

## Pengaruh variasi luas ujung pipa pada sistem resonansi bunyi kolom udara

### Khairil Anwar

Program Studi S3 Pendidikan IPA, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia  
Surat-e: khairila593@gmail.com

### Sparisoma Viridi

Physics and Biophysics Research Division, Institut Teknologi Bandung, Indonesia  
Surat-e: dudung@fi.itb.ac.id

### Dadi Rusdiana

Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia  
Surat-e: dadirusdiana@upi.edu

### Ida Kaniawati

Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia  
Surat-e: idakaniawati@yahoo.com

**Abstrak.** Kajian fenomena resonansi kolom udara yang ujungnya terbuka sebagian belum pernah ditemukan dalam materi pembelajaran fisika, menyebabkan pengetahuan konsep mahasiswa tentang resonansi kolom udara tidak utuh. Telah dilakukan perancangan alat sederhana dan penyelidikan resonansi sistem kolom udara berdasarkan variasi luas ujung terbuka untuk mengetahui pola hubungan antara variasi luas ujung pipa terbuka dengan frekuensi. Eksperimen ini dilakukan dengan suling pipa PVC tanpa lubang nada yang ditiup dengan alat sederhana yang dirancang sebagai kompresor balon. Sinyal suara yang dihasilkan direkam dengan *software Audacity* dan kandungan frekuensi harmonik dianalisis dengan algoritma *Fast Fourier Transform (FFT)*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa variasi luas ujung pipa terbuka dari sistem kolom udara berpengaruh terhadap frekuensi bunyi secara *logarithmic*. Implikasi konsep ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk mengembangkan diafragma pengatur luas ujung alat musik tiup sebagai pengatur tuning nada mengingat kebanyakan alat musik tiup tidak memiliki bagian penyetem nada.

**Kata kunci:** Variasi luas ujung kolom udara dan resonansi.

**Abstract.** Studies the resonance phenomenon at the open end partially of a pipe never been found in physics learning material, causing the students conceptual about pipe resonance to be incomplete. Simple apparatus and investigation of resonance pipe systems have been carried out based on the variation of open-end area to know the relationship with the frequency using a PVC flute pipe without tone holes and blown with a simple balloon compressor. Sound signals generated are recorded by Audacity software and to analyze the harmonic frequency content using the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm. The results of this study show that the variation wide of the open end of the air column significantly influences the sound frequency as logarithmic. The implication of this concept can be used as a diaphragm to regulates the wide-open end of a wind instrument as a tuning tone.

**Keywords:** Resonance and Variation of the ends of the air column.

---

## I. Pendahuluan

Aktivitas laboratorium menggunakan "instrumen nyata" dapat membantu menjembatani kesenjangan antara kasus ideal dan fenomena nyata yang mahasiswa kenal [1]. Contoh fenomena gelombang pada alat

musik tiup memberikan tantangan kepada mahasiswa untuk mempelajari sifat akustik yang mendasari instrumen ini. Teknik pengukuran dan analisis disajikan bersama dengan peran pedagogis percobaan.

Salah satu cara untuk menentukan besaran fisis terkait fenomena getaran dan gelombang bunyi adalah melalui percobaan memanfaatkan aspek resonansi dalam pipa kolom udara [2]. Beberapa contoh eksperimen diantaranya menggunakan tiga ukuran panjang pipa PVC tertutup di salah satu ujungnya untuk membuktikan deretan harmonik, menggambarkan hubungan fungsional dan menentukan kelajuan gelombang serta memprediksi panjang gelombang harmonik dengan alat musik trompet pipa PVC [3]. Eksperimen berikutnya menggambarkan pola hubungan resonansi kolom udara yang salah satu ujungnya tertutup dan memperoleh nilai kelajuan beserta faktor koreksi ujung pipa [2], [4]. Hal serupa menggunakan mode resonansi dasar untuk menunjukkan hubungan linier panjang kolom udara terukur dan sepefrekuensi harmonik dasar dan memperoleh kecepatan suara di udara sekitar 338 m/s [2], [4]. Ref. [3] mempelajari resonansi pada sistem pipa organa terbuka menggunakan *Copper pipe flute* untuk menunjukkan hubungan linier panjang gelombang sebagai fungsi panjang kolom udara dan menentukan konstanta  $k$  untuk keadaan harmonik pipa terbuka di kedua ujung. Selain itu penentuan faktor koreksi ujung dan kelajuan perambatan bunyi dengan metode fitting kurva juga dapat digunakan melalui media pipa resonansi '*Boomwhackers*' [5]. Koreksi ujung pipa organa yang terbuka di kedua ujungnya yang memiliki diameter yang berbeda-beda sebagaimana ditunjukkan dalam Ref. [6] menghasilkan 0,486 yang sedikit berbeda dengan temuan lainnya 0,33, yang serupa dengan pekerjaan dalam Ref. [7] melalui alat musik pipa PVC kelompok "*Blue Man*"[7].

