

# Studi Faktor Kualitas Resonansi Bunyi pada Pipa Organa Tertutup Menggunakan Panjang Efektif

Feri Iskandar, Yudhiakto Pramudya\*

Universitas Ahmad Dahlan  
Jalan Pramuka 42, Sidikan, Umbulharjo, Yogyakarta 55161  
\*E-mail: yudhiakto.pramudya@pfis.uad.ac.id

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi analisis resonansi bunyi pada pipa organa tertutup melalui pengukuran faktor kualitas (Q) dan panjang kolom udara efektif. Metode yang digunakan berupa sistem otomatisasi berbasis Arduino yang dilengkapi sensor HC-SR04 untuk mengukur jarak dan KY-037 untuk mendeteksi amplitudo suara, dengan integrasi analisis data menggunakan Python untuk penentuan frekuensi resonansi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa penggunaan panjang efektif dengan koreksi radius tabung dan perbaikan metode penentuan frekuensi mampu menurunkan galat dari 1,33% menjadi 0,24% serta menurunkan standar deviasi dari 0,45 cm menjadi 0,37 cm. Selain itu, analisis faktor kualitas menunjukkan peningkatan nilai rata-rata dari 20 menjadi 31, yang mengindikasikan bahwa sistem resonansi dan analisis yang digunakan memberikan hasil yang lebih akurat meskipun terdapat peningkatan variabilitas. Sistem ini berhasil memberikan pengukuran yang lebih presisi dalam analisis karakteristik resonansi pipa organa tertutup, terutama dalam konteks disipasi energi.

**Kata kunci:** faktor kualitas, panjang efektif, resonansi bunyi, pipa organa tertutup.

## Abstract

*This study aims to improve the accuracy of resonance analysis in closed pipe resonance through the measurement of quality factor (Q) and effective air column length. The method employed involves an automated system based on Arduino, equipped with an HC-SR04 sensor to measure distance and a KY-037 sensor to detect sound amplitude, integrated with Python-based data analysis for determining the resonance frequency. The measurement results show that the use of effective length with tube radius correction and improved frequency determination methods can reduce error from 1.33% to 0.24%, as well as decrease the standard deviation from 0.45 cm to 0.37 cm. Furthermore, quality factor analysis indicates an increase in the average value from 20 to 31, suggesting that the implemented resonance system and analysis method provide more accurate results, despite increased variability. Overall, the system successfully delivers more precise measurements in the analysis of resonance characteristics in closed organ pipes, particularly in relation to energy dissipation.*

**Keywords:** quality factor, effective length, sound resonance, closed pipe resonance.

## PENDAHULUAN

Bunyi merupakan salah satu fenomena fisika yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan sehari-hari manusia. Sebagai gelombang mekanik, bunyi memerlukan medium untuk merambat dan memiliki karakteristik yang dapat dipelajari secara ilmiah (Utami et al., 2024). Salah satu fenomena menarik dalam kajian bunyi adalah resonansi, yaitu peristiwa bergetarnya suatu benda karena

memperoleh gaya berkala yang frekuensinya sama atau hampir sama dengan frekuensi alamiah benda tersebut (Aulliyah et al., 2023). Fenomena resonansi ini dapat diamati dalam berbagai konteks, mulai dari ayunan yang didorong hingga gelas yang pecah ketika dikenai bunyi dengan frekuensi tertentu. Pemahaman mendalam tentang resonansi menjadi sangat penting dalam fisika akustik karena aplikasinya yang luas dalam pengembangan instrumen musik, sistem audio,

dan berbagai perangkat teknologi modern (Suyatno et al., 2021).

