

ARTIKEL RISET

Analisa Kinerja Pompa Kalor Termoakustik Pada Frekuensi Harmonik Orde 1, 3, 5 dan 7 Menggunakan *Stack* Berpori Lingkaran

Agus Cahyono, Wahyu Nur Achmadin, Ikhsan Setiawan and Agung Bambang Setio Utomo*

Ringkasan

Telah dilakukan penelitian tentang kinerja pompa kalor termoakustik, meliputi laju pemanasan dan pendinginan, menggunakan tabung resonator dengan panjang 70 cm dan diameter 4,6 cm pada frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7. *Stack* yang digunakan dari bahan plastik dengan panjang 10 cm dan pori-pori bentuk lingkaran berdiameter tertentu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan beda suhu optimum antara bagian panas dan dingin untuk frekuensi harmonik orde pertama, ketiga, kelima dan ketujuh adalah 27:9:3:1.

Kata Kunci : *Stack*, pori lingkaran, frekuensi harmonik, beda suhu

Abstract

The experiment to know the thermoacoustic heat pump performance, which is included of warming and cooling rates, has been done using a resonator pipe with the length of 70 cm and diameter of 4,6 cm on the 1st, 3rd, 5th and 7th orde of harmonic frequencies. The stack material consists of plastic with the length of 10 cm and a certain circle pored diameter. The result of this experiment is obtained that the ratio of the optimum temperature difference from hot and cool part for harmonic frequencies on the 1st, 3rd, 5th and 7th orde are 27:9:3:1 respectively.

Keywords: stack; circle pore; harmonic frequency; temperature difference

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan ditemukannya berbagai teknologi canggih dan modern serta diiringi tingkat kehidupan manusia yang semakin maju membuat segala sesuatunya serba kompleks tapi kadang berdampak. Dalam hal ini misalnya saja adanya penggunaan peralatan pendingin AC atau lemari Es yang menggunakan gas tertentu akan tetapi berdampak pada kesehatan walaupun dalam jangka lama. Karena alasan itulah perlu diciptakan teknologi modern yang sederhana, murah, praktis tetapi tidak berdampak buruk terhadap kehidupan manusia dan lingkungan. Untuk dapat mewujudkan itu semua, penelitian perlu dilakukan guna menunjang keberhasilan terciptanya teknologi yang ramah lingkungan tersebut.

Salah satu penelitian tentang sistem pendingin yang ramah lingkungan adalah sistem termoakustik

dengan udara sebagai mediumnya. Diharapkan dalam penelitian ini dapat dipelajari fenomena yang terjadi pada peranti termoakustik dan ke depannya dapat menjadikan teknologi termoakustik sebagai salah satu teknologi yang dapat diandalkan.

Termoakustik adalah suatu bidang yang berkaitan dengan fenomena fisis di mana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang akustik (bunyi) atau sebaliknya gelombang bunyi dapat menimbulkan perbedaan suhu. Secara umum peranti termoakustik dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu yang menghasilkan gelombang bunyi akibat adanya perbedaan suhu disebut mesin kalor termoakustik. Sedangkan alat yang menghasilkan perbedaan suhu akibat gelombang bunyi disebut pendingin termoakustik. Teknologi termoakustik menawarkan keuntungan besar bila ditinjau dari aspek ekonomis serta dampak aplikasinya bagi kehidupan [1].

Adapun beberapa aplikasi dari teknologi ini, antara lain adalah pendingin keping elektronik (*chip*), suhu tinggi bisa digunakan untuk mencairkan gas alam dan

*Correspondence: agungbambang@ugm.ac.id

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

†Equal contributor

sebagai pendingin perlengkapan elektronik pada kapal laut [2].

Dengan adanya beberapa keuntungan yang bisa didapatkan dari teknologi ini, maka tidaklah mengherankan bila penelitian mengenai teknologi ini banyak dilakukan oleh para ilmuwan. Hal ini berkaitan dengan masih banyaknya parameter kinerja sistem pompa termoakustik agar kinerjanya optimum. Oleh karena itulah penelitian yang berkelanjutan mengenai teknologi ini perlu dilakukan.

Penelitian akan dibatasi pada pengaruh *stack* diameter pori lingkaran dari bahan plastik terhadap kinerja pompa kalor termoakustik kemudian dengan menggunakan *stack* optimum ini dapatlah dikaji kinerja pompa kalor termoakustik saat beroperasi pada frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7. Dalam penelitian ini diameter pori *stack* yang digunakan ada 4 jenis, (jenis 1 berdiameter 2,13 mm, jenis 2 berdiameter 2,45 mm, jenis 3 berdiameter 3,61 mm dan jenis 4 berdiameter 4,93 mm). Optimasi diameter *stack* ditunjukkan dengan indikator perbandingan beda suhu (antara suhu panas dan dingin) yang dihasilkan pompa kalor termoakustik.

Banyak artikel tentang termoakustik yang dimuat dalam berbagai jurnal ilmiah diantaranya yang dipelopori oleh Wheatley dkk (1985) [3] yang menuliskan tentang pemahaman dasar fenomena termoakustik. Penelitian berlanjut pada tahun 1988 oleh Swift [4] yang menyatakan bahwa bentuk resonator silindris merupakan bentuk resonator termudah untuk peranti termoakustik. Swift (1995) [5] menuliskan tentang teori dasar dan aplikasi termoakustik.

Penelitian tentang teknologi termoakustik terus berlanjut, Russel dan Weibull (2002) [6] mampu membuat sebuah peranti termoakustik untuk demonstrasi yang menghasilkan perbedaan suhu sekitar 15°C dalam waktu 4 menit pengoperasian. Swift (2002) [7] meneliti tentang jarak antar lapisan *stack* dan diperoleh hasil bahwa penurunan suhu maksimum didapat ketika jarak antar lapisan/dinding *stack* tertentu. Tijani dkk (2002) [8] melakukan penelitian termoakustik dengan menggunakan *stack* berbahan sedotan (plastik) minuman yang menghasilkan beda suhu 30°C untuk diameter pori-pori *stack* 2 mm. Demonstrasi eksperimental tentang konversi energi termoakustik dalam sebuah resonator juga telah dilakukan oleh Biwa dkk (2004) [9].

