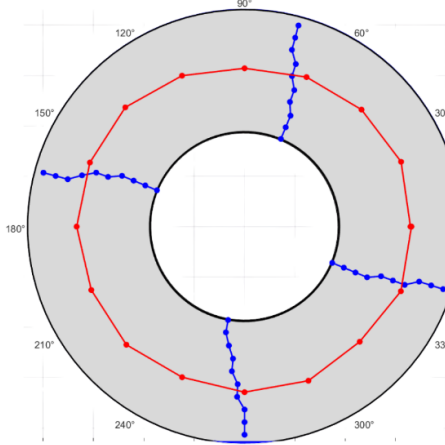
Penelusuran menggunakan piezoelektrik dilanjut pada frekuensi resonansi hasil rekaman mikrofon pada nilai 299,1 Hz. Namun, akibat adanya penambahan massa dari sensor piezoelektrik, titik resonansi tersebut mengalami deviasi dan terdeteksi pada frekuensi 266,0 Hz seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 5. Bukti frekuensi resonansi: (a) Amplitudo pada frekuensi 260,4 Hz, (b) Amplitudo maksimum pada frekuensi 266,0 Hz, (c) Amplitudo pada frekuensi 277,0 Hz

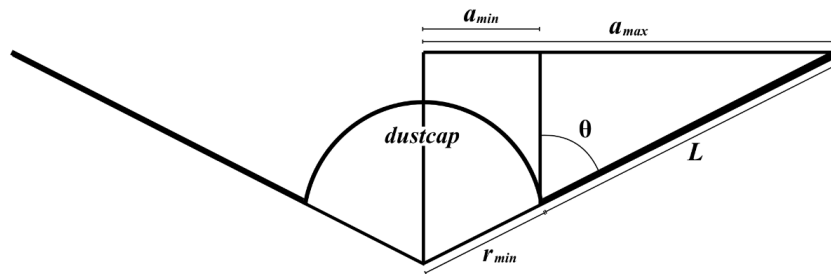
Identifikasi letak simpul secara fisis direpresentasikan oleh pembacaan nilai amplitudo minimum pada sensor piezoelektrik. Pemetaan koordinat spasial titik simpul tersebut selanjutnya diplot dalam koordinat polar pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 2. Pola Mode Getar Hasil Eksperimen Menggunakan Piezoelektrik

Frekuensi (Hz)	Pola Mode Getar	<i>m</i>	<i>n</i>
152,4		1	1
227,3		1	2
266,0		2	2

Tahap awal dalam menganalisis mode getar membran *loudspeaker* adalah menentukan parameter fisis serta menetapkan batas-batas koordinat pada membran. Pemodelan matematika menggunakan fungsi Bessel membutuhkan titik acuan radial ($r = 0$) yang berada pada pusat koordinat. Namun, karena membran *loudspeaker* berbentuk kerucut terpancung, titik pusat $r = 0$ tersebut secara fisis tidak terletak pada permukaan kertas, melainkan berada pada titik puncak imajiner kerucut. Oleh karena itu, penentuan parameter fisis pada penelitian ini difokuskan untuk mencari nilai jari-jari dalam minimum (r_{min}), yaitu jarak linear dari titik puncak imajiner menuju batas persambungan antara membran kerucut dengan *dustcap*.

Untuk meningkatkan akurasi dan kepastian data dimensi kerucut, penelitian ini menggunakan metode pengukuran tidak langsung. Metode ini memanfaatkan korelasi dimensi linier pada penampang melintang kerucut melalui prinsip geometri kesebangunan dua segitiga siku-siku. Instrumen yang digunakan untuk mengukur parameter linier ini adalah jangka sorong. Berdasarkan hasil pengukuran fisik komponen *loudspeaker*, diperoleh tiga parameter yaitu jari-jari kerucut maksimum $a_{max} = 74,35 \text{ mm}$, jari-jari batas *dustcap* $a_{min} = 32,50 \text{ mm}$ dan, panjang bidang miring membran kerucut $L = 48,50 \text{ mm}$.