Pengembangan alat eksperimen untuk menyelidiki efek kecepatan angin terhadap kelajuan perambatan gelombang bunyi menggunakan aparatus pipa PVC, *Audacity*, dan kipas angin mini ditunjukkan dalam Ref. [8] yang menyimpulkan bahwa semakin besar kecepatan angin maka semakin besar pula kecepatan gelombang bunyi [8]. Alat dan aparatus serupa dikembangkan juga untuk menyelidiki pengaruh kelambaban pada cepat rambat gelombang di udara yang menghasilkan hubungan linier [9].

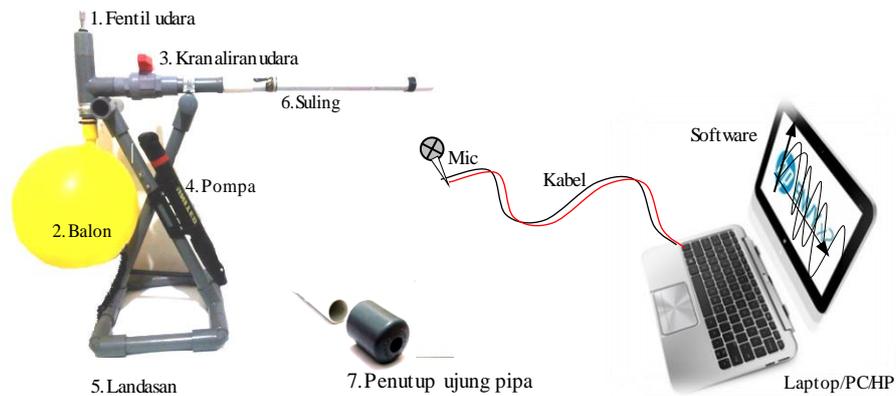
Ref. [10] memanfaatkan suling diatonik untuk menentukan frekuensi dan cepat rambat bunyi di udara dengan bantuan *software Audacity*, sedangkan dalam Ref. [11] memperlihatkan kajian alat musik suling Sunda dari prespektif sains untuk menentukan frekuensi dasar deret nada menggunakan *software Micscope II*, selain itu suling bambu pentatonik dan *Audacity* dimanfaatkan juga sebagai media pembelajaran fisika konsep kolom udara terbuka [12]. Ref. [13] menunjukkan eksperimen untuk menentukan kecepatan gelombang bunyi dengan sistem akuisisi data berbasis *smartphone android* aplikasi *Mic tester* dan menggunakan suling Sunda, kajian ini berhasil memperoleh nilai kelajuan 340,9 m/s pada sistem pipa organa terbuka dan 341,8 m/s pada sistem pipa organa tertutup [13]. Pipa peluit sederhana yang dibuat dari potongan pipa PVC untuk mengukur frekuensi resonansi pipa terbuka atau tertutup menjelaskan bahwa alat ini dapat digunakan sebagai media demonstrasi atau media eksperimen laboratorium dalam pembelajaran fisika musik [14]. Sejumlah variasi dimungkinkan seperti menutup ujung pipa, mengubah panjangnya, atau menambahkan lubang di sepanjang sisi.

Pengembangan tabung resonansi untuk menyelidiki konsep deret harmonik dan kelajuan gelombang dalam tiga jenis tabung resonansi sekaligus (kedua ujung terbuka, salah satu ujung terbuka, dan kedua ujung tertutup) menggunakan media pipa PVC dan *freeware* komputer berhasil dibangun dengan menghasilkan nilai sesuai dengan teori [15]. Alat ini juga dapat digunakan untuk menentukan nilai faktor koreksi bagian ujung pipa yang terbuka. Prinsip analisis dalam eksperimen ini menggunakan metode grafis hubungan linier antara variabel [15].

Berdasarkan berbagai rujukan di atas, terlihat bahwa belum adanya pembahasan mengenai fenomena resonansi akibat keadaan lubang di ujung pipa yang terbuka sebagian demikian juga dalam materi pembelajaran fisika, ini menyebabkan pengetahuan konsep resonansi pada sistem kolom udara menjadi tidak utuh. Oleh karena itu dalam makalah ini dipaparkan hasil penyelidikan sistem resonansi kolom udara berdasarkan variasi luas ujung terbuka untuk memahami peristiwa resonansi gelombang bunyi dan mengetahui pola hubungan antara variasi luas ujung pipa terbuka dengan frekuensi getar kolom udara, sehingga berdasarkan konsep ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk mengembangkan diafragma pengatur luas ujung terbuka alat musik tiup sebagai pengatur tuning nada mengingat kebanyakan alat musik tiup tidak memiliki bagian penyetem nada seperti pada alat musik berdawai.