Pipa organa tertutup merupakan salah satu sistem akustik yang menarik untuk dikaji karena karakteristiknya yang unik dalam menghasilkan resonansi bunyi. Berbeda dengan pipa organa terbuka yang memiliki dua ujung terbuka, pipa organa tertutup memiliki satu ujung tertutup dan satu ujung terbuka, menghasilkan pola gelombang stasioner yang khas (Abdullah, 2016). Dalam mengkaji kualitas resonansi, parameter penting yang digunakan adalah faktor kualitas ( $Q$ ), yang menggambarkan ketajaman resonansi dan efisiensi sistem dalam menyimpan energi getaran. Semakin tinggi nilai  $Q$ , semakin baik kualitas resonansi yang dihasilkan, yang ditandai dengan puncak resonansi yang lebih tajam dan kehilangan energi yang lebih kecil (Adhikari, 2023). Penentuan  $Q$ -factor yang akurat sangat penting untuk mengevaluasi efisiensi resonator, di mana nilai  $Q$  yang tinggi menunjukkan kemampuan resonator dalam menghasilkan puncak resonansi tajam dengan kehilangan energi minimal. (Sisniega et al., 2020). Sistem ini banyak ditemukan dalam berbagai aplikasi, seperti pada alat musik tiup, sistem pemipaan, dan peralatan akustik laboratorium dan sensor berbasis metamaterial (Islam et al., 2022).

Penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek faktor kualitas pada sistem resonator, seperti pada resonator *Microelectromechanical System* (MEMS) dan *Surface Acoustic Wave* (SAW) (Liu et al., 2020); (Streque et al., 2020), sensor metamaterial (Qi et al., 2024), serta konfigurasi kristal fononik (Reyes et al., 2020). Studi juga menyoroti pentingnya optimasi parameter fisik untuk meningkatkan nilai  $Q$ , seperti pengaruh dimensi resonator dan kondisi batas (Wei et al., 2022). Namun, pada konteks pipa organa tertutup, fokus penelitian lebih banyak diarahkan pada analisis frekuensi fundamental dan harmonik. Kajian mendalam mengenai bagaimana variasi dimensi pipa, karakteristik medium, dan kondisi batas memengaruhi nilai  $Q$  masih sangat terbatas.

Penelitian ini berfokus pada analisis faktor kualitas ( $Q$ -factor) sebagai parameter

utama untuk mengevaluasi kualitas resonansi bunyi pada pipa organa tertutup. Faktor kualitas ini dihitung berdasarkan distribusi resonansi yang dianalisis menggunakan pendekatan pemodelan matematis (Riazy et al., 2023). Data amplitudo bunyi dan panjang kolom udara pada resonansi pertama dikumpulkan melalui pengukuran berbasis sensor, yang memberikan akurasi tinggi dalam menentukan nilai parameter resonansi. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara dimensi fisik pipa dan kualitas resonansi yang dihasilkan, serta mendukung pengembangan teknologi akustik yang lebih efisien.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teori resonansi akustik, khususnya dalam memahami hubungan antara parameter fisik dan kualitas resonansi pada pipa organa tertutup. Secara praktis, temuan ini dapat diaplikasikan dalam desain instrumen musik tiup, pengembangan sistem akustik ruangan, serta efisiensi resonator bunyi. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam pembelajaran fisika gelombang di tingkat pendidikan tinggi.

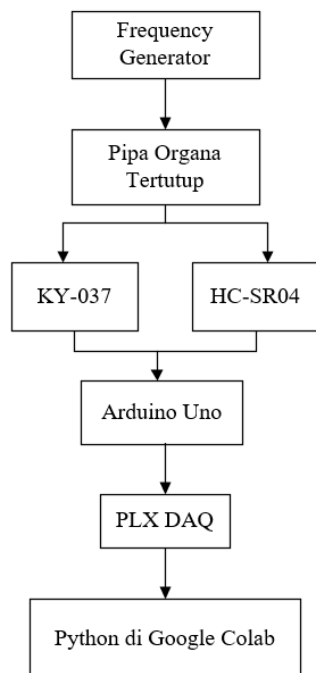
## METODE/EKSPERIMEN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen untuk menentukan nilai faktor kualitas ( $Q$ ) dan panjang kolom udara pada resonansi ( $L_{Res}$ ) pada sistem tabung resonansi tertutup. Penelitian ini memanfaatkan perangkat berbasis Arduino yang dilengkapi dengan sensor HC-SR04 untuk mengukur jarak resonansi dan sensor KY-037 untuk merekam nilai amplitudo dalam satuan arbitrer. Data yang diperoleh dari perangkat ini dianalisis menggunakan program Python di *platform* Google Colab. Analisis difokuskan pada penentuan frekuensi resonansi yang tepat. Hal ini disebabkan adanya pelebaran kurva resonansi. Pada saat bersamaan, pengaturan panjang kolom udara masih berubah secara diskrit sehingga dimungkinkan puncak resonansi terlewat.

