

## PERCOBAAN RESONANSI UNTUK PENENTUAN INDEKS ADIABATIK UDARA DENGAN REGRESI KUADRAT BERBOBOT

**Raden Oktova**

Program Magister Pendidikan Fisika, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta

Kampus II, Jl. Pramuka 42, Yogyakarta 55161

E-mail: pasca.pfisika@yahoo.com

### INTISARI

Telah dilakukan percobaan resonansi untuk menentukan indeks adiabatik udara 1 atm pada suhu kamar, dengan bantuan perhitungan regresi kuadrat berbobot. Resonator udara mempunyai frekuensi alam yang bergantung pada konstanta-konstanta sistem dan indeks adiabatik udara di dalam resonator. Dengan bantuan computer pribadi dilakukan regresi kuadrat berbobot untuk menentukan frekuensi alam kolom udara pada berbagai panjang kolom udara. Dengan menggunakan koreksi nonadiabatisitas, koreksi massa udara dan koreksi nonidealitas, diperoleh nilai  $1,401 \pm 0,004$ , sesuai dengan nilai-nilai acuan.

**Kata kunci:** indeks adiabatik, udara, resonansi, regresi kuadrat berbobot

### I. PENDAHULUAN

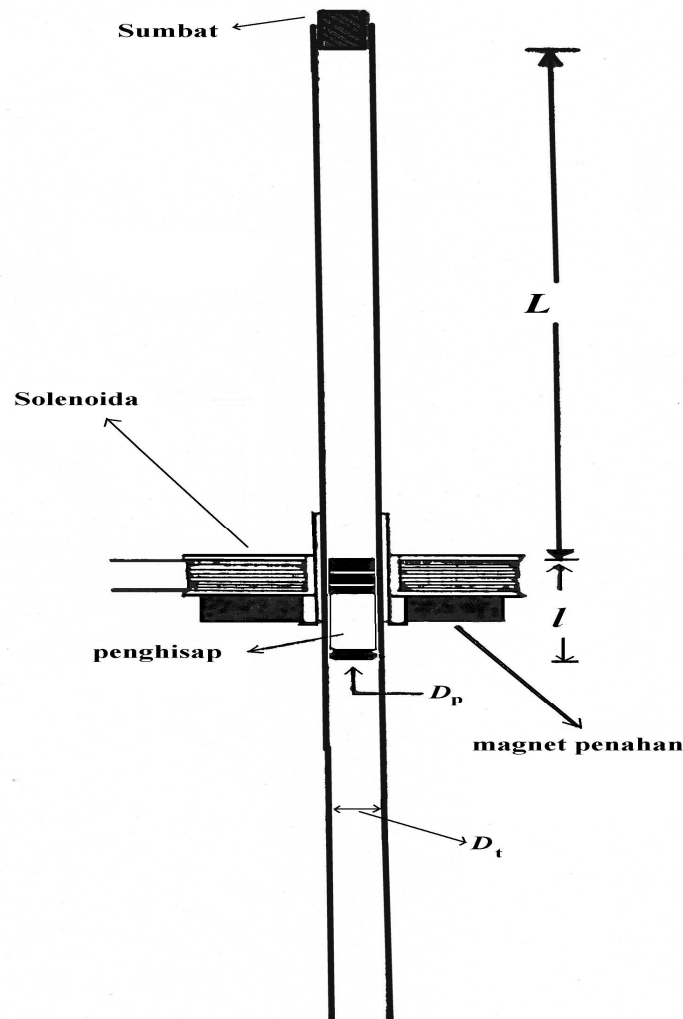
Nisbah kapasitas kalor suatu gas pada tekanan tetap terhadap kapasitas kalor pada volume tetap,  $\gamma = C_p / C_v$ , dikenal sebagai indeks adiabatik atau konstanta Laplace. Besaran ini begitu penting baik secara teoretis maupun praktis, sehingga muncul berbagai metode percobaan untuk menentukannya, baik secara langsung maupun secara tidak langsung (misalnya dari kelajuan bunyi dalam gas). Kajian teoretis mutakhir tentang atau yang melibatkan indeks adiabatik gas antara lain dijumpai dalam bidang dinamika fluida, gravitasi dan kosmologi, serta astrofisika dan astropartikel. Sebagai contoh, Basu dkk. (2007) mengkaji struktur lapisan-lapisan di dekat permukaan matahari dan menemukan adanya variasi kelajuan bunyi dan indeks adiabatik dalam 2 % lapisan terluar matahari. Contoh lain, Romanova dan Lovelace (2006) melakukan simulasi magnetohidrodinamik tiga-dimensi penuh untuk menjelaskan pengaruh magnetosfer bintang selama evolusi T Tauri, dan menemukan bahwa "pengosongan" celah magnetosfer dapat dilakukan antara lain dengan menurunkan indeks adiabatik. Lin dkk. (2007) melakukan perhitungan dengan menggunakan teknik inversi helioseismik dengan nilai indeks adiabatik tertentu untuk menentukan kandungan unsur-berat di daerah konveksi matahari. Isakov dkk. (2007) menggunakan model satu-dimensi bagi transfer zat terinduksi-laser untuk menentukan efisiensi hidrodinamik konversi radiasi laser pulsa menjadi tenaga kinetik zat terlempar, dan menemukan bahwa efisiensi proses untuk ketebalan lapisan zat besar dipengaruhi oleh indeks adiabatik zat yang menguap. Berdasarkan gejala yang diamati, metode-metode percobaan untuk menentukan indeks adiabatik gas dapat dibagi menjadi dua jenis: yang menggunakan resonansi dan yang tidak menggunakan resonansi. Semua metode mempunyai kesamaan dasar, yaitu proses yang terjadi dianggap adiabatik sehingga muncul indeks adiabatik. Metode tanpa resonansi merupakan metode tertua, misalnya metode Clement-Desormes pada tahun 1819 (Kaye dan Laby, 1978) dan metode "bola dalam tabung" Ruchardt pada tahun 1929 yang dikembangkan pada jaman modern oleh Millar (1986). Metode resonansi pertama kali dikembangkan oleh Clark dan Katz (1940), di mana gas dalam tabung tertutup mendatar yang mempunyai penghisap (piston) digetarkan secara magnetis oleh sebuah kumparan di luar tabung, dan dengan mengukur frekuensi resonansi dapat ditentukan indeks adiabatik gas; sebuah kumparan lagi (*lift coil*) diperlukan untuk melawan berat penghisap sehingga gaya gesekan dapat dikurangi. Smith (1978) melakukan terobosan penyederhanaan alat Clark dan Katz sehingga getaran penghisap, yang dalam percobaan Clark dan Katz tidak dapat diamati langsung karena terjadi dalam tabung logam dan memerlukan sistem pengamatan optis yang rumit, sekarang dapat diamati secara langsung di dalam tabung gelas.

