

# Pengembangan Awal Alat Peraga Mesin Pendingin Termoaakustik Sebagai Sarana Edukasi

Kevin Yapri<sup>1,a)</sup>, Sofyan Fajar Hidayat<sup>1,b)</sup>, dan I Made Astina<sup>1,c)</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Teknik Pendingin,  
Kelompok Keahlian Konversi Energi,  
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>a)</sup> yapriKevin@yahoo.com (corresponding author)

<sup>b)</sup> sofyan.fajarhidayat@gmail.com

<sup>c)</sup> astina@ftmd.itb.ac.id

## Abstrak

Mesin pendingin termoaakustik adalah jenis mesin yang memanfaatkan fenomena akustik untuk menciptakan efek pendinginan yang timbul dari interaksi termodinamika antara partikel gas yang berisolasi dengan dinding padatan sehingga gradien temperatur dihasilkan. Perbedaan mendasar mesin pendingin termoaakustik dibandingkan dengan mesin pendingin konvensional adalah tidak menggunakan kompresor mekanikal maupun termal dan tidak ada aliran refrigeran, tetapi gas refrigeran bergetar serta kerja kompresor digantikan oleh penggerak akustik (*loudspeaker*). Mesin pendingin termoaakustik ini terdiri dari empat komponen dasar, yaitu penggerak akustik, tabung resonator, komponen penukar panas, dan stack. Kinerja mesin pendingin ini dapat dihitung dengan mengukur perbedaan temperatur gas refrigeran antara sisi dingin dengan sisi panas pada stack yang digunakan. Berdasarkan hasil pengujian dari pengembangan awal ini, mesin pendingin termoaakustik gelombang tegak yang dibuat mampu menghasilkan beda temperatur sebesar 25,99°C, dengan kenaikan temperatur sisi panas sebesar 18,97°C dan penurunan temperatur sisi dingin sebesar 7,02°C. Hasil tersebut diperoleh dengan menggunakan tabung resonator sepanjang 100 cm, stack dengan panjang 10 cm, dan frekuensi suara 100 Hz. Alat ini kemudian akan dikembangkan lebih lanjut agar dapat digunakan sebagai alat peraga untuk meningkatkan ketertarikan dan pemahaman pelajar mengenai pendinginan termoaakustik.

*Kata-kata kunci: alat peraga, mesin pendingin, gelombang tegak, termoaakustik*

## PENDAHULUAN

Fenomena pendinginan termoaakustik menggunakan prinsip yang hampir sama dengan fenomena pendinginan pada siklus kompresi uap, yaitu refrigeran yang dikompresi menyebabkan temperaturnya naik dan lebih tinggi dari lingkungan sehingga panasnya dapat terbuang ke lingkungannya dan refrigeran yang diekspansi menyebabkan temperaturnya turun dan lebih rendah dari lingkungan sehingga panas dari lingkungan dapat diserap oleh refrigeran. Pada pendinginan termoaakustik, kerja kompresi dan ekspansi refrigeran dilakukan oleh penggerak akustik (*loudspeaker*). Hal ini bisa terjadi karena suara pada dasarnya beresilasi dari tekanan di udara tersebut. Osilasi tekanan tersebut berupa kompresi dan ekspansi. Refrigeran yang digunakan pada mesin pendingin termoaakustik berada dalam fasa gas dan tidak mengalami perubahan fasa dalam pengoperasiannya. Hal inilah yang menyebabkan penggerak suara dapat digunakan sebagai pembuat osilasi tekanan. Osilasi tekanan akan menghasilkan osilasi temperatur refrigeran yang digunakan (berdasarkan persamaan gas ideal  $PV = nRT$ ), yang kemudian osilasi temperatur refrigeran ini dimanfaatkan untuk memindahkan kalor dari satu tempat ke tempat yang lain. Penjelasan detail mengenai prinsip kerja mesin pendingin termoaakustik dapat dilihat pada makalah [4]. Mesin pendingin termoaakustik gelombang tegak umumnya memiliki empat komponen utama yaitu penggerak akustik, tabung resonator, stack,

dan komponen penukar panas. *Stack* merupakan susunan pelat-pelat yang memiliki lebar celah tertentu sebagai medium perambatan panas. Ilustrasi sederhana alat pendingin termoakustik dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi komponen mesin pendingin termoakustik