Eksperimen dilakukan pada sebuah tabung resonansi yang dirancang sedemikian

rupa sehingga mampu mendeteksi resonansi bunyi secara otomatis, menggunakan tabung kaca dengan jari-jari sebesar 13,19 mm. Sumber bunyi berasal dari *frequency generator* berbasis aplikasi Android dengan frekuensi tetap sebesar 512 Hz. Tabung ini dilengkapi dengan dua sensor utama, yaitu HC-SR04 dan KY-037, yang masing-masing dipasang pada satu rangkaian Arduino. Data yang diperoleh dari kedua sensor diprogram menggunakan Arduino IDE dan dikirim ke *Microsoft Excel* secara *real-time* melalui aplikasi PLX DAQ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Data dikumpulkan melalui eksperimen menggunakan tabung resonansi yang dilengkapi dengan sensor HC-SR04 untuk mendeteksi jarak kolom udara pada saat resonansi terjadi dan sensor KY-037 untuk merekam nilai amplitudo dalam satuan arbitrer. Kedua sensor dihubungkan ke Arduino yang telah diprogram melalui Arduino IDE. Data yang diperoleh dari sensor dikirimkan secara *real-time* ke *Microsoft Excel* menggunakan aplikasi PLX DAQ untuk mempermudah pengelolaan dan penyimpanan data. Setelah data terkumpul, nilai panjang kolom udara ( $L$ ) dan amplitudo diproses lebih lanjut menggunakan program Python.



Gambar 1. Skema eksperimen resonansi bunyi  
 Dalam analisis data, panjang efektif

kolom udara ( $L_{effective}$ ) diperhitungkan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih akurat. Panjang efektif tabung resonansi dapat dihitung dengan menambahkan faktor koreksi berdasarkan radius tabung. Rumus untuk panjang efektif diberikan oleh:

$$L_{eff} = L + 0,61r \quad (1)$$

Dengan  $r$  adalah radius tabung. Faktor koreksi ini memperhitungkan bahwa posisi simpul amplitudo tidak berada tepat di ujung tabung tetapi sedikit melewati ujung terbuka tabung (Hellesund, 2019).

Program Python ini dirancang untuk menghasilkan grafik hubungan antara amplitudo dan panjang kolom udara ( $L$ ) serta menghitung parameter-parameter penting seperti nilai faktor kualitas ( $Q$ -factor) dan panjang kolom udara pada resonansi ( $L_{Res}$ ). Hasil akhir dari analisis ini berupa grafik amplitudo terhadap panjang kolom udara ( $L$ ) serta nilai faktor kualitas ( $Q$ ) yang dihitung dari data *fitting*. Grafik yang dihasilkan memberikan informasi penting mengenai karakteristik resonansi pada tabung resonansi tertutup. Untuk menganalisis puncak resonansi dan menentukan parameter yang relevan, digunakan *fitting Gaussian*. Fungsi Gaussian yang digunakan dinyatakan sebagai berikut:

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

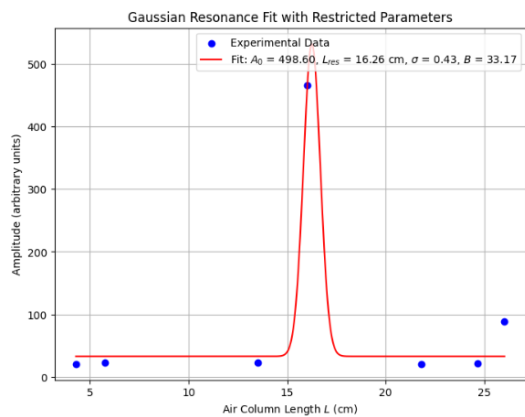
dimana  $A$  merupakan tinggi puncak,  $\mu$  menunjukkan lokasi pusat puncak, dan  $\sigma$  menentukan lebar puncak. Proses *fitting* dilakukan menggunakan pendekatan *non-linear least-squares* untuk mengestimasi parameter  $A$ ,  $\mu$ , dan  $\sigma$  dari data amplitudo terhadap panjang kolom udara, sehingga memberikan pemahaman yang lebih rinci tentang karakteristik resonansi (Pastuchová & Zákopčan, 2015).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### HASIL

