

Studi Eksperimental Pengaruh Frekuensi Bunyi dan Panjang Resonator Lurus Terhadap Penurunan Suhu Dalam Alat Pendingin Termoakustik Tipe Gelombang Berjalan

Mega C. Gupta¹, Ikhsan Setiawan², Agung B. S. Utomo

Departemen Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada
Sekip Utara BLS 21 Yogyakarta 55281 Indonesia

¹E-mail : megachandrag@mail.ugm.ac.id

²E-mail: ikhsan_s@ugm.ac.id

Abstract: *Traveling wave thermoacoustic refrigerators are alternative and environmentally friendly cooling devices which use traveling sound wave in heat removing process to have some cooling. The structure of these devices usually have a combination of a straight resonator tube and a loop tube. In this experiment, we used PVC (polyvinyl chloride) pipe with inner diameter of 55 mm to construct the resonator and loop tubes. The working gas inside the tubes is atmospheric air. The regenerator has 40 mm length and 53 mm diameter, it is made of a tight stack of stainless-steel wire-mesh screens with mesh number of 60 mesh/inch. A 10-inch loudspeaker and an audio amplifier are used as the sound source. Audio signal and frequency are provided and controlled by using a function generator. In this research, the influences of sound frequency and resonator length on the temperature decrease of air are studied experimentally, with the loop tube length is constant at 390 cm. The sound frequency is varied in the range of 26 Hz – 43 Hz, while the resonator range is varied into 40cm, 55cm, 80cm, 105cm, and 130cm. Experimental results show that the maximum temperature decrease of 21.4 °C (i.e. from 26.5 °C down to 5.1 °C) is obtained by using 105 cm resonator length and 31 Hz sound frequency.*

Keywords: *Thermoacoustic refrigerator, traveling wave, temperature decrease, resonator length, sound frequency.*

Abstrak: Peranti pendingin termoakustik gelombang berjalan merupakan alat pendingin alternatif ramah lingkungan yang menggunakan gelombang bunyi berjalan untuk melakukan pemindahan kalor sehingga menghasilkan pendinginan. Alat pendingin termoakustik ini umumnya memiliki struktur berupa gabungan pipa resonator lurus dan pipa simpal. Pada eksperimen ini, pipa yang digunakan adalah pipa PVC (polyvinyl chloride) memiliki diameter-dalam 55 mm. Pipa resonator dan simpal berisi udara biasa sebagai gas kerja. Regenerator yang digunakan memiliki panjang 40 mm dengan diameter sekitar 53 mm dan terbuat dari lembaran-lembaran kasa kawat stainless-steel berukuran 60 mesh/inchi yang disusun rapat. Sebuah loudspeaker 10 inci serta sebuah unit penguat audio digunakan sebagai sumber bunyi. Sinyal dan frekuensi audio diberikan dan diatur dengan sebuah unit function generator. Pada penelitian ini, pengaruh frekuensi bunyi dan panjang pipa (resonator) lurus terhadap besar penurunan suhu udara dipelajari secara eksperimen dengan panjang (keliling) simpal dibuat tetap sebesar 390 cm. Frekuensi bunyi divariasikan dalam interval 26 Hz – 43 Hz, sedangkan pipa resonator memiliki variasi panjang 40 cm, 55 cm, 80 cm, 105 cm, dan 130 cm. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penurunan suhu terbesar yaitu 21,5 °C (dari 26.5 °C menjadi 5.1 °C) diperoleh dengan panjang resonator 105 cm dengan frekuensi bunyi 31 Hz.

Kata kunci: Alat pendingin termoakustik, gelombang berjalan, penurunan suhu, panjang resonator, frekuensi bunyi.