Gambar 4. 6. Geometri membran loudspeaker

Secara geometris seperti pada Gambar 4.9, jika garis miring pada membran kerucut ditarik lurus ke atas hingga berpotongan di titik p puncak imajiner, akan terbentuk dua segitiga sebangun, yaitu segitiga kecil (representasi dari puncak imajiner hingga batas *dustcap*) dan segitiga besar (representasi dari puncak imajiner hingga tepi luar *loudspeaker*). Karena kedua segitiga tersebut mempunyai sudut kemiringan yang sama, maka berlaku hukum kesebangunan berdasarkan perbandingan sisi miring terhadap sisi alas sebagai berikut:

$$\frac{\text{sisi miring segitiga kecil}}{\text{alas segitiga kecil}} = \frac{\text{sisi miring segitiga besar}}{\text{alas segitiga besar}}$$

Dengan menyisipkan variabel dimensi fisik *loudspeaker* ke dalam perbandingan tersebut, maka persamaan awal kesebangunan dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{r_{min}}{a_{min}} = \frac{r_{min} + L}{a_{max}}$$

$$r_{min} \cdot a_{max} = a_{min} \cdot (r_{min} + L)$$

$$r_{min} \cdot a_{max} = (a_{min} \cdot r_{min}) + (a_{min} \cdot L)$$

$$(r_{min} \cdot a_{max}) - (a_{min} \cdot r_{min}) = a_{min} \cdot L$$

$$r_{min} \cdot (a_{max} - a_{min}) = a_{min} \cdot L$$

$$r_{min} = \frac{a_{min} \times L}{a_{max} - a_{min}}$$

Substitusi nilai parameter hasil eksperimen ke dalam persamaan yang telah diturunkan di atas sebagai berikut:

$$r_{min} = \frac{32,50\text{mm} \times 48,50\text{mm}}{74,35\text{mm} - 32,50\text{mm}}$$

$$r_{min} = \frac{1576,25 \text{ mm}^2}{41,85 \text{ mm}}$$

$$r_{min} = 37,66 \text{ mm}$$

$$r_{min} = 0,03766 \text{ m}$$

Nilai $r_{min} = 0,03766 \text{ m}$ ini memiliki peran yang krusial dalam pemodelan sistem getaran karena ditetapkan sebagai posisi syarat batas. Secara mekanis, pangkal kerucut direkatkan secara permanen menggunakan lem pada tabung silinder kumparan yang bersifat *rigid*. Kondisi kaku ini memaksa material kertas pada koordinat r_{min} tidak memiliki kebebasan untuk melengkung secara mandiri terhadap struktur penggerak *loudspeaker*.

Oleh karena itu, dalam kerangka acuan mekanika gelombang lentur, nilai simpangan relatif gelombang stasioner (n) pada titik referensi awal ini bernilai nol, atau secara matematis dinyatakan sebagai syarat batas:

$$n(r_{min}, \phi, t) = 0$$

Syarat batas konstan inilah yang kemudian menjadi fondasi utama bagi perintah pencarian akar-akar fungsi Bessel ($x_{\mu n}$) pada komputasi MATLAB. Batasan ini menginstruksikan algoritma program untuk mengeksklusi area di bawah r_{min} dan memulai pemetaan fluktuasi gelombang stasioner di atas permukaan kertas, mulai dari koordinat batas dalam r_{min} hingga berakhir di batas luar r_{max} ($r_{max} = r_{min} + L$).

Selain parameter jari jari, pemodelan matematika menggunakan luasan metrik permukaan dimensi 2 pada sistem koordinat bola juga membutuhkan nilai sudut setengah bukaan kerucut (θ_0). Nilai sinus dari sudut tersebut ($\sin \theta_0$) berfungsi sebagai pembagi terhadap parameter orde azimuth (m). Berdasarkan hasil pemisahan variabel persamaan gelombang, relasi ini mendefinisikan secara mutlak besaran orde fungsi Bessel (μ) yang dieksekusi pada algoritma MATLAB, sesuai dengan persamaan (2.17). Konsisten dengan prinsip pengukuran dimensi linear tidak langsung, besaran sudut setengah bukaan kerucut (θ_0) dihitung menggunakan relasi trigonometri pada segitiga siku-siku. Berdasarkan perbandingan antara sisi depan terhadap sisi miring, sudut tersebut dinyatakan sebagai:

$$\sin \theta_0 = \frac{a_{max} - a_{min}}{L}$$

$$\sin \theta_0 = \frac{74,35 \text{ mm} - 32,50 \text{ mm}}{48,50 \text{ mm}}$$

$$\sin \theta_0 = \frac{41,85 \text{ mm}}{48,50 \text{ mm}} = 0,86288$$

$$\theta_0 = 59,64^\circ$$

Untuk menentukan posisi simpul garis (simpul azimuth) secara analitik, analisis matematis difokuskan pada komponen sudut dalam persamaan (2.31). simpul garis terbentuk pada sudut azimuth (ϕ) tertentu di mana membran tidak mengalami simpangan. Syarat matematis untuk kondisi amplitudo nol terpenuhi ketika fungsi sudutnya bernilai nol, perhitungan posisi sudut untuk setiap simpul garis diturunkan melalui penyelesaian persamaan $\cos(m\phi) = 0$.

Mode getar orde pertama ($m = 1$), persamaan sudut menjadi $\cos(\phi) = 0$. Syarat tersebut terpenuhi pada sudut (ϕ) bernilai 90° dan 270° , yang merepresentasikan terbentuknya satu garis simpul pada membran. Rincian perhitungannya sebagai berikut:

$$\cos(90^\circ) = 0$$

$$\cos(270^\circ) = 0$$

Selanjutnya, pada mode getar orde kedua ($m = 2$), syarat terbentuknya simpul garis direpresentasikan oleh persamaan $\cos(2\phi) = 0$. Untuk memenuhi kondisi amplitudo nol tersebut, posisi sudut (ϕ) berada pada 45° , 135° , 225° , dan 315° . Hasil perhitungan ini menunjukkan terbentuknya dua garis simpul yang berpotongan tegak lurus. Jarak yang memisahkan antar sudut simpul pada mode ini sebesar 90° , dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\cos(2 \times 45^\circ) = 0$$

$$\cos(2 \times 135^\circ) = 0$$

$$\cos(2 \times 225^\circ) = 0$$

$$\cos(2 \times 315^\circ) = 0$$

Dari perhitungan di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak antar simpul berbanding terbalik dengan nilai ordenya. Besarnya jarak sudut yang memisahkan tiap garis simpul pada orde ke- m selalu bernilai sebesar $\frac{180^\circ}{m}$.

Nilai frekuensi yang diperoleh dari pengukuran menggunakan mikrofon, yakni 162,3 Hz untuk $m = 1$ dan 187,9 Hz untuk $m = 2$, digunakan sebagai rujukan untuk memprediksi parameter mode getar lainnya. Diawali dengan menghitung orde (μ) menggunakan persamaan:

$$\mu^2 = \frac{m^2}{\sin^2 \theta_0} \quad (2.17)$$

Diperoleh nilai orde $\mu = 1,1589$ untuk $m = 1$, dan $\mu = 2,3179$ untuk $m = 2$.

$$R(r) = C_1 J_\mu(kr) \quad (2.24)$$

Nilai orde tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam fungsi Bessel jenis pertama, melalui perhitungan komputasi dengan bantuan perangkat lunak MATLAB, hasil komputasi dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 3. Akar fungsi Bessel orde 1,1589 dan 2,3179

Akar(x_n)	$\mu = 1,1589$	$\mu = 2,3179$
x_1	4,0446	5,5362
x_2	7,2433	8,8496
x_3	10,4075	12,0681

Nilai akar pertama (x_1) dari masing-masing mode selanjutnya digunakan untuk menghitung besaran cepat rambat gelombang (c) pada membran. Dengan menggunakan persamaan (2.29)

$$c = \frac{2\pi f_{mn} r_{min}}{x} \quad (2.29)$$

Diperoleh kecepatan rambat gelombang 9,507 m/s untuk mode $m = 1$ dan 8,031 m/s untuk mode $m = 2$. Adanya perbedaan nilai cepat rambat gelombang memberikan konfirmasi fisis bahwa material kertas penyusun membran *loudspeaker* tidak sepenuhnya berperilaku sebagai membran ideal. Kemudian nilai kecepatan rambat gelombang dimanfaatkan untuk menentukan nilai frekuensi menggunakan persamaan (2.30)