## II. Metode Penelitian

Kajian dalam studi ini menggunakan jenis penelitian eksperimen melalui strategi studi kasus peristiwa resonansi gelombang bunyi dalam sistem kolom udara. *Setup* peralatan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Setup Eksperimen Resonansi Bunyi pada Sistem Kolom Udara Pipa Suling PVC.

Fenomena resonansi bunyi diproduksi dengan media alat musik tiup (suling) sederhana yang dibuat dari pipa PVC  $\frac{1}{2}$  inci (Diameter dalam 1,726 cm) tanpa lubang nada dengan panjang kolom 0,275 m dan alat kompresor balon sebagai alat tiup, sementara itu mini mikrofon, laptop dan *software audacity* digunakan sebagai sistem akuisisi data. Sebagai pengatur area ujung-ujung kolom pipa digunakan 9 buah *dop* penutup pipa pvc ukuran  $\frac{1}{2}$  inci yang masing-masing diberi lubang dengan diameter 0,310 cm, 0,400 cm, 0,520 cm, 0,620 cm, 0,706 cm, 0,814 cm, 0,948 cm, dan 1,044 cm yang diukur dengan jangka sorong, selanjutnya dihitung sebagai luas lingkaran ( $A_N = \pi r^2$  atau  $\frac{1}{4} \pi d^2$  dalam  $\text{cm}^2$ ), sedangkan panjang suling diukur dengan mistar. Sinyal suara yang dihasilkan sebagai akibat dari adanya pengaruh variasi luas ujung pipa terbuka direkam dengan *software Audacity* dan disimpan dalam tipe file *\*wave*, kemudian kandungan frekuensi harmonik dianalisis dengan algoritma *Fast Fourier Transform (FFT)* menggunakan bahasa pemrograman Matlab. Selanjutnya dilakukan fitting kurva untuk mengetahui pola hubungan variasi luas ujung pipa terbuka terhadap frekuensi dasar yang dihasilkan.

### III. Hasil Penelitian dan Pembahasan

#### Rancangan alat pengalir udara dan suling.

Bahan dan alat pengalir udara dibuat dari pipa PVC  $\frac{1}{2}$  inch yang bagian-bagiannya terdiri atas: 1). Fentil yaitu tempat untuk memasukkan udara dari pompa ban sepeda, 2). Balon sebagai penampung udara, 3). Keran sebagai pengatur aliran udara yang keluar, 4). Pompa sebagai sumber udara, 5). Landasan merupakan penopang rangkaian alat pengalir udara, 6). Suling sebagai sumber resonansi kolom udara, dan 7). Penutup ujung suling dengan berbagai luas lingkaran. Penggunaan alat pengalir udara dimaksudkan 1). agar aliran udara terbentuk secara simultan dan konstan (tidak fluktuatif) untuk mengurangi efek intensitas aliran udara terhadap amplitudo sinyal dan amplitudo tekanan pada getaran molekul udara yang dapat mempengaruhi *pitch* bunyi, 2). untuk menjaga suhu udara yang mengalir dalam pipa suling sama dengan keadaan lingkungan, karena jika dibandingkan dengan menggunakan tiupan mulut manusia akan mengalami kenaikan suhu sedikit lebih tinggi, selain itu untuk menjaga kandungan udara agar sifat fisisnya konstan ( $\gamma$ ) dan tidak mengandung proporsional  $\text{CO}_2$  yang sedikit lebih banyak jika menggunakan tiupan manusia, oleh karena itu sumber udara digunakan adalah pompa ban sepeda yang ditampung dalam balon.