Percobaan yang disajikan dalam makalah ini menggunakan metode resonansi yang merupakan modifikasi metode Smith (1978). Resonator yang digunakan dalam percobaan ini pada prinsipnya serupa dengan alat Smith. Perbedaannya adalah cara pengamatan amplitudo getaran penghisap. Jika Smith memakai kertas milimeter, dalam percobaan ini digunakan mikroskop geser (*travelling microscope*) sehingga lebih seksama. Jika Smith mengukur frekuensi resonansi dengan membaca suatu *counter timer* digital secara

langsung, sehingga pengaruh gesekan diabaikan, dalam percobaan ini frekuensi resonansi ditentukan dengan bantuan regresi kuadrat berbobot untuk memperhitungkan gesekan.

## II. DASAR TEORI

Resonator (Gambar 1) terdiri atas sebuah tabung gelas vertikal sepanjang 40 cm berdiameter  $D_t$ , sebuah penghisap silindris aluminium bermassa  $m$  dengan panjang  $l$  dan diameter efektif  $D_p$  yang membawa empat buah magnet cincin kecil, sebuah magnet cincin permanen penahan penghisap, dan sebuah solenoida penggetar dengan arus listrik AC. Ujung atas tabung gelas dapat ditutup dengan sumbat gabus untuk menciptakan suatu kolom udara tertutup sepanjang  $L$ , panjang kolom udara dapat divariasikan dengan cara menggeser magnet permanen.