$$f_{mn} = \frac{xc}{2\pi r_{min}} \quad (2.30)$$

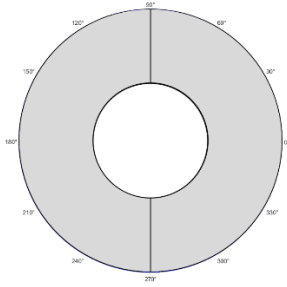
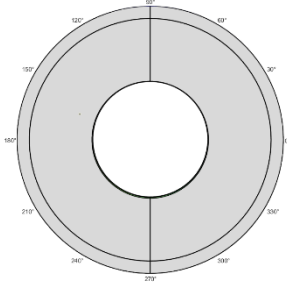
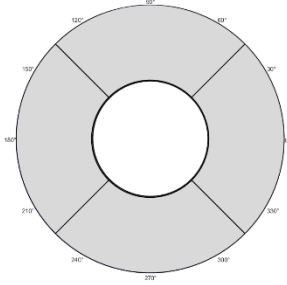
Dengan menggunakan akar kedua (x_2) menghasilkan prediksi frekuensi resonansi sebesar 290,6 Hz untuk mode (1,2) dan 300,36 Hz untuk mode (2,2).

Selain memprediksi frekuensi resonansi, akar fungsi Bessel juga dikomparasikan untuk memprediksi letak simpul meingkar pada membran *loudspeaker*. Mengacu pada asumsi bahwa tepi *dustcap* yang bersifat kaku bertindak sebagai simpul melingkar pertama (x_1), letak simpul melingkar berikutnya diprediksi menggunakan persamaan (4.1).

$$r_{simpul} = r_{min} \left(\frac{x_2}{x_1} \right) \quad (4.1)$$

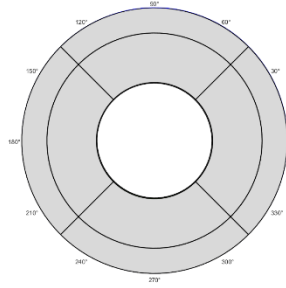
Hasil substitusi tersebut menempatkan letak simpul melingkar pada jarak 0,06744 m untuk mode (1,2) dan 0,06020 m untuk mode (2,2), di ukur urus sepanjang bidang miring dari titik puncak kerucut imajiner. Pola mode getar yang terbentuk pada permukaan membran dapat dilihat pada Tabel berikut 4.9.

Tabel 4. 4. Pola Mode Getar Hasil Analitik

Frekuensi (Hz)	Mode Getar pada Membran <i>Loudspeaker</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
162,3		1	1
187,9		1	2
277,5		2	1

300,4

2 2

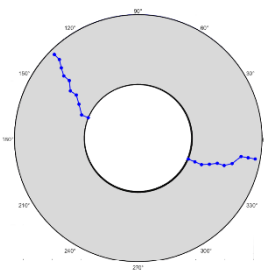
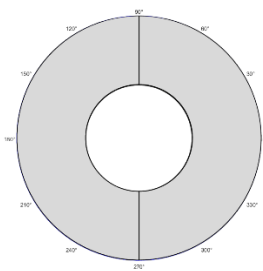
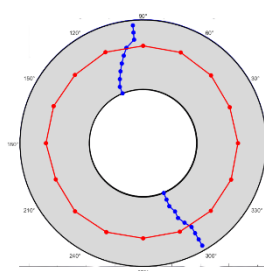
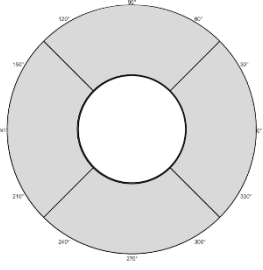


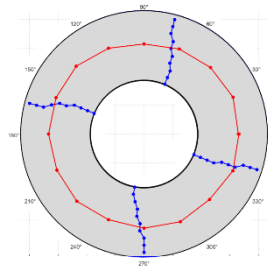
Perbandingan Hasil Mode Getar Membran *Loudspeaker* secara Ekspeimen dan Analitik

Pola mode getar hasil eksperimen dan anaitik dibandingkan untuk mengetahui keakuratan apaa gituuuu. Berdasarkan hasil perbandingan pola mode getar eksperimen dan analitik terdapat perbedaan. Perbedaan penyimpangan simpul pada data eksperimen ini terjadi karena struktur alami bahan kertas membran kerucut memiliki kepadatan yang berbeda pada tiap titik serta massa tambahan dari sensor piezoelektrik.