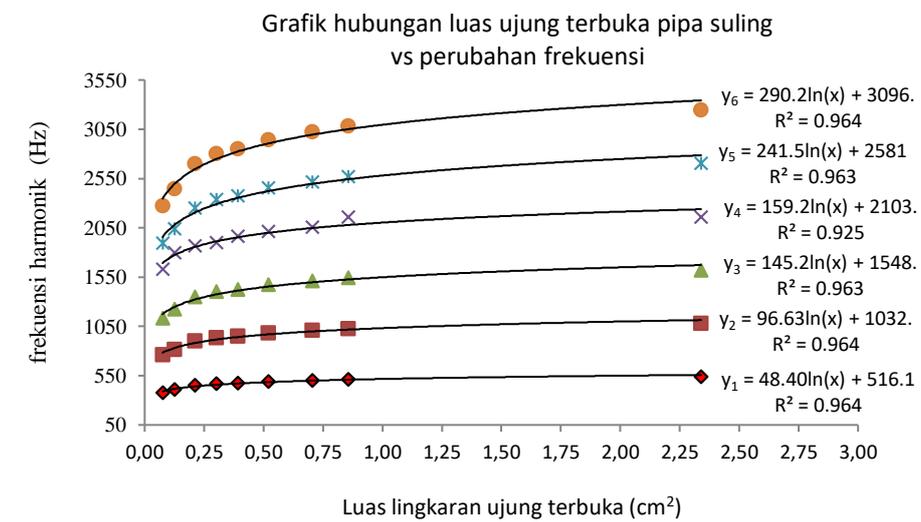
#### Teknologi informasi (TI) sebagai sistem akuisisi data

Rangkaian sistem akuisisi data yang digunakan terdiri atas mikrofon mini sebagai penerima sinyal analog yang akan mentransfer ke bentuk sinyal digital melalui sistem elektronik komputer, kabel sebagai konduktor, laptop/PC/HP, serta *software* perekam dan penganalisis sinyal. *Free Software* yang digunakan untuk merekam sinyal adalah *Audacity* (<http://www.audacity.sourceforge.net/A>) [3], [16]–[18]. Selain itu, *audacity* dimanfaatkan untuk mengukur frekuensi bunyi [3], [16]–[18]. Selain dapat digunakan untuk merekam dan editing sinyal *audio*, memvisualisasikan sinyal gelombang bunyi serta dapat membantu memahami makna dari amplitudo, frekuensi, dan superposisi, *software* ini dapat digunakan sebagai penganalisis sinyal dalam merepresentasikan gelombang domain waktu dan frekuensi sehingga para pengguna dapat mengamati

hubungan antara amplitudo dan volume secara kualitatif yang selanjutnya dapat menggunakan skala waktu yang diketahui tersebut untuk mengukur periode atau frekuensi sinyal [3]. *Audacity* memiliki tool “*Plot spectrum*” yang menampilkan analisis *Fast Fourier Transform (FFT)* yang dapat menjelaskan bahwa nada-nada alat musik adalah superposisi dari banyak nada-nada murni [3], [16]–[18].

### Penentuan frekuensi harmonik dan hubungannya dengan kondisi ujung pipa

Eksperimen menggunakan suling pipa PVC tanpa lubang nada dengan ukuran panjang 0,275 m yang diukur dari pangkal lubang tiup hingga ujung pipa, Diameter dalam pipa sebesar 1,726 cm dengan aliran udara diatur sedemikian rupa hingga menyebabkan resonansi molekul udara sesuai dengan model resonansi alamiahnya. Hubungan fungsional antara frekuensi harmonik dan variasi luas lingkaran ujung pipa suling terbuka diperlukan suatu pola pencocokan kurva dari hubungan variabel-variabel tersebut. Hubungan data-data hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2.



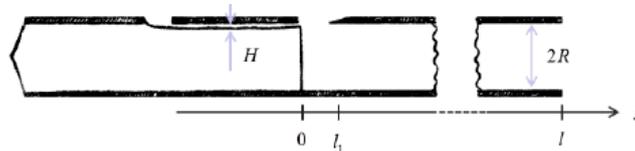
**Gambar 2.** Kurva Hubungan Fungsional Variasi Luas Lingkaran Ujung Pipa dengan Perubahan Frekuensi Harmonik.

Melalui jenis tiupan kompresor balon yang mengalirkan udara dengan intensitas aliran udara minimal (“jenis aliran udara I”) dapat menghasilkan resonansi bunyi pada alat musik suling dalam keadaan dasar yang bersesuaian dengan panjang kolom pipa suling yang digunakan. Memperhatikan data-data hasil eksperimen yang diperoleh, dimana untuk panjang pipa suling 0,275 m dengan keadaan ujung tertutup penuh menghasilkan deret frekuensi harmonik sebanyak 3 deret dengan frekuensi awal muncul pada nilai  $272,020 \pm 0,390$  Hz dan frekuensi dua deret berikutnya membentuk kelipatan ganjil dari frekuensi awal. Perlu diperhatikan bahwa jika suling ditiup menggunakan jenis tiupan “Aliran udara II” (dengan intensitas di atas jenis tiupan I) dapat menyebabkan *pitch* bunyi dengan nilai frekuensi awal yang muncul sekitar 2 kali dari keadaan awal ( $2 \times 272,020$  Hz) tetapi deretan harmonik yang terbentuk tidak lagi kelipatan ganjil melainkan kelipatan bilangan bulat.