Gambar 1. Susunan resonator yang digunakan

Jika tabung dalam keadaan terbuka, maka sistem resonator dapat dianggap mendekati sifat suatu osilator harmonik akibat adanya gradien medan magnetik di sepanjang tabung, dan frekuensi alaminya bernilai

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m}{m}}, \quad (1)$$

dengan  $k_m$  adalah konstanta gaya magnetik penahan. Jika tabung ditutup, udara di dalamnya akan bersifat seperti pegas elastik dengan konstanta pegas

$$k_u = \frac{\pi\gamma PD_p^4}{4D_i^2 L}, \quad (2)$$

dengan  $P$  adalah tekanan udara tertutup dalam keadaan setimbang. Dalam keadaan tertutup, sistem menjadi osilator harmonis dengan frekuensi alam

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3)$$

dengan  $k = k_m + k_u$  adalah konstanta gaya gabungan magnet penahan dan udara tertutup. Gabungan persamaan (1-3) menghasilkan persamaan untuk menghitung indeks adiabatik udara dalam tabung tertutup, yaitu

$$\gamma = \frac{16\pi m D_i^2 L (f_1^2 - f_0^2)}{PD_p^4}. \quad (4)$$

Jika pengaruh gesekan diperhitungkan, frekuensi resonansi tidak tepat sama dengan frekuensi alam, sehingga harus dilakukan koreksi. Pada kondisi redaman lemah, berlaku hubungan antara amplitudo getaran dan frekuensi pemaksa eksternal,  $f$  dari solenoida penggetar, yaitu

$$\frac{1}{A_{pp}^2} = \frac{4\pi^2 m^2}{F_0^2} \left[ \pi^2 f^4 + (\lambda^2 - 2\pi^2 f_a^2) f^2 + \pi^2 f_a^4 \right] \quad (5)$$

dengan  $A_{pp}$ ,  $F_0$ ,  $\lambda$ ,  $f_a$  berturut-turut adalah amplitudo puncak ke puncak getaran, amplitudo gaya pemaksa dari solenoida, koefisien redaman, dan frekuensi alam, yaitu sama dengan  $f_0$  jika tabung terbuka dan  $f_1$  jika tabung tertutup. Jika dilakukan transformasi

$$y = \frac{1}{A_{pp}^2}, \quad x = f^2, \quad (6)$$

maka pers. (5) dapat dituliskan sebagai fungsi kuadrat

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad (7)$$

dengan  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  adalah koefisien-koefisien yang dapat dihitung dengan analisis regresi kuadrat berbobot (Bevington dan Robinson, 2003: 116-138). Dari hasil regresi tersebut dapat dihitung frekuensi alam, koefisien redaman dan kebalikan faktor kualitas resonansi,

$$f_a = (a_0 / a_2)^{1/4}, \quad (8)$$

$$\lambda = \pi \sqrt{(a_1 / a_2) + 2f_a^2}, \quad (9)$$

$$Q^{-1} = \frac{\lambda}{\pi f_a}. \quad (10)$$

Karena besaran-besaran di atas diperoleh dari koefisien-koefisien polinom yang saling terkait (*intercorrelated*), perhitungan ralatnya harus memperhatikan variansi-variansi silang antarkoefisien, misalnya perhitungan ralat untuk  $f_a$  menjadi

$$\Delta f_a = \frac{f_a}{4} \sqrt{\left(\frac{\Delta a_0}{a_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a_2}{a_2}\right)^2 - 2\left(\frac{\Delta a_{02}}{a_0 a_2}\right)}, \quad (11)$$

dengan  $\Delta a_{02}$  adalah variansi silang antara  $a_0$  dan  $a_2$ .

Untuk memperoleh nilai indeks adiabatik yang lebih teliti, harus dilakukan koreksi-koreksi lain selain koreksi gesekan. Perhitungan indeks adiabatik terkoreksi ini,  $\gamma_{\text{terk}}$  dapat dituliskan dalam bentuk (Clark dan Katz, 1940, Smith, 1979)

$$\gamma_{\text{terk.}} = X_m X_i \gamma + \Delta\gamma_a, \quad (12)$$

dengan  $X_m = \{m + m(\text{udara})\} / m$  adalah faktor koreksi massa untuk memperhitungkan massa udara tambahan yang ikut bergetar bersama penghisap,  $X_i = -(P/V)(\partial V / \partial P)_T$  adalah koreksi nonidealitas udara,  $\Delta\gamma_a = (\gamma - 1)(A/V)\sqrt{k_c / 2\rho\omega_m c_v}$  adalah koreksi nonadiabatisitas untuk memperhitungkan adanya konduksi kalor dari udara di dalam kolom tertutup ke luar, dengan  $A$  adalah luas permukaan pemancar kalor, untuk  $\gamma$  digunakan nilai teoretis 1,40 untuk gas diatomik,  $\omega_m$  adalah frekuensi sudut resonansi,  $k_c$  konduktivitas kalor udara, dan  $c_v$  adalah kalor jenis udara.