Saat ini penelitian termoakustik sedang dilakukan di Laboratorium Fisika Atom dan Inti FMIPA UGM. Dimulai tahun 2005 penelitian tentang termoakustik telah berhasil merancang dan membuat sebuah peranti termoakustik sebagai sarana pendingin dan pemanas

secara simultan [10, 11]. Uji kinerja alat ini dengan memvariasikan frekuensi dan amplitudo gelombang bunyi yang digunakan dan diperoleh bahwa pada frekuensi 152 Hz dan tegangan speaker 11 volt didapat perbedaan suhu 13°C (*stack* dari bahan kardus) dan beda suhu sebesar $12,5^{\circ}\text{C}$ (*stack* dari bahan film). Elyanita (2006) [12] melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi frekuensi dan posisi *stack* bahan kardus terhadap perubahan suhu pada sistem termoakustik dan diperoleh bahwa posisi terbaik *stack* dengan beda suhu optimal yang didapat sebesar 9°C adalah pada frekuensi 150 Hz. Penelitian mengenai pengaruh diameter resonator terhadap kinerja peranti termoakustik dilakukan oleh Sampurna (2006) [13], didapatkan bahwa diameter optimum adalah 4,6 cm dengan beda suhu sebesar $10,9^{\circ}\text{C}$ dalam waktu 10 menit pengoperasian. Wagiyanti (2007) [14] berhasil melakukan penelitian mengenai korelasi panjang resonator 70 cm diameter 3,8 cm dengan *stack* dari bahan kertas manila dengan panjang *stack* 10 cm di dapat beda suhu 23°C .

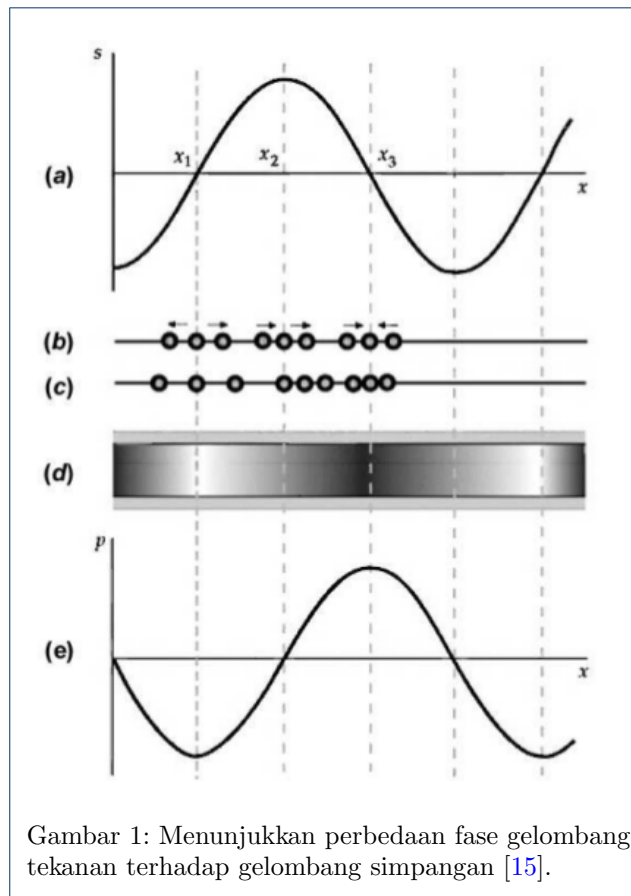
II. Tinjauan teori

Gelombang bunyi dapat terjadi karena adanya perpindahan dan perenggangan molekul-molekul medium (padat, cair atau gas) yang dilaluinya. Gelombang bunyi dibatasi oleh jangkauan frekuensi yang dapat merangsang telinga dan otak manusia melalui sensasi pendengaran (20 Hz sampai dengan 20.000 Hz) [15].

Terkait dengan penelitian termoakustik, satu hal yang menjadi komponen penting adalah gelombang bunyi. Gelombang bunyi yang ditimbulkan oleh sumber harmonik disebut gelombang bunyi harmonik, misalnya saja garpu tala dan *speaker* yang dihubungkan dengan sistem pembangkit gelombang.

Simpangan gelombang sebagai fungsi posisi x dan waktu t bagi gelombang bunyi harmonik akan menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan dan tekanan udara. Oleh karena tekanan dalam gas sebanding dengan kerapatan, maka perubahan tekanan akan maksimum ketika perubahan kerapatannya maksimum. Ketika gelombang bunyi bergerak seiring waktu, simpangan molekul udara, kerapatan dan tekanan pada satu titik semuanya berubah secara sinusoidal dengan frekuensi f yang sama dengan frekuensi sumbernya.

Pada Gambar 1, (a) menunjukkan simpangan dan titik setimbang molekul-molekul udara dalam gelombang bunyi harmonik versus posisi. Posisi kesetimbangan pada x_1 dan x_3 sedangkan simpangan maksimum di x_2 . (b) Beberapa molekul ditempatkan pada posisi kesetimbangannya sebelum gelombang bunyi tiba. Arah anak panah menyatakan arah



simpangan yang disebabkan oleh gelombang bunyi. (c) Molekul-molekul di dekat x_1 , x_2 , dan x_3 setelah gelombang bunyi tiba. (d) Kerapatan maksimum pada x_3 dan minimum pada x_1 . (e) Perubahan tekanan versus posisi. Perubahan tekanan dan simpangan berbeda fase 90° [15].