Sementara itu pada keadaan ujung pipa terbuka dengan berbagai ukuran luas lingkaran ujung menimbulkan perubahan nilai frekuensi dasar/awal dari bunyi yang dihasilkan, dalam hal ini untuk luas lingkaran ujung yang terbuka sebesar  $A_1 = 0,075$  cm<sup>2</sup> menimbulkan frekuensi dasar sebesar  $(378,532 \pm 0,450)$  Hz dan untuk  $A_2 = 0,126$  cm<sup>2</sup> menghasilkan frekuensi dasar sebesar  $(407,767 \pm 0,900)$  Hz, semakin besar luas lingkaran ujung terbuka frekuensi dasar pun semakin meningkat. Pada seluruh keadaan ujung pipa yang terbuka (sebagian atau penuh) deretan harmonik membentuk kelipatan bilangan bulat dan seluruh harmonik yang muncul dengan baik hanya sampai pada deret harmonik ke-6, sedangkan deret harmonik ke-7 dan selanjutnya mulai muncul dengan fluktuatif pada beberapa penyelidikan yang berulang sehingga komponen data yang digunakan untuk penggambaran grafis hanya sampai pada deret harmonik ke-6. Hubungan antara variabel frekuensi harmonik dan variasi luas lingkaran ujung pipa terbuka ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan persamaan garis fitting pada masing-masing kurva hubungan antara kedua variabel ini dapat dinyatakan bahwa frekuensi harmonik merupakan fungsi luas ujung pipa terbuka yang berhubungan secara *logarithmic*,  $f_n(A_N) = a \cdot \ln(A_N) + b$ . Memperhatikan koordinat data terakhir pada masing-masing kurva dalam

Gambar 2 terlihat bahwa interval luas lingkaran ujung merupakan bagian terbuka penuh yang sebanding dengan diameter dalam pipa suling ( $A_N \approx D = 1,726$  cm) menggambarkan bahwa semakin besar ukuran luas ujung yang terbuka dari suatu sistem kolom udara tidak berpengaruh secara signifikan terhadap pola resonansi molekul udara dimana semakin lebar bagian ujung yang terbuka maka frekuensi akan semakin tinggi dengan pola *logarithmic* dalam batasan diameter dalam pipa sebagai faktor koreksi ujung.

Hasil kajian dalam makalah ini sesuai dengan permodelan matematis pada alat musik tiup *Willow flute* Norwegia yang secara geometri ditunjukkan pada Gambar 3 [19].



Gambar 3. Parameter Geometris *Willow flute*.

Suling *Willow flute* tidak memiliki lubang jari/lubang nada (*tone hole*) sehingga perbedaan titi nada dihasilkan dengan cara memvariasi jenis tiupan dan dengan menutupi seluruh, sebagian, atau membuka seluruh ujung tabung suling. Ketika ujung tabung dibiarkan terbuka penuh, suling menghasilkan satu nada dasar dan nada-nada atasnya, namun jika memainkannya dengan menutup ujung tabung akan menghasilkan skala harmonik yang lain [20].

Secara umum proses permodelannya cukup kompleks karena banyak hal yang harus dipertimbangkan dalam perhitungan, diantaranya persamaan non-linear. Namun meskipun persamaan non-linear dapat dipertimbangkan ketika berhadapan dengan transfer massa, maka dapat menggunakan fungsi linear [19]. Hal kedua menyangkut perilaku hidrodinamik dari sifat “jet” udara, dan berdasarkan hasil eksperimental dan teoritis menyarankan bahwa aliran udara cenderung membentuk *vortisitas* (pusaran) saat menimpa pembukaan tepi lubang tiup (*edge*) [21]. Ketiga mengenai aliran massa udara di lorong (lihat Gambar 3!) dapat didekatkan/diperkirakan dengan ketiga jenis kondisi batas [19].

Dalam media kajian ini dapat dianggap/dipertimbangkan sebagai pendekatan pertama untuk tabung silinder terbuka, tertutup atau sebagian terbuka di satu ujung seperti halnya *Willow flute* [19]. Untuk menurunkan model matematikanya dibuat asumsi-asumsi berikut: 1) Diameter suling cukup kecil dibandingkan dengan panjang kolom pipa dan panjang gelombang suaranya, 2) Diameter silinder cukup besar sehingga efek viskositas bisa diabaikan, 3) Dinding pipa kaku, halus dan berinsulasi/terisolasi/tersekat secara termal/panas, sehingga lampiran/pagar (*enclosure*) tidak berpengaruh pada perambatan gelombang [20].