Dalam sistem pendingin termoakustik, *stack* merupakan komponen terpenting yang menentukan kinerja dari sistem tersebut. Oleh karena itu, dalam makalah ini, optimisasi desain dari *stack* dalam penentuan letaknya serta lebar celahnya akan dilakukan. Optimisasi ini dilakukan cara coba mencoba selama percobaan.

## PERTIMBANGAN DESAIN

### Pemilihan Fluida Kerja

Fluida kerja harus memiliki nilai GWP (*Global Warming Potential*) dan ODP (*Ozone Depletion Potential*) yang sekecil mungkin menandakan bahwa fluida kerja aman digunakan dan tidak berdampak pada perusakan ozon maupun pemanasan global. Selain itu, nilai bilangan Prandtl yang kecil menandakan bahwa fluida kerja memiliki kemampuan memindahkan panas yang cukup baik [7]. Berdasarkan kriteria yang telah disebutkan, maka udara dipilih sebagai fluida kerja.

### Optimasi Stack

#### *Pemilihan Material Stack*

Material *stack* harus memiliki nilai konduktivitas termal  $K_s$  yang kecil dan nilai panas spesifik  $c_s$  yang lebih tinggi dari panas jenis spesifik fluida kerja untuk meminimalisir kerugian kinerja dari mesin pendingin. Dengan mempertimbangkan nilai konduktivitas termal dan panas spesifik material *stack*, Mylar Polyester dengan tebal 0,1 mm dipilih sebagai material *stack*. Pemilihan ini juga didasarkan pada pertimbangan ketersediaannya di pasaran.

#### *Geometri Stack*

Mengacu pada hasil percobaan yang telah dilakukan oleh Tijani [4], *stack* dengan susunan pelat paralel memiliki kinerja yang paling baik dibandingkan dengan bentuk geometri lainnya. Profil *stack* pelat paralel kemudian dipilih dan digunakan dalam penelitian ini.

#### *Dimensi Stack*

Pada proses optimasi dimensi *stack*, terdapat empat variabel penting yaitu posisi titik tengah *stack*  $x_s$  yang diukur dari ujung tertutup, lebar *stack*  $L_s$ , lebar celah antar pelat *stack*  $2y_0$ , dan tebal pelat *stack*  $2l$ . Untuk mencari nilai lebar celah  $2y_0$ , kedalaman penetrasi termal  $\delta_k$  perlu dicari terlebih dahulu menggunakan persamaan (1). Lebar celah pelat optimum berkisar  $2\delta_k$  sampai  $2\delta_k$  [4]. Berdasarkan nilai  $\delta_k$  yang diperoleh, lebar celah optimum  $2y_0$  berada di kisaran 0,57 mm sampai 1,15 mm. Panjang *stack*  $L_s$  dipilih nilai 10 cm untuk mempermudah proses pembuatan.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\rho_m c_p \omega}}$$

### Mesin Pendingin Termoakustik

Dengan menggunakan pertimbangan-pertimbangan di atas, maka mesin pendingin termoakustik dikembangkan dengan bentuk dan ukuran seperti yang terlihat pada gambar 2. Bahan utama tabung resonatornya adalah pipa PVC. Untuk mesin yang dibuat, *loudspeaker* diletakkan di bagian paling bawah, dan panjang tabung resonator yang dibuat adalah satu meter.