Ditinjau sebuah pipa semi tertutup (satu ujung tertutup dan ujung lainnya terbuka). Dalam hal ini selalu dicirikan dengan adanya simpul simpangan di ujung pipa tertutup sedangkan ujung terbuka berwujud perut simpangan. Panjang gelombang simpangan molekul udara di dalam pipa adalah panjang gelombang yang sesuai dengan panjang pipa sehingga terdapat simpul pada ujung tertutupnya. Hal ini dapat dilihat dari persamaan yang mewakili sistem pipa semi tertutup, sebagai

$$L = \frac{2n - 1}{4} \lambda_n; n = 1, 2, 3, \dots \tag{1}$$

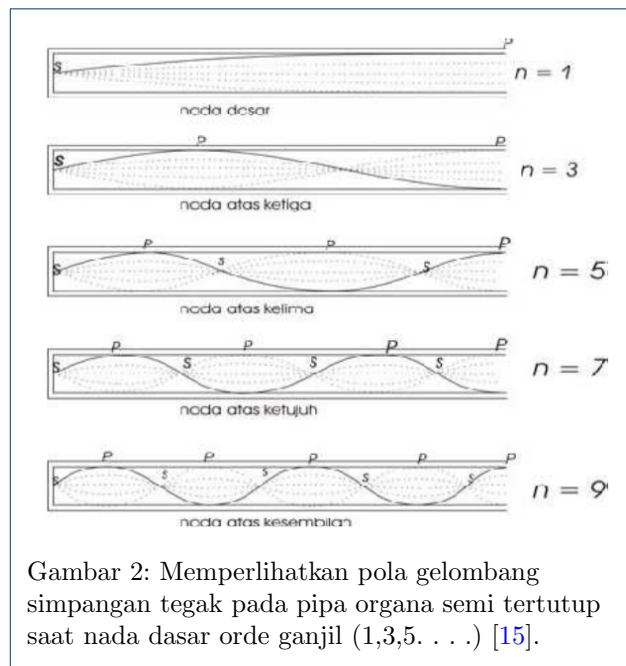
dengan L adalah panjang pipa, λ_n adalah panjang gelombang bunyi dan n adalah bilangan bulat yang sering disebut sebagai ragam getaran. Bila $n = 1$ maka yang terjadi adalah nada dasar (harmonik pertama), sedangkan $n = 2$ berarti nada atas pertama

(harmonik kedua) dan seterusnya. Pada pipa organa semi tertutup frekuensi dasarnya adalah $v/4L$, dengan v adalah cepat rambat gelombang bunyi di udara, sehingga harmonik yang ada hanya harmonik angka ganjil.

Terlihat pada pipa silindris semi tertutup (Gambar 2), pada ujung tertutup terjadi simpul simpangan dan perut simpangan pada ujung terbuka dengan modulus dasar getaran adalah $\lambda = 4L$ dan modulus berikutnya adalah $3\lambda = 4L$ atau secara umum syarat frekuensi gelombang berdiri dapat dituliskan sebagai

$$f_n = (2n - 1) \frac{v}{4L}; n = 1, 2, 3, \dots \tag{2}$$

dengan frekuensi alami sistem ini terjadi dalam rasio $1 : 3 : 5 : 7 \dots$, yang berarti bahwa harmonik genap hilang.

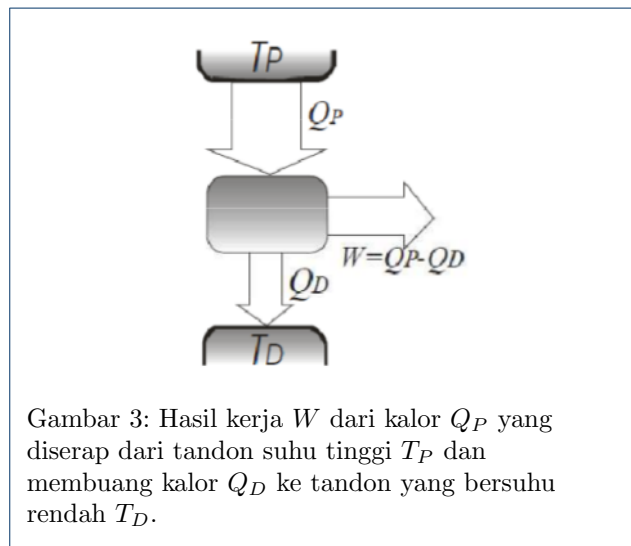


Di lain pihak kajian termodinamika mencakup pengetahuan dasar tentang suhu, kalor, dan sifat-sifat yang dipengaruhi oleh suhu dan kalor. Dalam termodinamika dikenal sebagai Hukum Pertama Termodinamika, yang intinya mengatakan bahwa energi bersifat kekal. Kerja dW mencakup semua jenis kerja mekanik, elektrik, dan magnetik. Apabila sejumlah gas berada dalam sebuah bejana silinder berpiston diberi kalor sebesar dQ pada tekanan tetap maka sebagian kalor digunakan untuk menaikkan suhu gas atau tenaga internal sistem sebesar dU dan sebagian lagi digunakan untuk melakukan kerja luar (oleh sistem) sebesar dW , yang secara umum

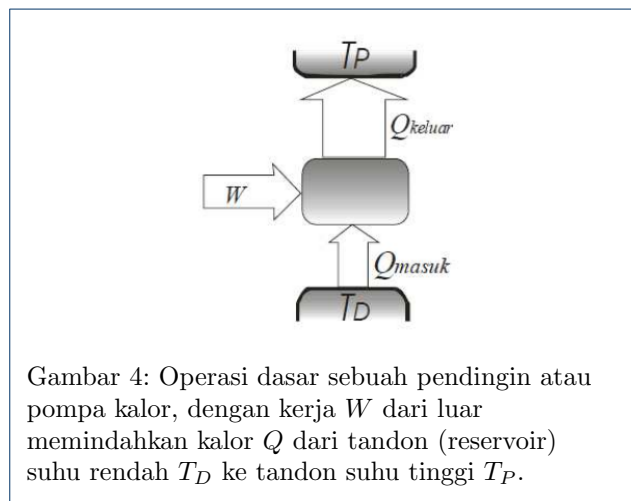
dituliskan sebagai

$$dQ = dU + dW \tag{3}$$

Pada sebuah skema kerja sistem (Gambar 3), dengan T_P (suhu tandon panas) dan T_D (suhu tandon dingin), Q_P adalah kalor dari tandon panas dan Q_D adalah kalor menuju tandon dingin akan diperoleh W usaha mekanik sebesar W . Di lain pihak