Mengasumsikan bahwa gelombang suara dalam suling adalah gelombang bidang suara, fungsi getaran dapat diwakili oleh,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + F(x) \quad (1)$$

dimana  $p(x,t)$  menunjukkan tekanan akustik, fungsi  $F(x)$  adalah beberapa sumber eksternal,  $c^2 = B/\rho$  merupakan hubungan kelajuan perambatan gelombang dengan  $\rho$  sifat kerapatan udara ( $1,2041 \text{ kg/m}^3$ ). Mari kita anggap bahwa tidak ada konduksi panas yang cukup, oleh karena itu perilaku gelombang bunyi bersifat adiabatik. Jadi,  $B$  adalah modulus Bulk udara curah adiabatik yang kira-kira diberikan oleh  $B = \gamma P_a$  ( $\gamma \approx 1,4$ ) mengacu pada rasio panas spesifik udara pada tekanan konstan serta pada volume konstan dan  $P_a$  ( $\approx 101,325 \text{ Pa}$ ) merupakan tekanan lingkungan/area sekitar.

Perhatikan Gambar 3 dan mari kita menetapkan kondisi batas dan awal. Pada  $x = 0$  kita memiliki ketiga jenis kondisi batas,

$$p_x(0,t) - \kappa_1 p(0,t) = 0 \quad (2)$$

Kondisi batas pada ujung tabung tergantung pada apakah ujung terbuka, tertutup atau terbuka sebagian. Untuk ujung terbuka, tekanan total di ujung harus kira-kira sama dengan tekanan atmosfer, dengan kata lain tekanan akustik  $p$  adalah nol ( $p = 0$ ).

$$p(l,t) = 0 \quad (3)$$

Pada ujung tertutup ada suatu *antinode* tekanan, karena sebagian besar suara dipantulkan:

$$p_x(l, t) = 0 \quad (4)$$

Dalam banyak makalah, hasil penelitian atau karya ilmiah yang dilaporkan bahwa instrumen tiup telah mempertimbangkan penggunaan hanya kedua jenis kondisi batas, tetapi kita harus ingat bahwa pemain juga dapat menutup ujung tabung hanya separuh. Dalam hal ini dikenal dengan kondisi Robin.

$$p_x(l, t) + \kappa_2 p(l, t) = 0 \quad (5)$$

Persamaan (5), harus diterapkan. Nilai  $\kappa_2$  tergantung pada seberapa banyak bagian ujung yang tertutup. Kondisi persamaan (3 - 4), dapat ditulis ulang dalam bentuk berikut,

$$(1-h)p_x(l, t) + hp(l, t) = 0 \quad \longrightarrow \quad 0 \leq h \leq 1 \quad (6)$$

tetapi dengan kondisi awal adalah:

$$p(x, 0) = \phi(x) \quad (7)$$

$$p_t(x, 0) = \psi(x) \quad (8)$$

Persamaan *nonhomogen* (1), dapat diselesaikan dengan menggunakan metode pemisahan variabel, yaitu kita mencari solusi yang dinyatakan dalam bentuk tidak tertutup berikut:

$$p(x, t) = \sum_n X_n(x) T_n(t),$$

dimana  $X_n(x)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ , merupakan eigen fungsi dari masalah homogen terkait. Kondisi batas kita persamaan (5) dan (6), menyiratkan bahwa eigen fungsi dari masalah adalah:

$$X_n(x) = \sin(\mu_n x + \varphi_n)$$

dengan,

$$\tan(\varphi_n) = \frac{\mu_n}{\kappa_1}, \quad \|X_n\| = \frac{l}{2} \left( 1 - \frac{\sin(\mu_n l)}{\mu_n l} \cos(\mu_n l + 2\varphi_n) \right)$$

Tetapi eigen nilai yang sesuai  $\mu_n$  adalah akar dari persamaan transendental berikut ini:

- $\tan(\mu_n l) = -\frac{\mu_n}{\kappa_1}, \rightarrow$  (ujung terbuka)

- $\cot(\mu_n l) = \frac{\mu_n}{\kappa_1}, \rightarrow$  (ujung tertutup)

- $\cot(\mu_n l) = \frac{1}{\kappa_1 + \kappa_2} \left( \mu_n - \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\mu_n} \right),$  dimana  $\kappa_2 = \frac{h}{1-h} \rightarrow$  (ujung terbuka sebagian)