1. PENDAHULUAN

Peranti pendingin termoakustik gelombang berjalan merupakan alat pendingin alternatif yang ramah lingkungan yang menggunakan gelombang bunyi berjalan untuk melakukan pemindahan kalor untuk memperoleh pendinginan. Proses pendinginan tersebut diinduksi oleh efek termoakustik, yaitu interaksi termal antara osilasi udara di dalam pori-pori *regenerator* dan dinding-dingin pori-pori tersebut. Peranti pendingin termoakustik merupakan salah satu terobosan terbaru untuk pendingin yang ramah lingkungan. Peranti pendingin termoakustik dikatakan ramah lingkungan terutama karena menggunakan udara biasa, tidak seperti peranti pendingin konvensional yang umumnya menggunakan zat merusak lingkungan seperti freon. Alat pendingin termoakustik gelombang berjalan pada umumnya memiliki struktur berupa gabungan pipa lurus dan pipa melingkar. Konstruksinya sederhana dan hanya sedikit memiliki komponen yang bergerak serta bahan-bahan yang diperlukan untuk membuatnya mudah diperoleh. Hal ini merupakan keuntungan lain dari alat pendingin termoakustik disamping sifatnya yang ramah lingkungan.

Penelitian tentang alat pendingin termoakustik tipe gelombang berjalan dipelopori oleh Yazaki dkk (2004). Mereka mendemonstrasikan sebuah pendingin akustik yang menerapkan siklus Stirling yang dialami oleh gas yang dilalui oleh gelombang berjalan dalam sebuah tabung simpal (*loop tube*). Basem dkk (2011) melakukan rancang-bangun dan pengujian sebuah alat pendingin termoakustik tipe gelombang berjalan dengan struktur yang terdiri dari sebuah pipa resonator lurus dan sebuah pipa simpal. Dengan menggunakan *linear motor* sebagai sumber bunyi dan gas nitrogen bertekanan 0,5 MPa (sekitar 5 atm) mereka dapat menurunkan suhu hingga 232 K. Penelitian tentang alat pendingin termoakustik tipe gelombang berjalan juga telah dilakukan di Indonesia. Ikhsan (2014) telah memaparkan tentang pembuatan dan pengujian awal sebuah alat pendingin tipe gelombang berjalan. Diperoleh penurunan suhu sebesar 6,2 °C dengan menggunakan regenerator dari kawat stainless-steel 40 mesh/inci dengan daya listrik input *loudspeaker* 66 W. Selanjutnya Ikhsan dkk. (2017) mempelajari ketergantungan besar penurunan suhu terhadap jejari hidrolis regenerator yang digunakan dalam alat pendingin termoakustik gelombang berjalan. Diperoleh hasil bahwa terdapat jejari hidrolis optimum yang menghasilkan penurunan suhu terbesar. Mereka memperoleh penurunan suhu maksimum sebesar 18,7 °C (yaitu dari 28 °C turun menjadi 9,3 °C) ketika menggunakan regenerator dengan jejari hidrolis 0,10 mm dan frekuensi bunyi 30 Hz (kedalaman penetrasi termal udara sebesar 0,5 mm).

Dianantara banyak variabel yang dapat menentukan kinerja alat pendingin termoakustik adalah panjang resonator dan frekuensi bunyi. Makalah ini memaparkan tentang studi eksperimental pengaruh frekuensi bunyi dan panjang resonator terhadap besar penurunan suhu dalam alat pendingin termoakustik tipe gelombang berjalan.