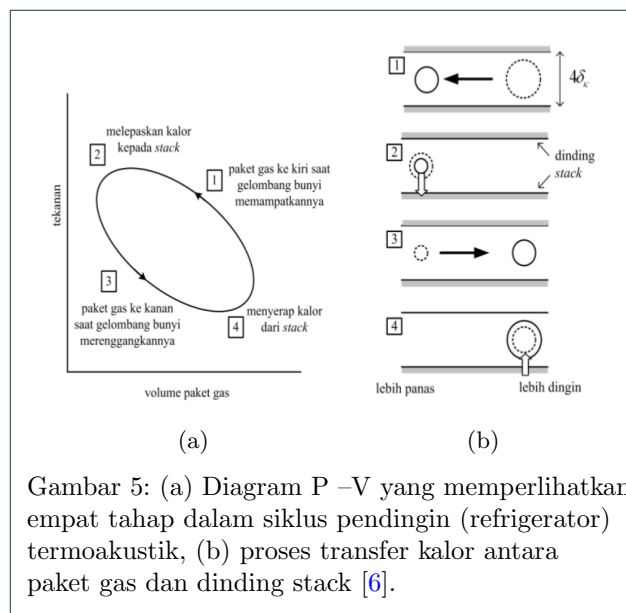
mekanisme kerja sistem termoakustik didasarkan pada operasi sistem pendingin atau pompa kalor. Gambar 4, memperlihatkan operasi dasar sebuah sistem pendingin atau pompa kalor, di mana suatu kerja dari luar W , misalnya gelombang bunyi, memindahkan sejumlah kalor Q dari tandon (reservoir) suhu rendah T_D ke tandon suhu tinggi T_P .



Jika siklus tersebut berulang maka akan terjadi pengurangan kalor pada tandon bersuhu T_D dan

menambah kalor pada tandon bersuhu T_P . Hal ini berakibat akan semakin turunnya suhu pada tandon T_D dan sebaliknya akan meningkatkan suhu pada tandon T_P .

Siklus proses pendinginan secara termoakustik dapat dilihat pada Gambar 5. Saat gelombang bunyi menyebabkan paket gas di dalam *stack* bergerak ke bagian kiri (panas), maka tekanan akan meningkat dan gas termampatkan. Paket gas yang termampatkan ini sekarang lebih panas dari dinding *stack* di dekatnya sehingga gas akan melepaskan kalor ke *stack* sehingga menyusutkan volume paket gas tersebut. Saat gelombang berdiri melanjutkan siklusnya, paket gas ditarik kembali ke bagian yang tekanannya lebih rendah (kanan), paket gas menjadi lebih renggang dan lebih dingin dari pada dinding di sekitarnya, sehingga gas menyerap kalor dari dinding *stack* untuk mengembang. Siklus ini terus berulang dan efeknya adalah transfer kalor dari bagian dingin (kanan) ke bagian panas (kiri) *stack*.

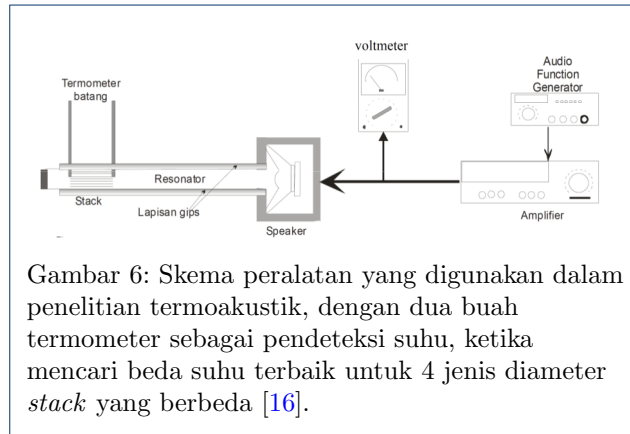


III. Results And Discussion

1. Alat yang digunakan

Skema susunan peralatan termoakustik secara lengkap (Gambar 6) dengan komponen/peralatan, yaitu sistem sumber bunyi (terdiri dari *Loudspeaker* + kotaknya dari *Woofers*, ACR, model C 610 WH, max power 60 watts, impedansi 8 ohm, *Digital Audio Function Generator* model GFG-8016 G, *Power Amplifier*, Karaoke AV Sistem, MV 8000 MEGAFOX dan Multimeter SANWA), sistem Deteksi Suhu (terdiri dari dua buah termometer batang) dan sistem Deteksi

Bunyi (terdiri dari MIC Kondensator + *Pre-Amp* + Kabel dan Komputer + *sound card* + perangkat lunak *Winscope 2.51*).



2. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa Tabung Resonator (terbuat dari pipa PVC berdiameter 4,6 cm dengan panjang 70 cm), Stack yang terbuat dari bahan plastik berdiameter $2,13 \pm 0,05$ mm (isi *ballpoint*); $2,45 \pm 0,05$ mm (pembungkus kabel); $3,61 \pm 0,05$ mm (sedotan minuman air mineral kemasan gelas), dan $4,93 \pm 0,05$ mm (sedotan minuman).

Setelah frekuensi resonansi diperoleh $f = 120$ Hz pada $n = 1$ menggunakan *winscope*, ditunjukkan pada puncak sinyal keluaran tertinggi, maka dapat pula diperoleh optimasi diameter pori-pori *stack* bahan plastik panjang 10 cm dengan variasi empat jenis diameter pori yang berbeda (2,13 mm; 2,45 mm; 3,61 mm dan 4,91 mm) dengan tegangan input *speaker* maksimal 15 volt. Pada tiap variasi pori bahan *stack*, laju pendinginan dan pemanasan (perubahan suhu antara bagian panas dan dingin) diamati dan dicatat tiap 1 menit dalam waktu 10 menit. Perbedaan suhu terbesar setelah 10 menit pengamatan dari tiap variasi diameter pori-pori *stack* menunjukkan diameter optimal.

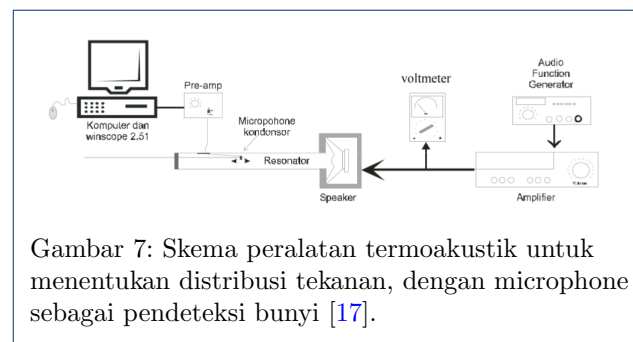
3. Menyelidiki karakteristik dari mic pendeteksi bunyi.