Data eksperimen diperoleh menggunakan perangkat Arduino yang dilengkapi sensor HC-SR04 dan KY-037, yang masing-masing digunakan untuk mengukur panjang kolom udara saat resonansi terjadi dan amplitudo suara. Data dari kedua sensor ini dikirimkan ke Arduino IDE dan ditampilkan secara langsung

di Microsoft Excel menggunakan aplikasi PLX DAQ. Selanjutnya, data dari PLX DAQ diolah menggunakan program Python untuk menghasilkan grafik hubungan antara panjang kolom udara ( $L_{res}$ ) dan amplitudo resonansi. Grafik ini digunakan untuk menentukan nilai kualitas faktor ( $Q$ -factor) dan panjang kolom udara saat resonansi. Berikut adalah grafik hubungan antara panjang kolom udara ( $L_{res}$ ) dan amplitudo resonansi hasil analisis data di Google Colab:



Gambar 2. Grafik hubungan antara panjang kolom udara dan amplitudo resonansi.

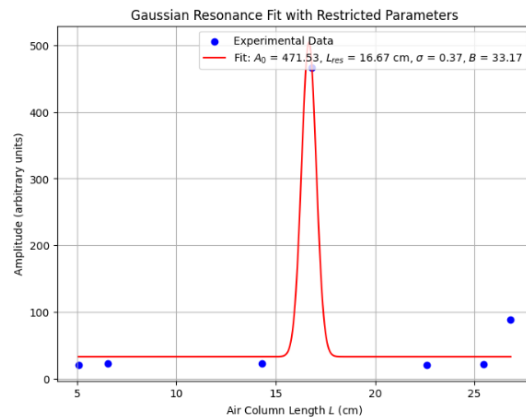
Dari Gambar 2 ini, panjang kolom udara saat resonansi maksimum ( $L_{res}$ ) dan nilai  $Q$ -factor dihitung untuk setiap data pengukuran. Hasil pengolahan data grafik tersebut dirangkum dalam tabel 1 berikut:

Tabel 1. Data hasil pengukuran awal

No	$L_{Res}$ (cm)	Q
1	15,77	17
2	15,89	27
3	16,59	15
4	16,39	9
5	16,20	25
6	17,43	6
7	16,56	15
8	16,43	50
9	16,23	24
10	16,26	16

Selanjutnya, untuk memperhitungkan efek radius tabung resonansi, panjang kolom udara efektif ( $L_{efektif}$ ) dikoreksi menggunakan rumus (1). Koreksi ini dilakukan untuk memperhitungkan pengaruh radius tabung resonansi terhadap nilai panjang kolom udara efektif, yang dapat meningkatkan akurasi

analisis terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik hubungan antara panjang kolom udara efektif dan amplitudo resonansi.

Dari Gambar 3 ini, panjang kolom udara saat resonansi maksimum ( $L_{res}$ ) dan nilai  $Q$ -factor dihitung untuk setiap data pengukuran. Hasil pengolahan data grafik tersebut dirangkum dalam tabel 2 berikut:

Tabel 2. Data hasil perhitungan  $L_{efektif}$

No	$L_{Res}$ (cm)	Q
1	16,31	35
2	16,55	69
3	15,81	4
4	16,68	11
5	16,73	36
6	16,90	17
7	16,91	19
8	17,13	51
9	16,74	44
10	16,67	19

Selain itu, pada Gambar 2 dan 3, parameter  $B$  muncul dalam hasil *curve fitting* sebagai nilai *offset* atau *baseline* dari amplitudo resonansi. Nilai ini berasal dari penggunaan bentuk modifikasi fungsi Gaussian:

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) + B \quad (3)$$

Dengan  $B$  adalah *background level* atau amplitudo latar belakang yang merepresentasikan karakter alat dan lingkungan. Penambahan ini dilakukan untuk menyesuaikan kurva dengan data eksperimen yang tidak sepenuhnya nol di luar puncak resonansi.