2. METODE PENELITIAN

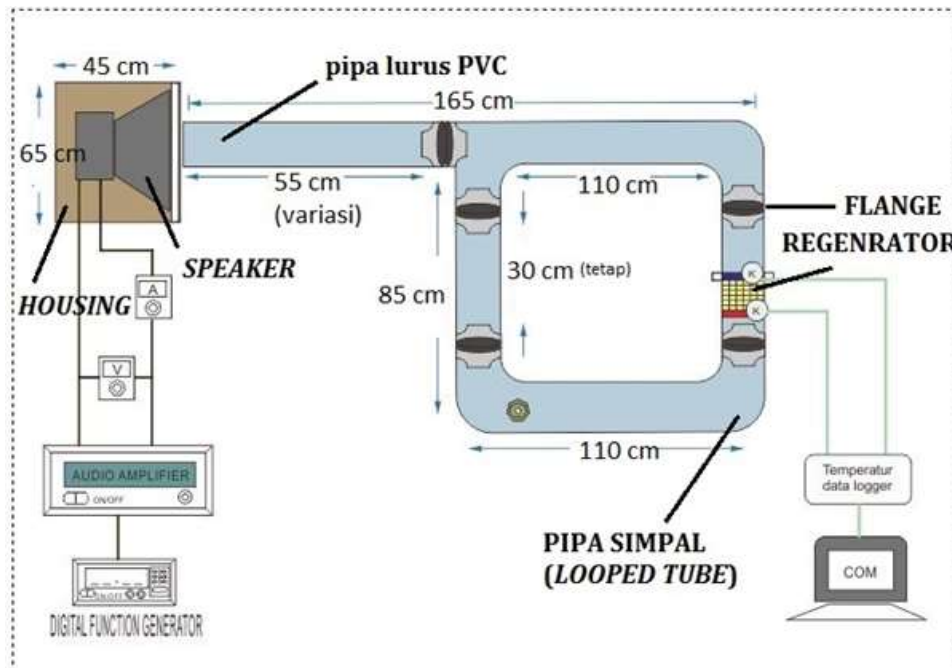
Skema susunan peralatan eksperimen ditunjukkan oleh Gambar 1. Sumber bunyi yang digunakan terdiri dari sebuah *loudspeaker* dengan diameter nominal 10 inci (impedansi 8 Ω, daya maksimum 300 W) yang berada di dalam sebuah kotak *loudspeaker*. Sumber sinyal audio (dengan frekuensi bunyi yang dapat diatur) diberikan dengan menggunakan sebuah *function generator* digital GW-Instek GFG-8250A. Sebuah unit penguat audio (*audio amplifier*) digunakan untuk memperkuat sinyal dari *function generator* sebelum diberikan kepada *loudspeaker*. Tegangan listrik dan arus listrik yang masuk ke *loudspeaker* masing-masing diukur dengan menggunakan multimeter digital. Bagian depan kotak *loudspeaker* ditutup dengan sebuah plat *acrylic* yang berlubang sedemikian sehingga pipa resonator lurus dapat dipasang pada lubang tersebut.

Pipa resonator lurus yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari pipa *PVC* (*polyvinyl chloride*) Rucika dengan diameter nominal 2 inci yang memiliki diameter-dalam sebesar 55 mm. Variasi panjang pipa resonator lurus (L_R) yang digunakan dalam eksperimen ini adalah 40 cm, 55 cm, 80 cm, 105 cm, dan 130 cm, sedangkan panjang keliling total pipa simpal (*loop tube*) adalah 390 cm.

Pipa resonator lurus dan pipa simpal berisi udara biasa bertekanan atmosfer dengan suhu rerata (suhu ruang) sekitar $T_0 = 26,5\text{ }^\circ\text{C}$ yang berfungsi sebagai gas kerja (*working gas*). Nilai kedalaman penetrasi termal gas (δ_κ) bergantung pada difusivitas termal (κ) gas dan frekuensi bunyi (frekuensi osilasi gas) (f), yaitu (Ikhsan, 2017).

$$\delta_\kappa = \sqrt{\frac{\kappa}{\pi f}} \tag{2}$$

Untuk udara biasa, besar difusivitas termalnya adalah $2,25 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$.



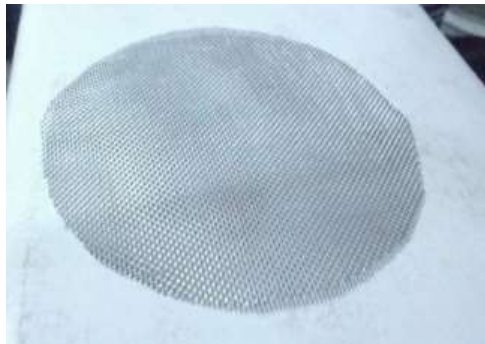
Gambar 1. Skema susunan peralatan eksperimen alat pendingin termoakustik tipe gelombang berjalan.