Untuk menentukan fungsi  $T_n(t)$ , kita memperluas fungsi sumber dan kondisi awal persamaan (7), dan (8), dalam suatu deret Fourier. Jadi  $T_n(t)$  akan memenuhi masalah nilai awal,

$$T_n''(t) + c^2 \mu_n^2 T_n(t) = F_n,$$

$$T_n(0) = \phi_n,$$

$$T_n'(0) = \psi_n.$$

Maka solusi masalah persamaan (1), (2), (6) - (8) adalah:

$$p(x, t) = -\int_0^t \phi(\xi) \frac{\partial^2}{\partial t^2} G(x, \xi, t) d\xi - \int_0^t F(\xi) G(x, \xi, t) d\xi - \int_0^t \psi(\xi) \frac{\partial}{\partial t} G(x, \xi, t) d\xi + \int_0^t F(\xi) G(x, \xi, 0) d\xi \quad (9)$$

dengan fungsi Green's,

$$G(x, \xi, t) = \sum \frac{\cos(c\mu_n t)}{c^2 \mu_n^2} \frac{X_n(x)X_n(\xi)}{\|X_n\|^2}.$$

Salah satu sifat dasar bunyi adalah titi nada (*pitch*) yaitu atribut subjektif bunyi yang berkaitan dengan frekuensi gelombang bunyi. Peningkatan frekuensi menyebabkan kenaikan titi nada, tetapi ketika mengurangi frekuensi, titi nada berkurang. Nada dari frekuensi terendah dikenal sebagai dasar atau harmonik pertama. Semua titi nada lainnya yang mungkin terbentuk dengan frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar disebut harmonik atau nada atas. Menggunakan hubungan persamaan (9), diperoleh frekuensi mode getaran pipa *Willow flute* sebagai,

$$f_n = \frac{c\mu_n}{2\pi}, \rightarrow (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

Jika parameter  $\kappa_1$  cukup besar, frekuensi yang mungkin untuk suling adalah dekat dengan harmonik-harmonik,  $f_n \approx \frac{nc}{2l}, \rightarrow (n = 1, 2, 3, \dots \text{ujung terbuka})$  dan  $f_n \approx \frac{nc}{4l}, \rightarrow (n = 1, 3, 5, \dots \text{ujung tertutup})$ . Karena  $\mu_n$  bergantung pada panjang pipa  $l$ , maka titi nada dapat diubah dengan cara mengatur panjang pipa/kolom. Jika pipa memiliki lubang jari/lubang nada (*tone hole*) maka kita juga dapat mengubah panjang efektif instrumen musik dengan cara membuka lubang yang berbeda. Selain itu dengan mengubah tekanan udara yang ditiupkan ke dalam kolom instrumen, kita juga dapat mengubah nilai  $n$ , yaitu kita melompat di antara solusi  $p_n$ , menghasilkan perbedaan diskrit pada *pitch*. *Pitch* juga dapat diubah dengan memodifikasi  $h$  dalam kondisi batas pada  $x = l$ .

### Penerapan

Konsep ini dapat dijadikan suplemen materi pembelajaran fisika baik dalam kelas maupun laboratorium yang lebih maju. Berdasarkan konsep ini juga dapat membantu kita dalam mendesain alat musik tiup dengan ukuran yang tidak terlalu panjang atau terlalu pendek namun tetap dapat menghasilkan deretan tangga nada yang tepat dengan cara membuat diameter di sepanjang pipa alat musik tidak homogen. Selain itu sebagai bahan pertimbangan untuk mengembangkan diafragma pengatur luas ujung terbuka dari alat musik tiup sebagai pengatur tuning nada mengingat kebanyakan alat musik tiup tidak memiliki bagian penyetem nada seperti pada alat musik berdawai.

## IV. Kesimpulan

Berdasarkan uraian hasil eksperimen, dapat disimpulkan bahwa resonansi kolom udara dengan keadaan ujung pipa terbuka sebagian tetap menghasilkan deretan harmonik yang merupakan kelipatan bilangan bulat dengan rata-rata perbandingan terhadap frekuensi dasar berturut-turut  $\approx 1, 2, 3, 4, \dots, n$ . Sedangkan hubungan fungsional antara frekuensi dan variasi luas ujung pipa organa terbuka merupakan fungsi *logarithmic*,  $f_n(A_N) = a \cdot \ln(A_N) + b$ . Penggunaan media dalam eksperimen ini sangat murah, praktis, sederhana dan mudah dilakukan, namun masih memiliki kelemahan dalam hal analisis karena masih banyak aspek akustik yang diabaikan, oleh karena itu diperlukan pengkajian lebih lanjut dengan memperhatikan faktor-faktor akustik seperti tekanan aliran udara, faktor koreksi ujung, dan faktor suhu atau kelembaban.

## Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Mataram dan Kemenristek DIKTI atas dukungan kontribusi dana penelitian ini.

## Kepustakaan

- [1] R. Worland, "2aMU2. Flute measurements in a Physics of Music lab," *Proc. Meet. Acoust.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–14, 2014.
- [2] A. Yavuz, "Measuring the speed of sound in air using smartphone applications," *Phys. Educ.*, vol. 50, no. 3, pp.

281–284, 2015.

- [3] B. Brazzle, “Inexpensive Instruments for a Sound Unit,” *Phys. Teach.*, vol. 49, no. 4, pp. 228–230, 2011.
- [4] M. C. LoPresto, “Measuring End Correction for a Quarter-Wave Tube,” *Phys. Teach.*, vol. 43, no. 6, pp. 380–380, 2005.
- [5] M. C. Lopresto, “Experimenting with end-correction and the speed of sound,” *Phys. Educ.*, vol. 46, no. 4, pp. 437–439, 2011.
- [6] S. R. Iqbal, H. Mazin, A. Majeed, A. Shinas, and S. O. Oman, “End Correction of a Resonant Standing Wave in Open Pipes of Different Diameters,” vol. 3, no. 4, pp. 21–25, 2013.
- [7] M. E. Bacon and S. Torok, “An Experimental Investigation of the End Effects for Blue Man Group® Pipes,” *Phys. Teach.*, vol. 49, no. 3, pp. 152–154, 2011.
- [8] S. Maisyaroh, H. Mariyo, Supahar, and H. Kuswanto, “Development of sound wave experimentation tools influenced by wind velocity,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1440, p. 012021, 2020.
- [9] H. Mariyo, N. Islami, and Azizahwati, “Development of Sound Wave Experimentation Tools Which Influenced by Relative Humidity Using Audacity,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1351, p. 012056, 2019.
- [10] J. Pebralia and S. P. Anggun, “Pemanfaatan Suling Diatonik Untuk Menghitung Frekuensi dan Cepat Rambat Bunyi di Udara Menggunakan Software Audacity,” *J. Inov. Pendidik.*, vol. 9, no. 2, pp. 49–56, 2019.
- [11] I. M. Sari, K. Anwar, E. Kurdita, and N. Rustaman, “Sundanese flute: from Art and Physics perspective,” vol. 57, no. ICMSEd 2016, pp. 221–225, 2017.
- [12] E. Nursulistiyono, “Pemanfaatan Suling Bambu Pentatonik Sebagai Media,” *Semin. Nas. Quantum*, pp. 1–8, 2015.
- [13] E. A. Muhafid, U. Terbuka, U. A. Dahlan, and P. Organa, “Pengembangan Alat Eksperimen Bunyi Dengan Sistem Akuisisi Data Berbasis Smartphone Android,” *J. Fis.*, vol. 4, no. 2, pp. 83–87, 2014.
- [14] O. Stafford, “Experimenting with a ‘Pipe’ Whistle,” *Phys. Teach.*, vol. 50, no. 4, pp. 229–230, 2012.
- [15] R. Jaafar, A. N. Mat Daud, S. Ali, and S. K. Ayop, “Three-in-one resonance tube for harmonic series sound wave experiments,” *Phys. Educ.*, vol. 52, no. 4, 2017.
- [16] J. Groppe, “The Hope of Audacity® (To Teach Acoustics),” *Phys. Teach.*, vol. 49, no. 2, pp. 99–102, 2011.
- [17] M. Bin, “Measuring the Speed of Sound Using Only a Computer,” *Phys. Teach.*, vol. 51, no. 5, pp. 295–297, 2013.
- [18] A. Gailey, “Signal Frequency Spectra with Audacity®,” *Phys. Teach.*, vol. 53, no. 4, pp. 239–243, 2015.
- [19] T. Bobinska and A. Buikis, “A mathematical model for a willow flute,” *Recent Adv. Fluid Mech. Heat Mass Transf. - Proc. 9th IASME / WSEAS Int. Conf. Fluid Mech. Aerodyn. FMA’11, Proc. 9th IASME / WSEAS Int. Conf. HTE’11*, no. 2, pp. 188–192, 2011.
- [20] T. Bobinska, *MATHEMATICAL MODELS AND THEIR SOLUTIONS Field : Mathematics Subfield : Mathematical modelling Scientific supervisor : 2014*.
- [21] P. A. Vienna, “THE INFLUENCE OF NICKS ON THE SOUND PROPERTIES AND THE AIRFLOW IN,” pp. 16–19, 2015.