Setelah menganalisis data grafik dan tabel sebelumnya, dilakukan pengolahan lebih lanjut untuk menghitung nilai rerata, standar deviasi (SD), dan galat dari panjang resonansi yang diperoleh menggunakan koreksi panjang kolom udara. Berikut adalah tabel 3 yang

menunjukkan hasil analisis statistik dari kedua jenis data tersebut, yang mencakup rerata, SD, dan persentase galat.

Tabel 3. Hasil statistik  $L_{resonansi}$

Jenis Data	Rerata (cm)	Standar deviasi (cm)	Error (%)
$L_{Percobaan}$	16,38	0,45	1,33
$L_{Efektif}$	16,64	0,37	0,24

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan, selain data parameter  $L$ , diperoleh juga data parameter  $Q$  yang disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil statistik faktor kualitas ( $Q$ -factor)

Jenis Data	Rerata	Standar deviasi
$Q_{Percobaan}$	20	12
$Q_{Efektif}$	31	20

## PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang diperoleh dari eksperimen menggunakan sistem Arduino dengan sensor HC-SR04 dan KY-037, terdapat beberapa aspek penting yang perlu dianalisis secara mendalam. Pembahasan akan difokuskan pada dua parameter utama yaitu panjang kolom udara resonansi ( $L$ ) dan faktor kualitas ( $Q$ ).

Pada pengukuran panjang kolom udara resonansi, hasil percobaan menunjukkan nilai rerata  $L$  sebesar 16,38 cm dengan standar deviasi 0,45 cm. Setelah dilakukan koreksi dengan mempertimbangkan efek radius tabung resonansi menggunakan rumus (1), diperoleh nilai  $L$  efektif sebesar 16,64 cm dengan standar deviasi yang lebih kecil yaitu 0,37 cm. Penurunan nilai standar deviasi ini mengindikasikan bahwa koreksi radius tabung memberikan hasil pengukuran yang lebih presisi.

Penelitian sebelumnya (Iskandar & Pramudya, 2024) menunjukkan bahwa pengukuran frekuensi resonansi, yang hanya mengandalkan titik puncak amplitudo, menghasilkan galat sebesar 3,04% ketika air dalam reservoir diturunkan dan 5,98% ketika air dinaikkan. Dalam penelitian terkini, metode fitting data menggunakan Python menunjukkan penurunan galat yang signifikan. *Fitting* data langsung dari panjang kolom udara hasil percobaan sebelumnya menghasilkan galat

sebesar 1,33%. Selanjutnya, dengan mempertimbangkan koreksi radius tabung resonansi pada panjang kolom udara efektif ( $L$  efektif), error berkurang lebih jauh hingga mencapai 0,24%. Penurunan persentase galat ini menunjukkan bahwa analisis berbasis Python memberikan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan sebelumnya, dengan koreksi radius tabung resonansi memberikan kontribusi tambahan terhadap presisi pengukuran pada  $L$  efektif.

Analisis faktor kualitas ( $Q$ ) menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara hasil percobaan dan nilai efektifnya. Nilai  $Q$  pada hasil percobaan memiliki rerata 20 dengan standar deviasi 12, sementara nilai  $Q$  efektif menunjukkan rerata yang lebih tinggi yaitu 31 dengan standar deviasi 20. Peningkatan nilai  $Q$  efektif ini mengindikasikan bahwa sistem resonansi menjadi lebih selektif setelah memperhitungkan efek radius tabung.  $Q$ -factor yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan energi osilasi dan menghasilkan resonansi yang lebih tajam pada frekuensi tertentu. Namun, peningkatan standar deviasi pada  $Q$  efektif dari 12 menjadi 20 menunjukkan bahwa terdapat variabilitas yang lebih besar dalam pengukuran setelah koreksi.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *fitting* Gaussian memberikan estimasi parameter yang akurat untuk amplitudo maksimum ( $A$ ), panjang resonansi ( $L_{Res}$ ), dan lebar puncak ( $\sigma$ ). Fungsi Gaussian sangat efektif untuk menganalisis data eksperimen karena memiliki bentuk simetris berbentuk lonceng (*bell-shaped curve*) yang cocok untuk data resonansi (Guo, 2012). Selain itu, hasil eksperimen menunjukkan nilai  $Q$ -factor yang tinggi, yang sesuai dengan definisi teoretis  $Q = \Delta E/E$ . Rasio ini menggambarkan efisiensi sistem resonansi. Energi yang terdisipasi per siklus ( $\Delta E$ ) relatif kecil dibandingkan dengan energi yang tersimpan ( $E$ ) (Pain, 2005). Dengan demikian, *fitting* Gaussian tidak hanya menghasilkan estimasi parameter yang konsisten dengan teori resonansi, tetapi juga mengindikasikan bahwa sistem memiliki kemampuan yang baik dalam