Hal pertama yang dilakukan untuk mengetahui kemampuan *mic* dalam mendeteksi bunyi adalah dengan mencari sinyal keluaran optimal untuk berbagai posisi *mic* saat dioperasikan pada frekuensi harmonik 1, 3, 5 dan 7. Dalam hal ini *mic* dipasang mulai dari ujung dekat sumber bunyi kemudian digeser tiap 5 cm sampai ujung tertutup dengan tegangan input *speaker* maksimal untuk

masing-masing frekuensi. Pengamatan sinyal keluaran dilakukan dengan *winscope* dan multimeter. Setelah didapatkan posisi tertentu di mana sinyal keluaran dari *mic* paling optimal, input *speaker* diturunkan hingga minimum namun sinyal keluaran *mic* masih bisa dideteksi. Selanjutnya input *speaker* dinaikkan tiap 1 volt dan dilakukan pengamatan sinyal keluaran *mic* untuk tiap kenaikan.

4. Menyelidiki pengaruh frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7 terhadap bentuk gelombang yang terjadi pada resonator

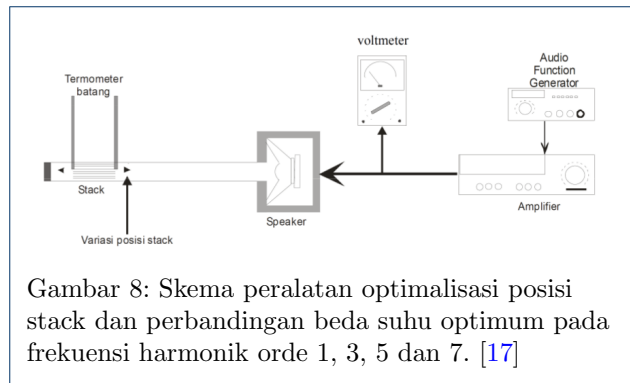
Untuk mengetahui bentuk gelombang di dalam resonator, dilakukan dengan cara menggeser *mic* dari ujung sumber sampai ujung tertutup untuk tiap 5 cm (Gambar 7). Pengamatan bentuk gelombang dilakukan dengan memasang pendeteksi bunyi (*mic*) pada resonator untuk berbagai variasi posisi pada frekuensi AFG $f_{AFG} = 120$ Hz (frekuensi resonansi) yang menunjukkan nada dasar pertama, begitu selanjutnya. Dari berbagai posisi *mic* yang dipasang, diamati sinyal keluaran pada *winscope* (a.u) dengan posisi *mic* dimulai dari ujung dekat sumber bunyi dan kemudian *mic* digeser tiap 5 cm sampai mendekati ujung tertutup. Dari masing-masing sinyal keluaran kemudian di plot dalam grafik yang menunjukkan bentuk gelombang tekanan pada resonator, sehingga dapat diselidiki bentuk gelombang yang terjadi pada frekuensi harmonik orde pertama, ketiga, kelima dan ketujuh.



5. Menyelidiki perbedaan suhu yang dihasilkan untuk berbagai posisi stack saat beroperasi pada frekuensi harmonik orde pertama, ketiga, kelima dan ketujuh.

Pada tahap ini *stack* yang digunakan adalah *stack* dengan diameter pori-pori optimal dengan panjang *stack* tetap 10 cm [16]. Penelitian pertama dilakukan pada frekuensi harmonik orde pertama dengan posisi

stack divariasikan dari posisi 15 cm sampai 60 cm dari ujung sumber dan diamati perubahan suhu tiap menit sehingga dapat dihitung perbedaan suhu setelah 10 menit pengamatan (Gambar 8). Hal yang sama dilakukan untuk frekuensi harmonik orde ketiga, kelima dan ketujuh serta dibandingkan besarnya perbedaan suhu yang dihasilkan antara bagian panas dan dingin untuk frekuensi harmonik orde pertama, ketiga, kelima dan ketujuh.



Gambar 8: Skema peralatan optimalisasi posisi stack dan perbandingan beda suhu optimum pada frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7. [17]

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menggunakan tegangan masukan *speaker* maksimal sebesar 15 volt, gelombang sinyal keluaran dan spektrum bunyi dari sumber bunyi dapat diketahui melalui *scope* dan mengaktifkan mikrofon dengan mengubah frekuensi masukan.

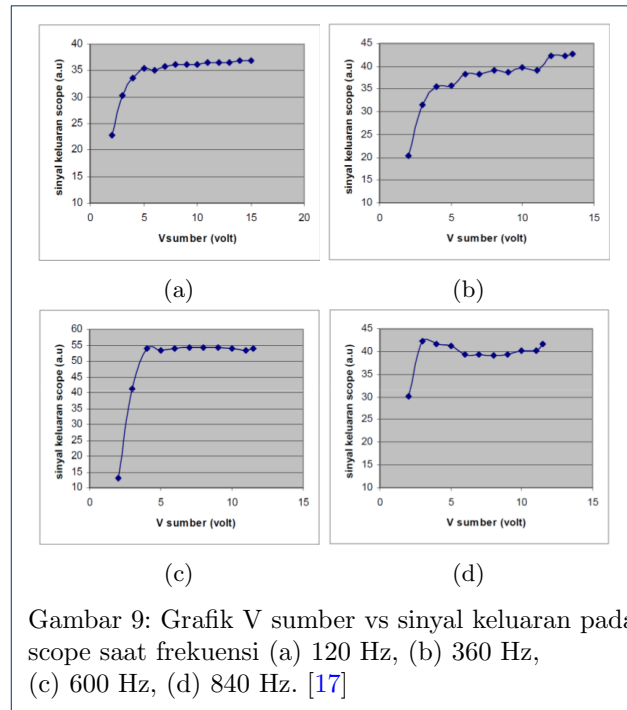
1. Karakteristik MicPendeteksi Bunyi.

Pada Gambar 9, ditunjukkan sinyal keluaran *mic* tertinggi pada posisi 55 cm dari ujung terbuka untuk frekuensi harmonik 1, 3 dan 7, sedang untuk harmonik 5 pada posisi 50 cm dari ujung terbuka.

Dari posisi ini ketika tegangan diturunkan sampai minimum yaitu 2 volt, sinyal yang teramati pada *scope* mengalami penurunan. Setelah tegangan kita naikan tiap satu volt, ternyata untuk tiap-tiap frekuensi akan mengalami titik jenuh (datar) pada tegangan tertentu. Untuk frekuensi 120 Hz dan 360 Hz titik datar terjadi pada 5 volt, pada frekuensi 600 Hz terjadi pada 4 volt dan pada frekuensi 840 Hz terjadi pada 3 volt .