Sebuah *regenerator* dimasukkan ke dalam pipa simpal di dekat pojok kanan bawah dalam Gambar 1. Dalam penelitian ini, regenerator dibuat dari lembaran-lembaran kasa kawat stainless-steel berukuran 60 mesh/inci. Lembaran-lembaran tersebut dipotong bundar dengan diameter sekitar 53 mm (contohnya ditunjukkan oleh Gambar 2) dan kemudian ditumpuk secara rapat sedemikian sehingga regenerator memiliki panjang 40 mm. Jejari hidrolis (r_h) *regenerator* yang dibuat dengan kasa kawat stainless-steel berukuran 60 mesh/inci adalah 0,07 mm. Nilai ini dihitung dengan menggunakan rumus (Ikhsan dkk, 2017)

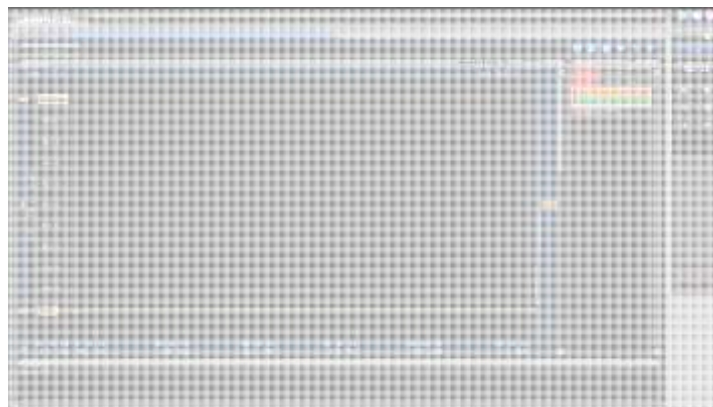
$$r_h = D \frac{\phi}{4(1 - \phi)} \tag{2}$$

dengan D adalah diameter kawat dan $\phi = 1 - n\pi D/4$ dengan n adalah nomor mesh (60 mesh/inci).

Regenerator merupakan sebuah medium berpori tempat terjadinya efek termoakustik. Dalam hal ini efek termoakustik menghasilkan pemindahan kalor dari satu sisi ke sisi lain regenerator tersebut yang dilakukan oleh gelombang bunyi. Dalam Gambar 1, pemindahan kalor terjadi dari sisi atas (disebut juga sisi dingin) ke sisi bawah (disebut juga sisi panas) regenerator, sehingga suhu udara di sisi atas regenerator akan mengalami penurunan, sedangkan suhu udara di sisi bawah regenerator akan mengalami kenaikan.



Gambar 2. Contoh selembur kawat kasa stainless-steel yang telah dipotong bundar.



Gambar 3. Antarmuka perangkat lunak Graptec GL700 pada layar komputer.

Untuk mencegah aliran baik kalor dari sisi panas ke sisi dingin melalui regenerator secara konduksi, maka kalor yang terkumpul di sisi panas perlu dibuang ke luar peranti termoakustik. Hal ini dilakukan dengan memasang sebuah alat penukar kalor (*heat exchanger*) di sisi panas regenerator. Alat penukar kalor ini dibuat dari bahan aluminium dan dialiri air dari dan ke sebuah tandon air di luar peranti termoakustik yang disirkulasikan dengan menggunakan sebuah pompa air kecil.

Suhu udara di sisi dingin (T_H) dan sisi panas (T_C) regenerator masing-masing diukur dengan menggunakan sebuah termokopel tipe-K. Data dari termokopel tersebut dikumpulkan dengan menggunakan sebuah data logger Graptec GL700 dan sebuah komputer. Tampilan antarmuka perangkat lunak data logger tersebut ditunjukkan oleh Gambar 3. Data suhu dapat ditampilkan secara langsung (*real time*) pada antarmuka tersebut.