mempertahankan energi osilasi dan menghasilkan resonansi yang tajam pada frekuensi tertentu. Hal ini menandakan bahwa resonator memiliki kualitas yang baik dengan redaman yang kecil.

Perbandingan antara hasil percobaan dan nilai efektif menunjukkan bahwa koreksi radius tabung memberikan dampak positif terhadap akurasi pengukuran panjang kolom udara, yang terlihat dari penurunan galat dan standar deviasi. Di sisi lain, peningkatan nilai  $Q$  efektif mengindikasikan sistem yang lebih responsif terhadap frekuensi resonansi, meskipun dengan variabilitas yang lebih tinggi. Peningkatan  $Q$  juga menandakan bahwa energi yang terdisipasi dalam satu siklus getaran semakin berkurang dibandingkan pada analisis sebelumnya. Hal ini mungkin disebabkan oleh faktor-faktor eksperimental seperti sensitivitas sensor, kondisi lingkungan, atau karakteristik material tabung resonansi yang mempengaruhi pengukuran.

## PENUTUP

Sistem eksperimen resonansi pipa organa tertutup berbasis Arduino dengan sensor HC-SR04 dan KY-037 mampu meningkatkan akurasi pengukuran panjang kolom udara resonansi setelah dilakukan koreksi radius tabung, sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan error dari 1,33% menjadi 0,24% dan standar deviasi yang lebih kecil pada nilai  $L$  efektif. Selain itu, analisis faktor kualitas ( $Q$ ) menunjukkan peningkatan rerata  $Q$  efektif dari 20 menjadi 31, mengindikasikan sistem resonansi yang lebih selektif dan responsif terhadap frekuensi tertentu, meskipun terdapat peningkatan variabilitas pengukuran. Untuk aplikasi lebih lanjut, sistem ini digunakan secara praktis dalam pembelajaran fisika di laboratorium untuk meningkatkan pemahaman siswa terhadap konsep resonansi. Penggunaan algoritma pengolahan data yang lebih canggih juga dapat dilakukan guna mengurangi variabilitas pengukuran dan memastikan hasil yang lebih konsisten, sehingga eksperimen ini menjadi referensi yang lebih andal dalam

pendidikan fisika.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Universitas Ahmad Dahlan atas dukungan dana penelitian melalui Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Nomor: PTM-046/SP3/LPPM-UAD/XII/2024, yang memungkinkan penelitian ini terlaksana dengan baik.

## REFERENSI

- Abdullah, M. (2016). *FISIKA DASAR 1* (Vol. 1, Issue Maret). Institut Teknologi Bandung.
- Adhikari, S. K. (2023). Study of Quality and Damping Factor at First and Second Resonance of Closed Organ Pipe. *BMC Journal of Scientific Research*, 6(1), 46–54. <https://doi.org/10.3126/bmcjsr.v6i1.60953>
- Aulliyah, U. A., Hakim, M. R., & Dewi, S. (2023). Software Audacity Pada Alat Musik Seruling Bambu. *Jurnal Fisika Sains Dan Aplikasinya*, 8(2), 78–85.
- Guo, H. (2012). A Simple Algorithm for Fitting a Gaussian Function. *Streamlining Digital Signal Processing: A Tricks of the Trade Guidebook: Second Edition, September 2011*, 297–305. <https://doi.org/10.1002/9781118316948.ch31>
- Hellesund, S. (2019). Measuring the speed of sound in air using a smartphone and a cardboard tube. *Physics Education*, 54(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab0e21>
- Iskandar, F., & Pramudya, Y. (2024). A Comparative Study of Sound Resonance Using Arduino-Based Ultrasonic Sensors and Visualization Analysis with Python. *Jurnal Materi Dan Pembelajaran Fisika*, 14(2), 72–80. <https://doi.org/10.20961/jmpf.v14i2.93454>
- Islam, M. R., Islam, M. T., Salaheldeen M, M., Bais, B., Almalki, S. H. A., Alsaif, H., & Islam, M. S. (2022). Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application. *Scientific Reports*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10729-4>
- Liu, J., Workie, T. B., Wu, T., Wu, Z., Gong, K., Bao, J., & Hashimoto, K. Y. (2020). Q-