Gambar 2. Mesin pendingin termoakustik yang dibangun

### HASIL EKSPERIMEN

Adapun parameter-parameter pengujian ada yang dibuat konstan dan ada yang diubah. Parameter yang dibuat konstan beserta nilainya dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan numerik dengan metoda matriks transfer

Parameter Pengujian	Nilai/Deskripsi
Temperatur rata-rata $T_m$	300 K
Tekanan rata-rata $p_m$	1 atm
Panjang tabung resonator	1 m
Material <i>stack</i>	<i>Mylar Polyester</i>
Tebal pelat <i>stack</i> $2l$	0,1 mm
Geometri <i>stack</i>	paralel
Panjang <i>stack</i> $L_s$	10 cm

Berikut ini adalah parameter-parameter pengujian yang divariasikan dalam penelitian ini:

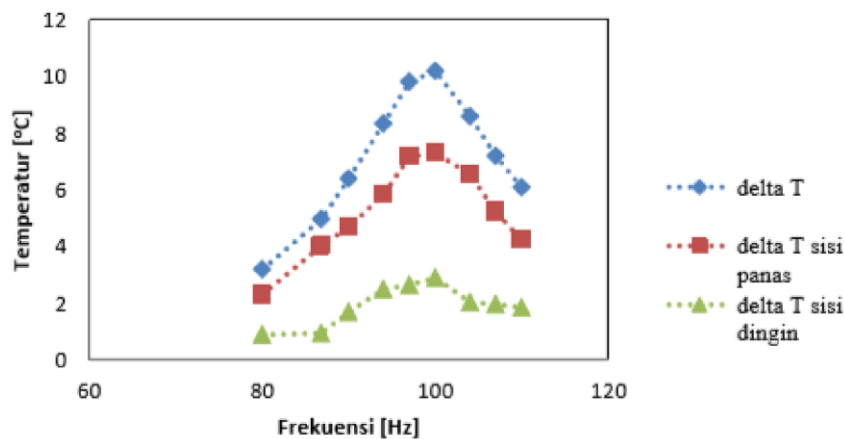
Frekuensi operasi

Posisi *stack*  $x_s$

Celah *stack*  $2y_0$

#### Pengujian 1: Mengubah Frekuensi Operasi

Berdasarkan persamaan hubungan  $f = a/(4L)$ , frekuensi resonansi bernilai 86,8 Hz. Apabila mesin pendingin dioperasikan pada frekuensi resonansinya, mesin akan bekerja pada kinerja maksimumnya. Untuk itulah pengecekan diperlukan untuk mengetahui apakah benar frekuensi resonansi mesin pendingin termoakustik yang telah dibuat bernilai 86,8 Hz merupakan kondisi yang optimum. Percobaan dilakukan dengan mengubah frekuensi operasi dengan nilai  $x_s$  bernilai 30 cm dan lebar celah *stack*  $2y_0$  bernilai 0,8 mm. Hasil percobaan 1 ditunjukkan pada gambar 3.