Eksperimen dilakukan dengan mengukur suhu-suhu udara T_H dan T_C seiring dengan waktu pengoperasian alat pendingin termoakustik selama sekitar 15 menit atau lebih dari itu, yaitu sampai suhu T_C telah cenderung stabil (konstan). Hal ini dilakukan untuk berbagai variasi frekuensi bunyi dari 26 Hz sampai dengan 43 Hz, untuk tiap variasi panjang tabung resonator lurus (40 cm, 55 cm, 80 cm, 105 cm, dan 130 cm). Data suhu yang diperoleh kemudian diplot dalam grafik suhu verus waktu. Besar penurunan suhu dihitung sebagai $\Delta T_C = T_0 - T_C$ (dengan nilai T_C yang telah cenderung stabil).

Kondisi eksperimental peralatan dan beragam ukuran variabel yang digunakan dalam eksperimen ini dirangkum oleh Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi eksperimental peralatan dan ukuran variabel.

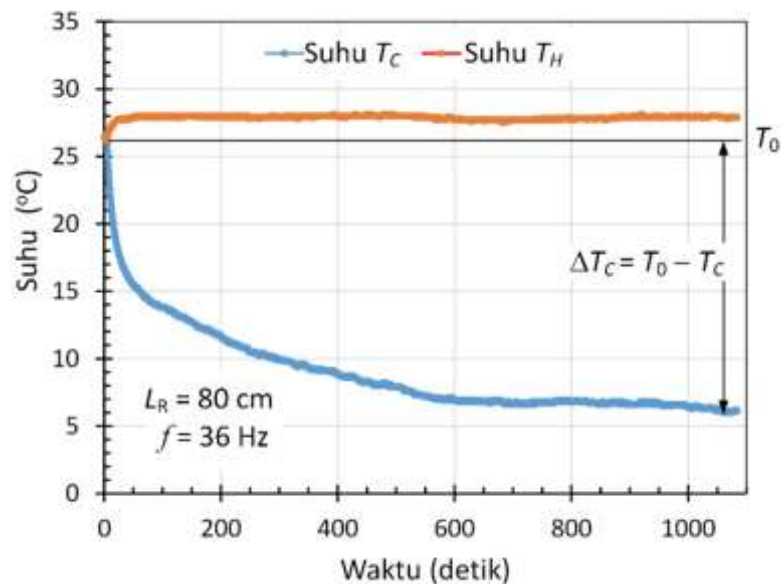
<i>Loudspeaker</i>	10 inci, impedansi 8 Ω , daya maksimum 300 W
<i>Function Generator</i>	GW-Instek GMG-8250A
<i>Data logger</i>	Graphtec GL700
Bahan resonator lurus dan pipa simpal (<i>loop tube</i>)	- Pipa PVC Rucika 2 inci - Diameter-dalam 55 mm
Bahan <i>regenerator</i>	- Kawat kasa <i>stainless-steel</i> - Nomor mesh (n): 60 mesh/inci - Diameter kawat (D): 0,14 mm
Ukuran <i>regenerator</i>	- Panjang <i>regenerator</i> : 40 mm - Diameter <i>regenerator</i> : 53 mm - Jejari hidrolis (r_h): 0,10 mm
Gas kerja	Udara bebas (1 atm, 28 °C)
Suhu ruang (T_0)	26,5 °C
Daya listrik input <i>loudspeaker</i>	80 W
Panjang keliling pipa simpal (<i>loop tube</i>)	390 cm
Variasi panjang resonator lurus	40 cm, 55 cm, 80 cm, 105 cm, 130 cm
Variasi frekuensi bunyi	26 Hz – 43 Hz
- Variasi kedalaman penetrasi termal udara (δ_κ)	0,35 mm – 0,54 mm