2. Bentuk gelombang dalam resonator pada frekuensi harmonik orde 1, 3, 5, dan 7.

Sebelum meninjau data beda suhu tiap frekuensi harmonik, terlebih dahulu dilihat bentuk gelombang dari masing masing frekuensi harmonik. Tabung resonator yang digunakan, termasuk sumbat karet pada ujungnya, sebagai medium perambatan



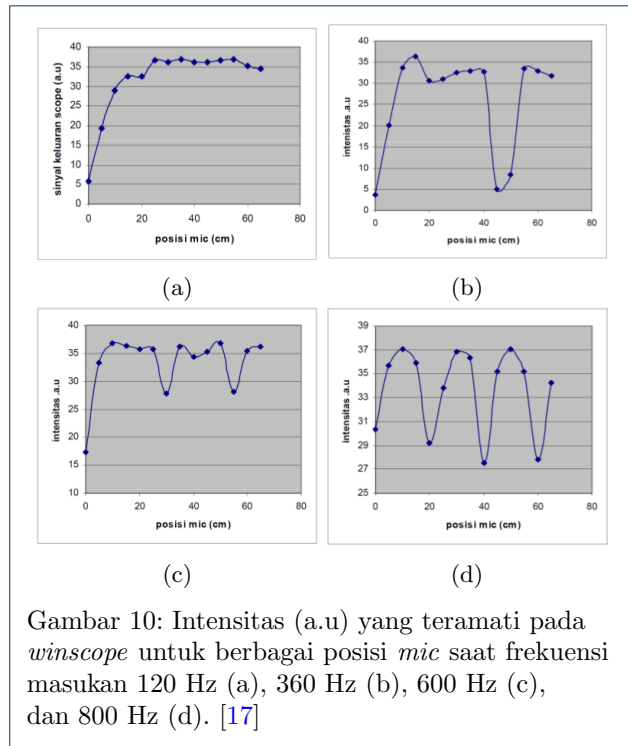
Gambar 9: Grafik V sumber vs sinyal keluaran pada scope saat frekuensi (a) 120 Hz, (b) 360 Hz, (c) 600 Hz, (d) 840 Hz. [17]

gelombang bunyi panjangnya 70 cm. Dimulai pada frekuensi harmonik pertama sebesar 120 Hz (frekuensi resonansi) dan selanjutnya frekuensi harmonik ketiga ($f = 360$ Hz), kelima ($f = 600$ Hz) dan ketujuh ($f = 840$ Hz) (perbandingan frekuensi harmonik orde ganjil di mana $f_1 : f_3 : f_5 : f_7 = 1 : 3 : 5 : 7$). Saat frekuensi dipasang pada 120 Hz (nada dasar pertama), gelombang yang terbentuk berdasarkan pengamatan menunjukkan adanya perut tekanan pada ujung tertutup dan simpul tekanan pada ujung terbuka. Hal ini sesuai dengan teori pola gelombang yang terjadi pada pipa organa setengah tertutup, di mana pada ujung yang tertutup mempunyai tekanan yang lebih tinggi dari pada ujung terbuka. (Gambar 10)

Pada pola gelombang dalam resonator saat dipasang pada frekuensi 120 Hz, terlihat 2 titik terakhir penurunan, yang secara teori pada titik-titik tersebut harusnya sinyal keluaran menunjukkan nilai yang tinggi.

Dalam hal ini ada beberapa hal yang dapat dibahas, yang pertama pada penutup karet yang dipasang di ujung resonator mengalami sedikit kebocoran sehingga tekanan yang terjadi sedikit berkurang tidak tertutup secara penuh. Hal kedua dimungkinkan karena *mic* yang digunakan mempunyai karakteristik dan batasan maksimum untuk pendeteksi bunyi, sehingga pada jarak titik tersebut kemampuan *mic* dalam mendeteksi bunyi sudah mulai berkurang.

Dari keempat frekuensi harmonik tersebut secara umum bentuk gelombang yang terjadi sesuai dengan

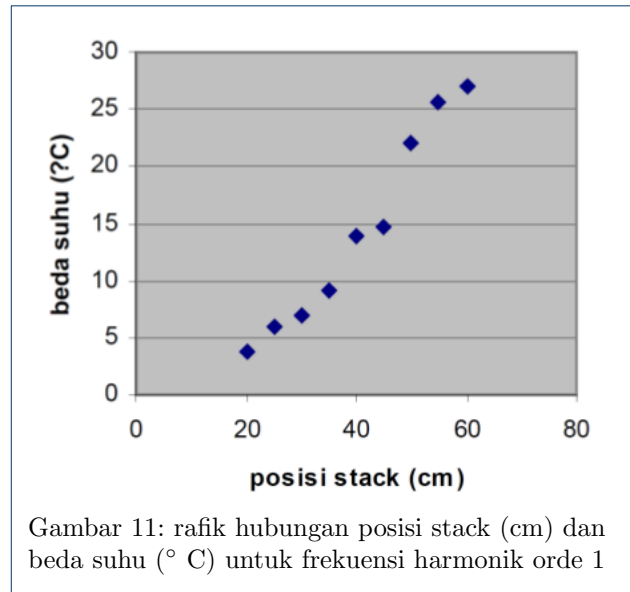


teori pola-pola gelombang pada resonator semi tertutup (Gambar 2). Untuk frekuensi yang lebih tinggi yaitu 360 Hz, 600 Hz, dan 840 Hz pola gelombang yang terjadi mempunyai simpul dan perut simpangan lebih banyak. Hal ini merupakan bentuk konsekuensi dari suatu tabung pipa organa semi tertutup dengan panjang tetap dengan salah satu ujungnya terbuka dan ujung lainnya tertutup.

3. Perbedaan suhu yang dihasilkan antara bagian panas dan dingin untuk berbagai posisi stack pada frekuensi harmonik orde pertama, ketiga, kelima dan ketujuh.