- factor enhancement of thin-film piezoelectric-on-silicon mems resonator by phononic crystal-reflector composite structure. *Micromachines*, 11(12), 1–13. <https://doi.org/10.3390/mi11121130>
- Pain, H. J. (2005). THE PHYSICS OF VIBRATIONS AND WAVES. In *Discrete Mathematics* (Sixth Edit). John Wiley & Sons. [https://doi.org/10.1016/0012-365X\(90\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0012-365X(90)90006-4)
- Pastuchová, E., & Zákopčan, M. (2015). Comparison of algorithms for fitting a gaussian function used in testing smart sensors. *Journal of Electrical Engineering*, 66(3), 178–181. <https://doi.org/10.2478/jee-2015-0029>
- Qi, X., Pérez, L. A., Alonso, M. I., & Mihi, A. (2024). High Q-Factor Plasmonic Surface Lattice Resonances in Colloidal Nanoparticle Arrays. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 16(1), 1259–1267. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c08617>
- Reyes, D., Martínez, D., Mayorga, M., Heo, H., Walker, E., & Neogi, A. (2020). Optimization of the Spatial Configuration of Local Defects in Phononic Crystals for High Q Cavity. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6(December), 1–9. <https://doi.org/10.3389/FMECH.2020.592787>
- Riazy, L., Däuber, S., Lange, S., Viezzer, D. S., Ott, S., Wiesemann, S., Blaszczyk, E., Mühlberg, F., Zange, L., & Schulz-Menger, J. (2023). Translating principles of quality control to cardiovascular magnetic resonance: assessing quantitative parameters of the left ventricle in a large cohort. *Scientific Reports*, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29028-7>
- Sisniega, B., Gutiérrez, J., Muto, V., & García-Arribas, A. (2020). Improved determination of q quality factor and resonance frequency in sensors based on the magnetoelastic resonance through the fitting to analytical expressions. *Materials*, 13(21), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma13214708>
- Streque, J., Camus, J., Laroche, T., Hage-Ali, S., M'Jahed, H., Rammal, M., Aubert, T., Djouadi, M. A., Ballandras, S., & Elmazria, O. (2020). Design and Characterization of High-Q SAW Resonators Based on the AlN/Sapphire Structure Intended for High-Temperature Wireless Sensor Applications. *IEEE Sensors Journal*, 20(13), 6985–6991. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2978179>
- Suyatno, Indrawati, S., Pratiwi, A. N., & Prajitno, G. (2021). Evaluation of Acoustic parameters at the ITS Science Tower Auditorium as a Multi-function Room. *Journal of Physics: Conference Series*, 1951(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1951/1/012038>
- Utami, R. I., Anggraini, F. W., Ningsi, S. W., Hanif, D. A., & Kurniawati, W. (2024). Pendalaman Materi Bunyi dan Cahaya (Studi Kasus Penerapan Bunyi dan Cahaya Dalam Kehidupan Sehari-hari). *Konstanta: Jurnal Matematika Dan Ilmu Pengelatan Alam*, 2(1), 284–295. <https://doi.org/10.59581/konstanta.v2i1.2410>
- Wei, Z., Hu, J., Li, Y., & Chen, J. (2022). Effect of Electrode Thickness on Quality Factor of Ring Electrode QCM Sensor. *Sensors*, 22(14), 1–7. <https://doi.org/10.3390/s22145159>