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

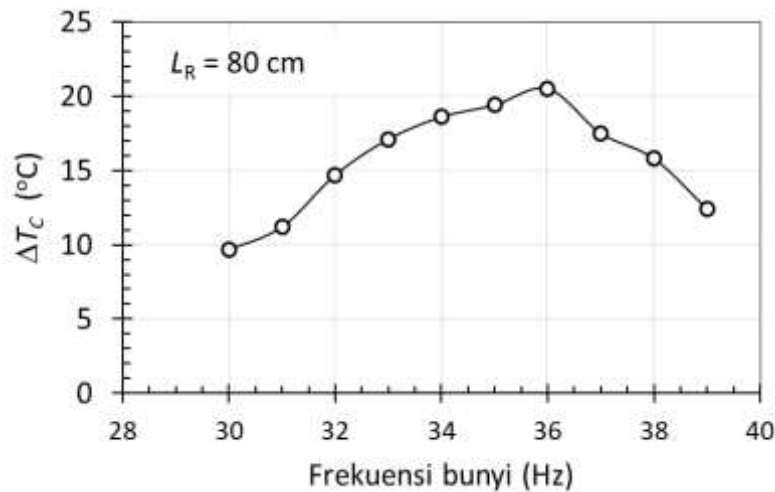
Hasil pengukuran suhu-suhu T_H dan T_C seiring dengan berjalannya waktu pengoperasian alat pendingin termoakustik ditunjukkan oleh Gambar 4. Dalam hal ini, panjang resonator (L_R) yang digunakan adalah 80 cm dan frekuensi bunyi yang digunakan adalah 36 Hz. Suhu udara di sisi panas (T_H) dan sisi dingin (T_C) *regenerator* mula-mula memiliki suhu yang sama yaitu 26,5 °C (di dalam laboratorium terdapat alat pengkondisi udara (*air conditioner*)). Tampak bahwa sesaat setelah alat pendingin dihidupkan (saat $t = 0$), suhu T_C turun dengan cepat hingga mencapai suhu 15 °C dalam waktu sekitar 50 detik. Setelah itu, penurunan suhu

tetap berlangsung namun lebih lambat dibandingkan dengan sebelumnya. Setelah alat pendingin termoakustik dioperasikan sekitar 18 menit (1080 detik), teramati bahwa suhu T_C telah sedemikian rendah mencapai $6,0\text{ }^\circ\text{C}$. Hal ini berarti suhu udara di sisi dingin regenerator telah mengalami penurunan sebesar $\Delta T_C = 20,5\text{ }^\circ\text{C}$. Alat pendingin termoakustik kemudian dimatikan ketika suhu T_C cenderung konstan dan pencatatan data dihentikan. Di sisi lain, suhu udara di sisi panas (T_H) regenerator mula-mula naik dengan cepat dalam sekitar 30 detik pertama, namun kemudian cenderung konstan di sekitar $28\text{ }^\circ\text{C}$ sampai akhir perekaman data eksperimen.

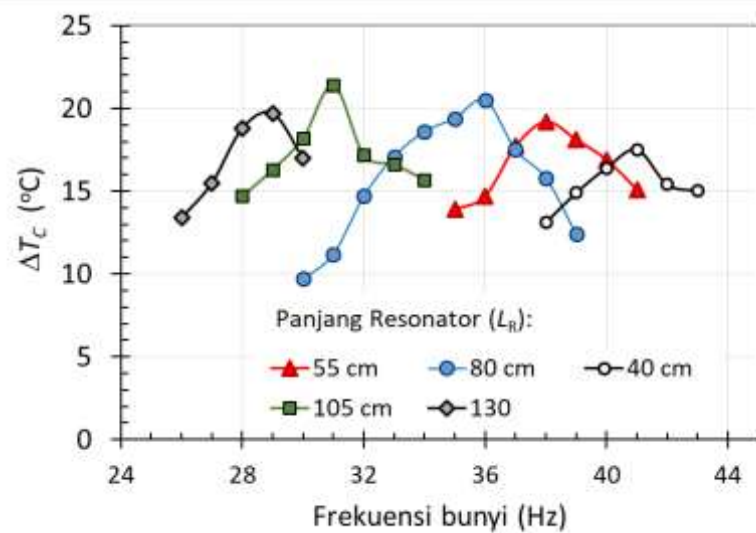
Selanjutnya, eksperimen dengan hasil seperti ditunjukkan oleh Gambar 4, dengan panjang resonator tetap sebesar $L_R = 80\text{ cm}$, dilakukan dengan variasi frekuensi bunyi dari 30 Hz sampai 39 Hz , dan hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 5. Tampak bahwa terdapat frekuensi optimum yang menghasilkan penurunan suhu maksimum. Dalam hal ini, frekuensi optimum tersebut adalah 36 Hz dan penurunan suhu maksimum yang diperoleh adalah $20,5\text{ }^\circ\text{C}$. Frekuensi optimum ini boleh jadi merupakan frekuensi resonansi atau mendekati frekuensi resonansi untuk sistem gabungan antara pipa resonator lurus dan pipa simpal.