### III. PROSEDUR PERCOBAAN

Solenoida yang ditunjukkan pada Gambar 1 mempunyai lilitan sebanyak 300 buah dan diberi arus dari tegangan PLN. Sebagai sumber arus AC digunakan AFG Griffin dengan frekuensi dan amplitudo arus yang dapat divariasi. Untuk kalibrasi frekuensi AFG digunakan sebuah pencacah digital Harris dengan keseksamaan  $\pm 1$  digit  $\pm 0,05\%$  yang frekuensinya telah dicek dengan beberapa garpu tala Griffin. Pencacah digital ini sekaligus untuk pengukuran frekuensi secara seksama pada percobaan tabung terbuka. Karena pencacah digital ini kemudian rusak, maka pada percobaan resonansi selanjutnya digunakan skala frekuensi AFG yang sudah dikalibrasi dan lebih kasar ( $\pm 0,04$  Hz maksimum). Arus listrik diukur dengan multimeter digital. Sebuah mikrometer mikroskop geser dengan keseksamaan 0,01 mm digunakan untuk pengamatan posisi penghisap, dan sebuah jangka sorong dengan keseksamaan 0,01 mm untuk mengukur diameter tabung dan penghisap. Untuk mengukur tekanan dan kelembaban udara berturut-turut digunakan barometer dengan skala terkecil 1 mb dan higrometer aeroid dengan skala terkecil 2%. Massa penghisap dll. ditimbang dengan sebuah neraca torsi sampai dengan 0,01 gram. Adapun pengukuran suhu udara menggunakan sebuah termometer raksa komersial berjangkauan 0-100°C. Suhu penghisap seperti ditunjukkan oleh pengukuran suhu udara tepat di atasnya hanya naik maksimum 2°C dari suhu kamar pada percobaan tanpa saklar hidup, dan praktis tidak pernah berubah bila percobaan menggunakan saklar dengan waktu hidup singkat (< 1 menit) dan waktu istirahat lama (beberapa menit).

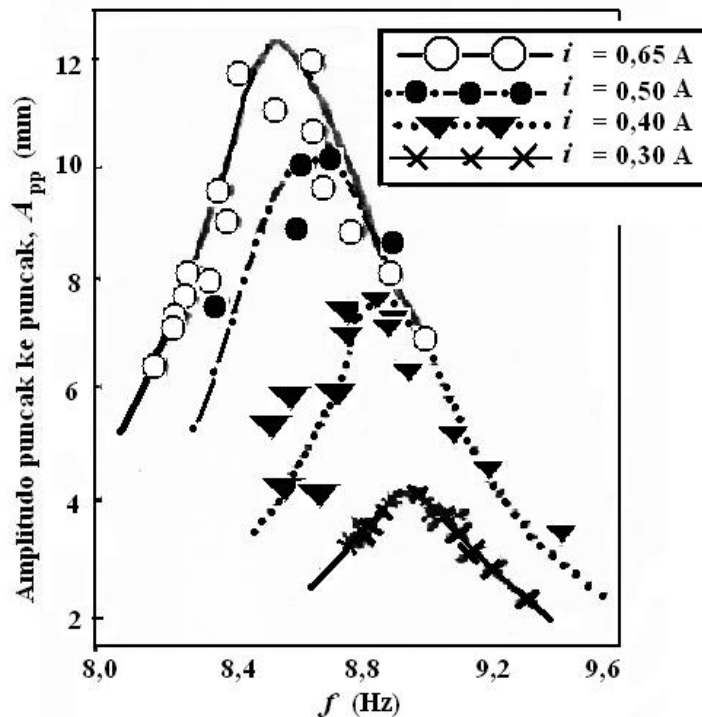
Pada percobaan tabung terbuka, variasi frekuensi adalah empat rute data: frekuensi naik, turun, naik dan turun lagi. Pada percobaan tabung tertutup, pengukuran frekuensi menggunakan skala terkalibrasi (kasar) dengan arus 0,65 A. Untuk setiap panjang tabung, frekuensi divariasi dua kali (naik dan turun). Pembacaan tekanan barometer dikoreksi terhadap adanya uap air.

Analisis regresi kuadrat berbobot sebagaimana diuraikan dalam Pasal II dilakukan dengan bantuan program FIT, yaitu program regresi umum yang ditulis dalam bahasa Fortran 77 oleh W.A. Sterrenburg (UGM) dengan mengambil subrutin-subrutin dari Bevington (1969).