Adapun perbandingan beda suhu maksimum yang dihasilkan dari kinerja pompa kalor termoakustik ketika beroperasi pada frekuensi harmonik orde ganjil (1, 3, 5 dan 7) dengan frekuensi harmonik orde pertama pada posisi stack pada 60 cm dari ujung terbuka menghasilkan beda suhu terbesar (Gambar 11). Perbedaan suhu yang dihasilkan antara tandon panas dan dingin setelah 10 menit pengoperasian adalah 27° C, seperti terlihat pada Tabel 1 dengan kenaikan suhu sebesar 19° C dan penurunan suhu 7,6° C.

Pada frekuensi harmonik pertama, beda suhu yang dihasilkan cenderung meningkat ketika posisi *stack* divariasikan mulai dari posisi 15 cm dari ujung sumber bunyi sampai posisi 60 cm dari ujung sumber



Tabel 1: Perbandingan beda suhu maksimum yang dihasilkan untuk frekuensi harmonik orde 1, 3, 5, 7

Orde Harmonik	$\Delta T(^{\circ} C)$	$T_p(^{\circ} C)$	$T_d(^{\circ} C)$
1	27	49	22,4
3	9	38	29
5	2,8	33	30,2
7	1,2	32	30,8

bunyi. Hal ini mempunyai kesesuaian dengan bentuk gelombang tekanan yang terjadi. Pada frekuensi harmonik ini sinyal keluaran yang teramati pada *scope* juga mengalami kecenderungan peningkatan dengan titik terendah berada pada ujung terbuka resonator.

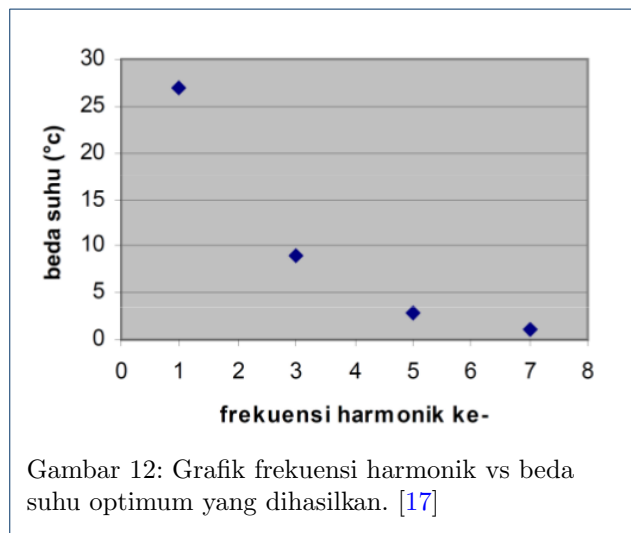
Untuk frekuensi harmonik ketiga perbedaan suhu yang dihasilkan untuk tiap posisi *stack* juga menunjukkan adanya kesesuaian dengan bentuk gelombang yang teramati [17]. Beda suhu paling tinggi terdapat pada posisi 60 cm dari ujung terbuka atau 10 cm dari ujung tertutup (mendekati $\lambda/20$). Hal ini dikarenakan pada posisi ini terjadi kesesuaian antara perbedaan tekanan dan kecepatan osilasi dari paket gas sehingga beda suhu yang dihasilkan maksimum [4].

Selain itu perbedaan posisi *stack* juga mengakibatkan perbedaan volume antara tandon panas dan dingin, sehingga hal ini juga berpengaruh pada beda suhu yang dihasilkan. Hal yang sama terjadi pada frekuensi harmonik orde kelima dan ketujuh, di mana beda suhu yang dihasilkan tiap variasi posisi *stack* mempunyai kesesuaian dengan bentuk gelombang yang terjadi.

Dari keempat frekuensi harmonik yang digunakan beda suhu terbaik yang dihasilkan terjadi pada frekuensi harmonik orde pertama yaitu 27° C. Pada frekuensi harmonik pertama (frekuensi resonansi)

akan menghasilkan beda suhu maksimal karena terdapat korelasi yang sesuai di mana proses transfer kalor terjadi dengan kecepatan osilasi yang sesuai. Apabila kecepatan osilasi dari gelombang bunyi lambat maka transfer kalor yang terjadi juga lambat sehingga beda suhu yang dihasilkan tidak optimal. Sedangkan pada saat gelombang bunyi beresilasi dengan cepat maka waktu untuk mengambil kalor saat berada di tandon dingin juga cepat sehingga kalor yang dipindahkan ke tandon panas hanya sedikit. Hal ini berakibat beda suhu yang dihasilkan pun tidak maksimal.

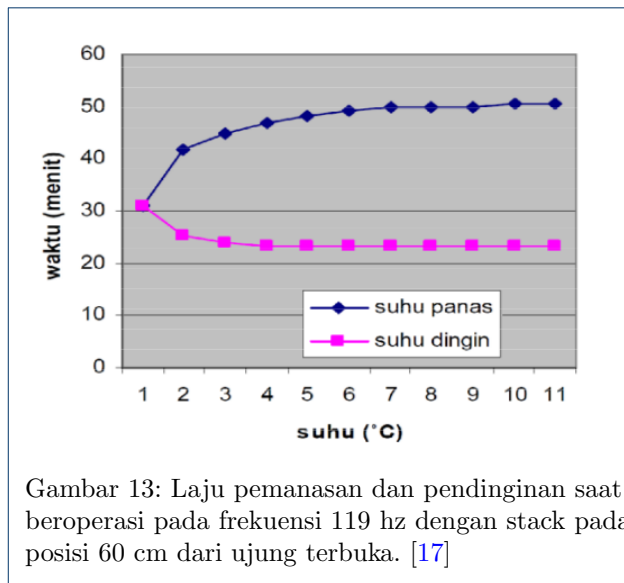
Dari keempat frekuensi harmonik, posisi stack terbaik yang dihasilkan semuanya sama yaitu pada posisi 60 cm dari ujung terbuka atau 10 cm dari ujung tertutup (mendekati posisi $\lambda/20$). Sedangkan perbandingan beda suhu terbesar yang dihasilkan pada penelitian kali ini untuk frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7 yaitu $(27 : 9 : 2.8 : 1,2)^\circ\text{C}$ (lihat Gambar 12) atau dengan pembulatan mempunyai perbandingan $27 : 9 : 3 : 1$.