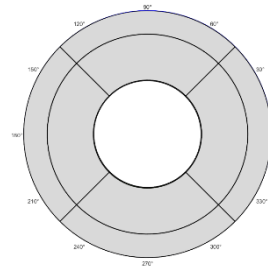
Perbandingan mode getar hasil eksperimen dan analitik dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 5. perbandingan Pola Mode Getar Hasil Eksperimen dan Analitik

Pola Mode Getar Hasil Eksperimen dan Analitik	
Eksperimen	Analitik
	
Mode (1,1)	Mode (1,1)
	
Mode (2,1)	Mode (2,1)



Mode (2,2)



Mode (2,2)

Tingkat akurasi pemodelan matematika dievaluasi dengan menghitung presentase ralat (error) relatif antara frekuensi analitik dengan frekuensi eksperimen. Perhitungan presentase error tersebut diformulasikan dalam persamaan berikut:

$$error(\%) = \left| \frac{f_{analitik} - f_{eks}}{f_{analitik}} \right| \times 100\%$$

Hasil komparasi antara frekuensi resonansi prediksi MATLAB dengan data eksperimen dirangkum dalam tabel 4.11.

Tabel 4. 6. Komparasi Frekuensi Resonansi Prediksi MATLAB dan Mikrofon

Mode Getar (m,n)	Frekuensi Teori (Hz)	Frekuensi Eksperimen (Hz)	Selisih Error
Mode (1,2)	290,66	277,50	4,53%
Mode (2,2)	300,36	300,40	0,01%

SIMPULAN

Pemodelan analitik menggunakan akar fungsi Bessel telah berhasil memprediksi secara ideal letak simpul melingkar dan simpul garis pada membran loudspeaker, di mana simpul garis terbentuk berpasangan pada sudut 180° untuk orde pertama dan 90° untuk orde kedua, sementara perhitungan letak simpul melingkar dan prediksi frekuensi resonansi menjadikan batas dustcap serta mode fundamental (1,1) sebagai acuan utamanya. Di sisi lain, pengujian eksperimen menggunakan sensor piezoelektrik berhasil memvalidasi eksitasi tiga pola mode getar, yaitu mode (1,1), (2,1), dan (2,2). Berdasarkan perbandingan antara hasil aktual dan teoretis, ditemukan adanya deviasi geometri berupa kelengkungan pada simpul garis serta selisih pergeseran nilai frekuensi resonansi. Penyimpangan ini terbukti secara kuantitatif dipicu oleh efek pembebanan massa tambahan dari magnet dan sensor piezoelektrik, yang tidak hanya menurunkan frekuensi resonansi membran tetapi juga menghasilkan redaman mekanis yang menekan amplitudo getarannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Agus Purwanto, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing, yang di tengah kesibukannya selalu meluangkan waktu untuk memberikan arahan, bimbingan, serta suntikan semangat yang sangat berharga bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir Skripsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Baharin, N.H. and Abdul Rahman, R. (2009) 'Effect of accelerometer mass on thin plate vibration', *Jurnal Mekanikal*, 29, pp. 100–111.
- Beranek, L.L. and Mellow, T. (2012) *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press.

- Boas, M.L. and Spector, D. (1999) *Mathematical Methods in the Physical Sciences*.
- Borwick, J. (2001) *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3rd edn. Focal Press.
- Cakar, O. and Sanliturk, K.Y. (2005) 'Elimination of transducer mass loading effects from frequency response functions', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(1), pp. 87–104. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00086-4](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00086-4).
- Colloms, M. (2018) *High Performance Loudspeakers: Optimising High Fidelity Loudspeaker Systems*. John Wiley & Sons.
- Eargle, J. (2003) *Loudspeaker Handbook*. 2nd edn. Kluwer Academic Publishers.
- Ewins, D.J. (2000) *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. 2nd edn. Research Studies Press Ltd.
- Fraden, J. (2004) *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer New York.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppers, A.B. and Sanders, J.V. (2000) *Fundamentals of Acoustics*. 4th edn. John Wiley & Sons.
- Partridge, G.R. (1950) *Modes of Vibration of a Loudspeaker Cone*. Yale University.
- Ripka, P. and Tipek, A. (2007) *Modern Sensors Handbook*. ISTE USA.
- Taylor, J.R. (2022) *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 3rd edn. MIT Press.