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Konstanta-konstanta Alat

Kurva resonansi sistem untuk tabung terbuka pada berbagai arus solenoida ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan hasil perhitungan regresi ditunjukkan pada Tabel 1. Untuk menguji apakah data percobaan tersebut memenuhi persamaan getaran terpaksa teredam teoretis (pers. 5), dilakukan uji *chisquare* tereduksi (*reduced chisquare*,  $\chi_v^2$ ), dengan kriterium bahwa regresi yang baik harus menghasilkan *chisquare* tereduksi kurang-lebih sama dengan satu (Bevington dan Robinson, 2003: 195) atau peluang agar nilai *chisquare* dari data acak akan lebih besar atau sama dengan nilai *chisquare* yang diperoleh harus terletak antara 10 % dan 90 % (Rabinowicz, 1970).



Gambar 2. Kurva resonansi untuk tabung terbuka.

Tabel 1. Hasil regresi kuadrat berbobot untuk tabung terbuka

$i$ (A)	$\chi_v^2$	$f_0$ (Hz)	$a_0$	$a_1$ ( $10^{-2}$ )	$a_2$ ( $10^{-5}$ )	$\lambda$ ( $s^{-1}$ )	$Q^{-1}$ ( $10^{-2}$ )
0,65*	314,1	$8,687 \pm 0,002$	$0,870 \pm 0,008$	$-2,30 \pm 0,02$	$15,3 \pm 0,1$	$2,2 \pm 1,9$	$8,03 \pm 0,05$
0,65**	45,2	$8,621 \pm 0,003$	$1,876 \pm 0,042$	$-5,04 \pm 0,11$	$34,0 \pm 0,8$	$1,6 \pm 2,2$	$5,84 \pm 0,09$
0,50	9,4	$8,721 \pm 0,036$	$1,81 \pm 0,41$	$-4,7 \pm 1,0$	$31,3 \pm 6,5$	$2,0 \pm 2,0$	$7,29 \pm 0,74$
0,40	4,9	$8,958 \pm 0,006$	$6,58 \pm 0,32$	$-16,37 \pm 0,80$	$102,2 \pm 5,0$	$1,4 \pm 2,3$	$5,13 \pm 0,18$
0,30	0,8	$9,029 \pm 0,008$	$23,9 \pm 2,7$	$-0,58 \pm 0,07$	$360 \pm 41$	$1,4 \pm 2,3$	$4,98 \pm 0,32$

Keterangan: \*) Pengukuran frekuensi seksama ( $\pm 0,01$  Hz)

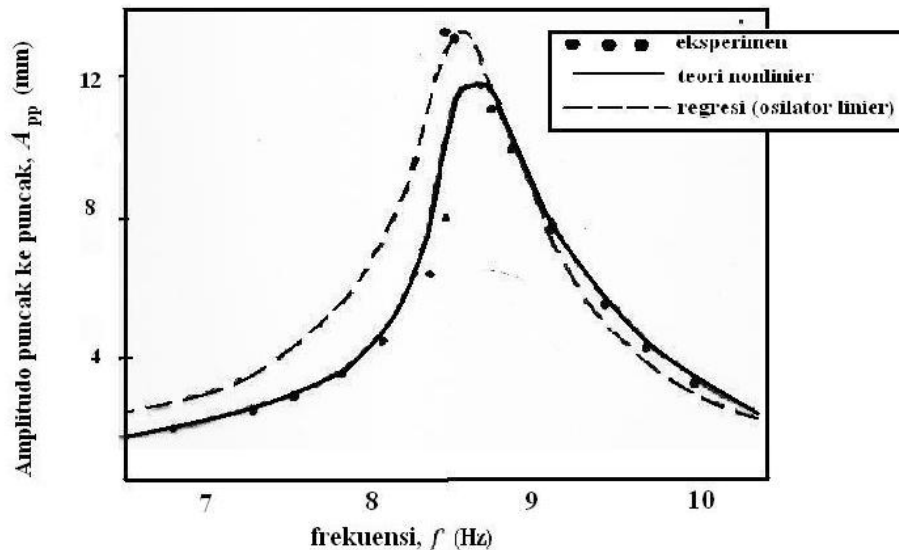
\*\*) Pengukuran frekuensi kasar ( $\pm 0,04$  Hz)

Satuan untuk  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  berturut-turut adalah  $\text{mm}^{-2}$ ,  $\text{mm}^{-2}\text{Hz}^{-2}$ , dan  $\text{mm}^{-2}\text{Hz}^{-4}$ .