Gambar 12: Grafik frekuensi harmonik vs beda suhu optimum yang dihasilkan. [17]

Dapat dikatakan bahwa beda suhu yang dihasilkan mempunyai pola perbandingan 31 kali dari beda suhu yang dihasilkan oleh frekuensi harmonik sebelumnya. Beda suhu optimal pada frekuensi harmonik pertama, yaitu 27°C terjadi pada frekuensi 119 Hz, adapun proses kenaikan dan penurunan suhu masing-masing tandon tertera pada Gambar 13.

Pada laju pemanasan dan pendinginan, satu hal yang perlu kita lihat adalah adanya aliran balik kalor yang menyebabkan suhu tandon dingin menjadi naik lagi karena pada daerah termampatkan volumenya kecil tetapi tekanan terus meningkat. Hal ini berakibat pada tumbukan yang terjadi antar molekul semakin besar sehingga terjadi aliran balik kalor dari tandon panas ke tandon dingin.



Gambar 13: Laju pemanasan dan pendinginan saat beroperasi pada frekuensi 119 Hz dengan stack pada posisi 60 cm dari ujung terbuka. [17]

Pada frekuensi resonansi meskipun input speaker dipasang maksimal ($V = 15$ volt), akan tetapi saat dioperasikan pada frekuensi harmonik ketiga beda suhu optimal yang dihasilkan 9°C pada posisi stack 60 cm dari ujung terbuka input speaker maksimumnya pada 13,5 volt. Sedangkan pada frekuensi harmonik kelima beda suhu optimum yang dihasilkan $2,8^\circ\text{C}$ ($V = 11$ volt), dan pada harmonik ketujuh beda suhu optimum yang dihasilkan $1,2^\circ\text{C}$ untuk input speaker sama yaitu 11 volt dengan posisi stack pada 60 cm dari ujung terbuka. Perbedaan input speaker operasional maksimum ini diakibatkan karena frekuensi yang digunakan berbeda, di mana amplifier mempunyai karakteristik tersendiri untuk frekuensi tertentu.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

Diameter pori-pori stack memengaruhi besar kecilnya nilai perbedaan suhu antara bagian panas dan bagian dingin dengan diameter pori-pori stack optimum didapat pada diameter 3,61 mm dengan perbedaan suhu 19°C antara bagian yang panas dan dingin. Sedangkan perbandingan beda suhu optimum yang dihasilkan saat beroperasi pada frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7 adalah $27 : 9 : 3 : 1(^\circ\text{C})$. Adapun posisi stack terbaik untuk frekuensi harmonik orde 1, 3, 5 dan 7 sama yaitu pada posisi 60 cm dari ujung terbuka

Saran

Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat mengenai diameter optimum pori-pori stack, perlu dilakukan

penelitian dengan variasi diameter pori yang lebih banyak. Di samping itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan stack diameter pori lingkaran untuk beberapa variasi panjang stack dan panjang tabung resonator. Hal lainnya adalah perlunya dibuat suatu perangkat peranti termoakustik yang mempunyai tingkat kebisingan rendah dengan menambahkan peredam bunyi yang lebih baik.

Author

1 Agus Cahyono

From :

(1) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

2 Wahyu Nur Achmadin

From :

(1) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

3 Ikhsan Setiawan

From :

(1) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

4 Agung Budi Setio Utomo

From :

(1) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

Pustaka

- Wu F, Wu C, Guo F, Li Q, Chen L. Optimization of a thermoacoustic engine with a complex heat transfer exponent. *Entropy*. 2003;5(5):444–451.
- Anonim A. Thermoacoustics Heat Pump for Upgrading Industrial Waste Heat; 2007. Available from: http://www.ecn.nl/eei/research/waste/_heat/tahp/application.en.html.
- Wheatley J, Hofler T, Swift GW, Migliori A. Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines. *Am J Phys*. 1985;53:147–162.
- Swift GW. Thermoacoustic engine. In: Crocker MJ, editor. *Encycl. Acoust*. New York: Wiley; 1997. p. 695–701.
- Swift GW. Thermoacoustic engines and refrigerators. *Phys Today*. 1995;48:22–28.
- Russell DA, Weibull P. Tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstration. *Am J Phys*. 2002;70:1231–1233.
- Swift GW. Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators. Los Alamos National Laboratory: Acoustical Society of America Publications; 2002.
- Tijani MEH, Zeegars JCH, Waele TAM. The optimal stack spacing for Thermoacoustic Refrigerator. *J Acoust Soc Am*. 2002;112:128–130.
- Biwa T, Yashiro Y, Kozuka M, Yazaki T, Mizutani U. Experimental demonstration of thermoacoustic energy conversion in a resonator. *Phys Rev E*. 2004;69(6).
- Setiawan I, Utomo ABS, R W Andi. Laporan Penelitian antar Bidang Ilmu, Rancang Bangun Piranti Termoakustik Sebagai Pendingin dan Pemanas Udara Secara simultan. Yogyakarta: FMIPA UGM; 2005.
- Setiawan I, Utomo ABS, Maruto G, Andi RW. Rancang Bangun Piranti Termoakustik Sebagai Pemompa Kalor. *SIGMA J Sains dan Teknol*. 2007;10(1).
- Elyanita MS, Setiawan, Utomo ABS. Pengaruh Peubah Frekuensi dan Posisi Stack Bahan Kardus Terhadap Peubah Suhu pada Sistem Termoakustik. *J Fis Indones*. 2007;11.
- Sampurna D, Setiawan I, Utomo ABS. Studi Eksperimen Untuk Mengetahui Pengaruh Diameter Tabung Resonator Silindris Terhadap Kinerja Piranti Termoakustik. *J Fis Indones*. 2007;11.
- Wagiyanti. Kajian Pengaruh Panjang Stack Dan Panjang Aluminium Foil Pada Stack Terhadap Perbedaan Suhu Pada Kinerja Pompa Kalor Termoakustik [Skripsi]. UGM; 2006.
- Tipler PA. *Fisika untuk Sains dan Teknik*. 3rd ed. Jakarta: Erlangga; 1998.
- Cahyono A, Setiawan I, Utomo ABS. Analisis Variasi Diameter Stack Berpori Lingkaran. *Berk Ilm MIPA*. 2013;23(1).
- Cahyono A. Analisa Perbandingan Kinerja Pompa Kalor Termoakustik pada Frekuensi Harmonik orde 1, 3, 5, dan 7 untuk stack Berpori Lingkaran [Skripsi]. Universitas Gadjah Mada; 2007.