Gambar 4. Grafik hasil pengukuran suhu-suhu T_H dan T_C seiring dengan berjalannya waktu pengoperasian alat pendingin termoakustik. Dalam hal ini, panjang resonator $L_R = 80\text{ cm}$ dan frekuensi bunyi 36 Hz . Diperoleh besar penurunan suhu maksimum sebesar $\Delta T_C = 20,5\text{ }^\circ\text{C}$.



Gambar 5. Pengaruh frekuensi bunyi (f) terhadap penurunan suhu (ΔT_c) dalam alat pendingin termoakustik dengan panjang resonator lurus $L_R = 80$ cm.



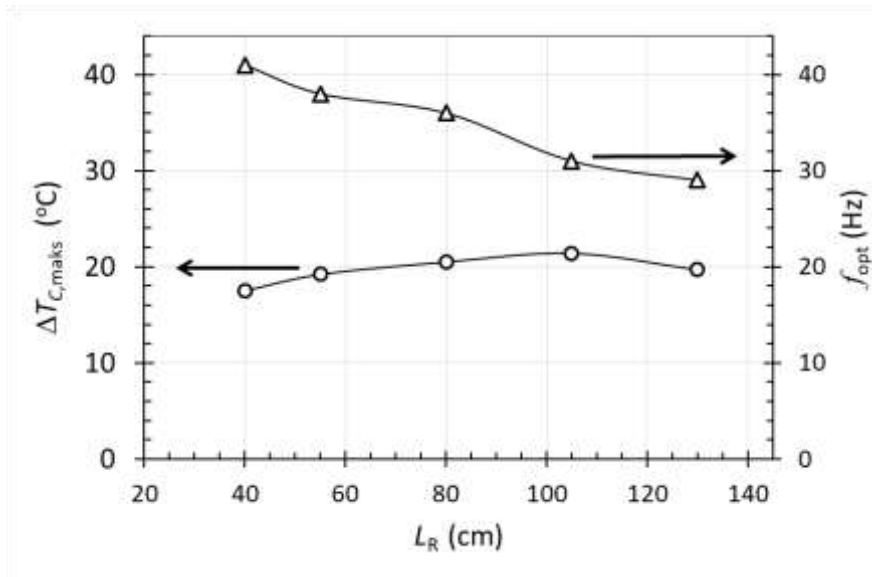
Gambar 6. Pengaruh frekuensi bunyi (f) terhadap penurunan suhu (ΔT_c) dalam alat pendingin termoakustik dengan panjang resonator lurus L_R yang bervariasi (40 cm, 55 cm, 80 cm, 105 cm, dan 130 cm).