Terlihat bahwa hasil perhitungan  $f_0$  tidak sama pada berbagai arus solenoida. Pada arus besar, data tidak memenuhi persamaan teoretis (5). Hal ini menunjukkan bahwa sistem penghisap dan magnet penan bukanlah osilator harmonik; dengan kata lain, gaya elastiknya mengandung suku-suku nonlinier yang tidak dapat diabaikan pada amplitudo besar. Dugaan ini diperkuat oleh hasil pengujian gaya magnet penahan,  $F_m$ , yang menghasilkan hubungan (dengan  $\chi_v^2 = 1,2$ )

$$F_m(r) = -0,24r - 0,015r^2 + 0,00036r^3 - 0,0000026r^4, \quad (13)$$

dengan  $r$  adalah simpangan dalam cm, dan  $F_m$  dalam newton. Lebih jauh lagi, jika koreksi nonlinier dilakukan terhadap pers. (5), ternyata diperoleh kurva resonansi yang lebih sesuai dengan data percobaan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Efek nonlinier pada kurva resonansi tabung terbuka untuk arus 0,65 A jika frekuensi diukur secara seksama (ketidakpastian 0,01 Hz). Kurva mulus adalah kurva yang sudah memperhitungkan koreksi nonlinier dalam pers. (12), dan kurva putus-putus menunjukkan kurva resonansi sebelum dikoreksi.

Terlihat bahwa kesesuaian data dengan teori cukup baik pada arus  $i = 0,30$  A, dengan  $\chi_v^2 = 0,8$ , dan perhitungan  $f_0$  menghasilkan

$$f_0 = (81,5 \pm 0,1) \text{ Hz}^2. \quad (14)$$

Pengukuran konstanta-konstanta alat menghasilkan nilai

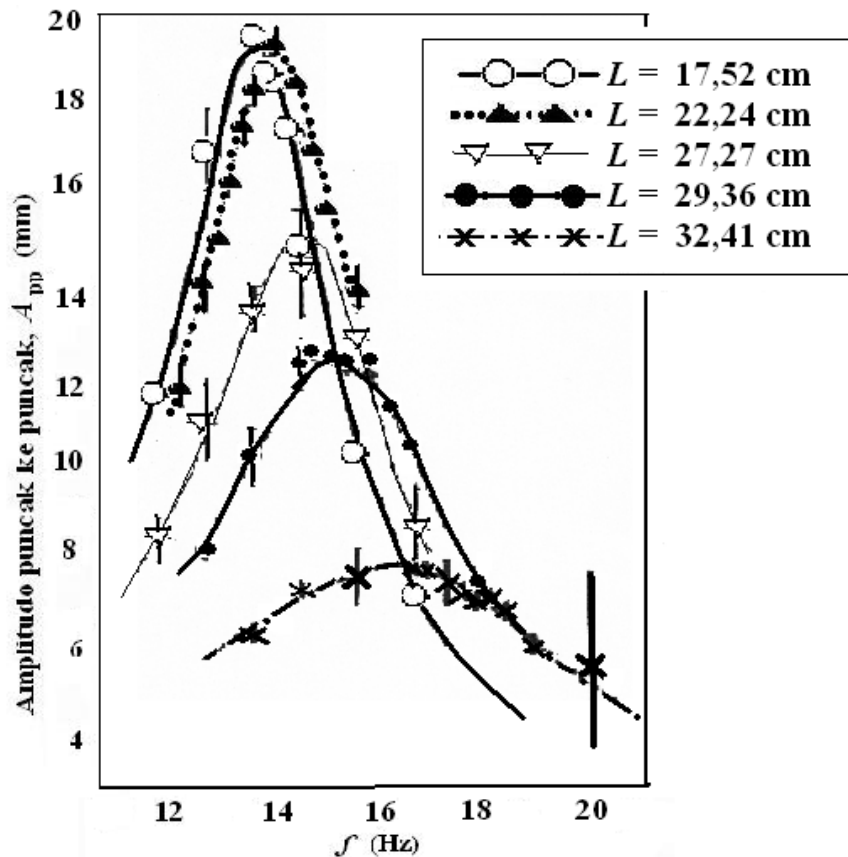
$$\begin{aligned} D_t &= (1,258 \pm 0,002) \text{ cm} \\ D_p &= (1,249 \pm 0,001) \text{ cm} \\ m &= (11,28 \pm 0,02) \text{ gram}. \end{aligned} \quad (15)$$

Diameter efektif penghisap,  $D_p$  dihitung sebagai rerata antara diameter tabung  $D_t$  dan diameter maksimum penghisap sebesar  $D_p = (1,240 \pm 0,001) \text{ cm}$ , sesuai saran P. W. Bridgeman (Clark dan Katz, 1940) agar mengambil diameter efektif penghisap sebagai diameter penghisap ditambah setengah *clearance* antara piston dan tabung.

Nilai  $\lambda$  dan  $Q^{-1}$  dari Tabel 1 menunjukkan bahwa untuk tabung terbuka nilai  $\lambda$  praktis dapat diabaikan dibandingkan dengan ralatnya, yang berarti bahwa untuk tabung terbuka efek gesekan cukup kecil. Adapun nilai kualitas resonansi,  $Q^{-1}$  naik dengan arus listrik karena frekuensi resonansi makin kecil (efek nonlinier). Nilai  $Q^{-1}$  terkecil kira-kira 5 %, berarti kurva resonansi 2 kali lebih tajam daripada percobaan Smith untuk tabung terbuka dengan  $Q^{-1} \approx 10\%$ .

### B. Perhitungan Indeks Adiabatik

Kurva resonansi pada tabung tertutup untuk berbagai panjang kolom udara,  $L$  ditunjukkan pada Gambar 4, sedang hasil perhitungan regresi ditunjukkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 terlihat bahwa nilai  $Q^{-1}$  terkecil kira-kira 19 %, berarti kurva resonansi kalah tajam daripada percobaan Smith untuk tabung terbuka dengan  $Q^{-1} \approx 5\%$ .



Gambar 4. Kurva resonansi untuk tabung tertutup.

Tabel 2. Hasil regresi kuadrat berbobot untuk tabung tertutup

$L$ (cm)	$\chi_v^2$	$f_1$ (Hz)	$a_0$	$a_1$ ( $10^{-2}$ )	$a_2$ ( $10^{-5}$ )	$\lambda$ ( $s^{-1}$ )	$Q^{-1}$ ( $10^{-2}$ )
17,52	0,44	$17,12 \pm 0,16$	$9,9 \pm 1,2$	$-6,2 \pm 0,9$	$11,5 \pm 1,7$	$22,7 \pm 0,6$	$42,2 \pm 3,3$
22,24	1,01	$15,55 \pm 0,04$	$9,5 \pm 0,6$	$-7,6 \pm 0,5$	$16,3 \pm 1,0$	$13,0 \pm 0,8$	$26,6 \pm 0,9$
27,27	0,15	$14,73 \pm 0,11$	$9,2 \pm 1,4$	$-8,3 \pm 1,4$	$19,6 \pm 3,2$	$10,3 \pm 0,9$	$22,2 \pm 2,6$
29,36	3,56	$14,24 \pm 0,02$	$7,1 \pm 0,3$	$-6,8 \pm 0,3$	$17,2 \pm 0,9$	$9,0 \pm 0,9$	$20,2 \pm 0,6$
32,41	2,11	$13,84 \pm 0,02$	$7,8 \pm 0,3$	$-8,0 \pm 0,3$	$21,3 \pm 0,7$	$8,2 \pm 1,0$	$18,8 \pm 0,4$

\* Keterangan: Satuan untuk  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  berturut-turut adalah  $mm^{-2}$ ,  $mm^{-2}Hz^{-2}$ , dan  $mm^{-2}Hz^{-4}$ .

Hasil perhitungan indeks adiabatik,  $\gamma$  menurut pers. (4) ditunjukkan pada Tabel 3 kolom keempat. Hasil perhitungan indeks adiabatik untuk berbagai panjang kolom udara,  $L$  cukup sesuai satu sama lain, dan cukup sesuai dengan nilai-nilai hasil percobaan-percobaan sebelumnya pada suhu kamar (sebelum dilakukan koreksi), yaitu 1,386 untuk gas nitrogen (Clark dan Katz, 1940) dan 1,38 untuk udara (Smith, 1979).