Dalam tahap berikutnya, eksperimen dengan hasil seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 5, yaitu dengan variasi frekuensi bunyi, dilakukan untuk berbagai panjang resonator, dan hasilnya ditampilkan oleh Gambar 6. Terlihat jelas bahwa untuk masing-masing alat pendingin termoakustik dengan panjang resonator (L_R) yang berbeda-beda terdapat frekuensi optimum (f_{opt}) masing-masing yang menghasilkan penurunan suhu maksimum ($\Delta T_{c,max}$) yang dapat dicapai. Hal ini dirangkum dalam Tabel 2 dan ditampilkan dalam Gambar 7. Jadi, terlihat dengan jelas bahwa frekuensi optimum semakin kecil dengan bertambahnya panjang resonator. Hal ini semakin memperkuat kemungkinan bahwa frekuensi optimum tersebut terkait erat dengan frekuensi resonansi sistem gabungan antara pipa resonator lurus dan pipa

simpal. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkonfirmasi kemungkinan ini. Selain itu, diperoleh juga pengetahuan panjang resonator lurus cukup berpengaruh terhadap besar penurunan suhu maksimum yang dapat dicapai oleh alat pendingin termoakustik ini. Ditemukan bahwa $\Delta T_{C,maks}$ terbesar, yaitu 21,4 °C, diperoleh dengan menggunakan resonator lurus sepanjang 105 cm dan frekuensi bunyi sebesar 31 Hz.

Tabel 2. Variasi panjang resonator lurus (L_R) beserta frekuensi optimumnya (f_{opt}) dan penurunan suhu maksimum ($\Delta T_{C,maks}$) yang diperoleh.

L_R (cm)	f_{opt} (Hz)	$\Delta T_{C,maks}$ (°C)
40	41	17,5
55	38	19,2
80	36	20,5
105	31	21,4
130	29	19,7



Gambar 7. Ketergantungan frekuensi optimum (f_{opt}) dan penurunan suhu maksimum ($\Delta T_{C,maks}$) pada panjang resonator lurus (L_R).

4. KESIMPULAN

Pengaruh frekuensi bunyi dalam interval 26 Hz – 43 Hz dan panjang resonator lurus dengan variasi 40 cm, 55 cm, 80 cm, 105 cm, dan 130 cm terhadap besar penurunan suhu maksimum dalam alat pendingin termoakustik tipe gelombang berjalan telah dipelajari secara eksperimen. Ditemukan bahwa terdapat frekuensi optimum yang memberikan penurunan suhu maksimum untuk tiap variasi panjang resonator. Frekuensi optimum semakin kecil apabila panjang resonator bertambah besar. Selain itu, diperoleh penurunan suhu terbesar, yaitu 21,4 °C (dari 26,5 °C menjadi 5,1 °C), dengan menggunakan resonator lurus sepanjang 105 cm dan frekuensi bunyi sebesar 31 Hz.

5. SARAN (*FUTURE WORK*)

Untuk melengkapi pengetahuan yang diperoleh dari hasil penelitian ini, penelitian selanjutnya yang dapat dilakukan diantaranya adalah menambah variasi panjang resonator dengan panjang yang lebih besar daripada panjang resonator yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, studi pengaruh variasi panjang resonator terhadap besar penurunan suhu dapat pula dikombinasikan dengan variasi panjang keliling pipa simpal (*loop tube*) dalam rangka optimasi, sehingga diharapkan kombinasi optimal antara panjang resonator lurus dan panjang keliling pipa simpal dapat diperoleh dan suhu udara dapat diturunkan lebih rendah lagi

DAFTAR PUSTAKA

- Basem, M.M., Ueda, Y., Akisawa, A., (2011). Design and construction of a traveling wave thermoacoustic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 34, 1125–1131.
- Ikhsan Setiawan (2014). Pembuatan piranti pendingin termoakustik gelombang berjalan, *Prosiding Seminar Nasional Fisika Terapan (SNAFT) IV, Universitas Airlangga, Surabaya, 15 November 2014*.
- Ikhsan Setiawan, Muhammad N. M. Fadly, Agung B. S. Utomo (2017). Experimental demonstration of the dependence of temperature decrease on the hydraulic radius of regenerator in a traveling-wave thermoacoustic refrigerator. *Journal of Physics: Conf. Series* 820,012012, doi:10.1088/1742-6596/820/1/012012.
- Yazaki, T., Biwa, T., Tominaga, A. (2004). A pistonless Stirling cooler. *Applied Physics Letters*, 80(1), 157–159.