Tabel 3. Hasil perhitungan indeks adiabatik,  $\gamma$  beserta koreksi-koreksi

$L$ (cm)	$P$ ( $10^5$ Pa)	$f_1^2 - f_0^2$ ( $Hz^2$ )	$\gamma^a$	$X_m$	$\Delta\gamma_a$	$\gamma_{\text{terk.}}$
17,52	0,9833	$211,6 \pm 5,5$	$1,390 \pm 0,036$	1,0022	0,052	$1,445 \pm 0,036$
22,24	0,9838	$160,3 \pm 1,2$	$1,336 \pm 0,010$	1,0028	0,053	$1,393 \pm 0,010$
27,27	0,9817	$135,5 \pm 3,2$	$1,388 \pm 0,033$	1,0034	0,054	$1,447 \pm 0,033$
29,36	0,9814	$121,3 \pm 0,6$	$1,338 \pm 0,007$	1,0036	0,056	$1,399 \pm 0,007$
32,41	0,9793	$110,0 \pm 0,6$	$1,343 \pm 0,007$	1,0040	0,056	$1,404 \pm 0,007$

Keterangan:

<sup>a)</sup> Ralat hanya memperhitungkan ralat dalam  $f_1^2 - f_0^2$  mengingat ralat lainnya relatif kecil.

Faktor koreksi nonidealitas  $X_i \approx 1,0003$ .

Hasil perhitungan koreksi-koreksi dan  $\gamma_{\text{terk.}}$  dapat dilihat pada Tabel 3. Dapat dilihat dari Tabel 3 bahwa nilai-nilai  $\gamma_{\text{terk.}}$  cukup sesuai satu sama lain, dan bila diambil nilai rerata berbobot diperoleh

$$\gamma_{\text{terk.}} = 1,401 \pm 0,004, \quad (16)$$

sesuai dengan nilai-nilai terkoreksi yang diperoleh peneliti-peneliti lain sebelumnya, misalnya Clark dan Katz (1940) memperoleh nilai terkoreksi 1,402 untuk nitrogen. Selain itu, nilai yang diperoleh sesuai dengan nilai teoretis 1,40 untuk gas diatomik.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Alat resonator magnetik yang telah dibuat telah menunjukkan hasil nilai indeks adiabatik udara dan berbagai karakteristik resonansi yang sesuai dengan teori dan hasil-hasil penelitian sebelumnya. Mengingat biaya pembuatan resonator sangat murah, resonator ini sangat sesuai untuk praktikum Fisika. Untuk pengembangan selanjutnya untuk penelitian yang lebih serius, disarankan agar alat ini dilengkapi dengan tabung tertutup yang kedap sehingga dapat diselidiki berbagai macam gas pada berbagai daerah tekanan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Basu S., Antia, H. M., dan Bogart, R.S., 2007, "Structure of the Near-Surface Layers of the Sun: Asphericity and Time Variation", *Ap. J.* **654**, 1146.
- Bevington, P.R. dan Robinson, D.K., 2003, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences", edisi ke-3, New York : McGraw-Hill.
- Bevington, P. R., 1969, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences", New York : McGraw-Hill.
- Clark, A. L. dan Katz, L., 1940, "Resonance Method for Measuring the Ratio of the Specific Heats of a Gas,  $C_p / C_v$ ", *Can. J. Res.* **18**(2).
- Humphreys, W. J., 1940, "Physics of the Air," edisi ke-3, New York: McGraw-Hill.
- Isakov, V. A., Kamavin, A.P. dan Nasibov, A.S., 2007, "Hydrodynamic Efficiency of Laser-induced Transfer of Matter", *Quantum Electron* **37**, 405.
- Kaye, G. W.C dan Laby, T. H., 1978, "Tables of Physical and Chemical Constants", edisi ke-14, London: Longmans.
- Lin, C.-H., Antia, H.M., dan Basu, S., 2007, "Seismic Study of the Chemical Composition of the Solar Convection Zone", *Ap. J.* **668**, 603.
- Millar, G., 1986, "An Experiment to Determine  $\gamma$ ", *Phys. Educ.* **21**(2), 116-118.
- Rabinowicz, E., 1970, "An Introduction to Experimentation", Reading: Addison Wesley.
- Romanova, M.M. dan Lovelace, R.V.E., 2006, "The Magnetospheric Gap and the Accumulation of Giant Planets Close to a Star", *Ap. J.* **645**, L73.
- Smith, D. G., 1979, "Simple  $C_p / C_v$  Resonance Apparatus Suitable for the Physics Teaching Laboratory", *Am. J. Phys.* **47** (7), 593-596.