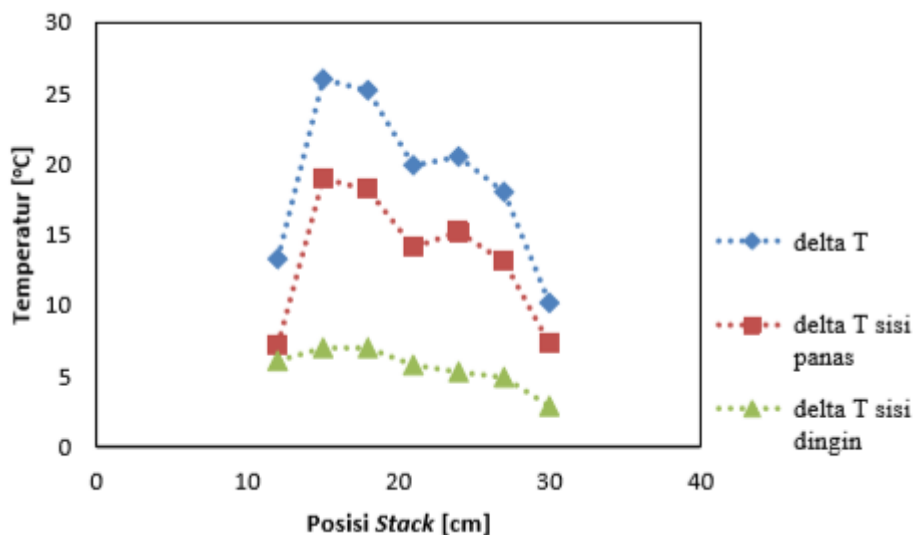


Gambar 3. Kinerja mesin pendingin pada frekuensi operasi yang berbeda

Gambar 3 menunjukkan bahwa mesin pendingin termoakustik yang dibangun memiliki kinerja terbaik pada frekuensi operasi 100 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi 100 Hz merupakan frekuensi resonansi dari mesin pendingin termoakustik yang dikembangkan ini, bukan 86,8 Hz. Gambar 3 juga menunjukkan bahwa semakin jauh frekuensi operasi dari 100 Hz maka kinerja mesin pendingin juga akan semakin menurun. Pengujian 1 ini juga menunjukkan bahwa *stack* akan meningkatkan frekuensi resonansi. Persamaan (2) merupakan persamaan untuk mencari frekuensi resonansi untuk tabung tanpa *stack*.

**Pengujian 2: Mengubah posisi *stack*  $x_s$**

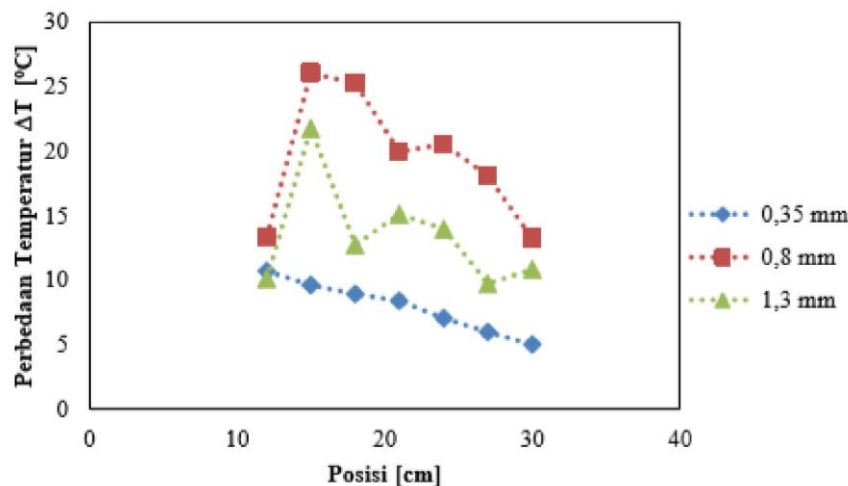
Pada percobaan ini, frekuensi operasi 100 Hz (berdasarkan hasil dari percobaan 1) digunakan. Posisi *stack* (dari ujung tertutup) diubah dari 12 cm sampai 30 cm dengan interval 3 cm. Lebar celah *stack*  $2\gamma_0$  yang digunakan adalah 0,8 mm. Hasil dari percobaan 2 dapat dilihat pada gambar 4. Hasil dari pengujian 2 ini menunjukkan bahwa posisi *stack* juga dapat mempengaruhi kinerja mesin pendingin termoakustik. Dari pengujian ini, jarak *stack* paling optimal yang diperoleh adalah 15 cm dari ujung tertutup. Kondisi ini akan menghasilkan beda temperatur sisi panas dan sisi dingin  $\Delta T$  sebesar 25,99°C, kenaikan temperatur sisi panas  $\Delta T_h$  sebesar 18,97°C, serta penurunan temperatur sisi dingin  $\Delta T_c$  sebesar 7,02°C.



Gambar 4. Kinerja mesin pendingin pada posisi *stack* yang berbeda

### Pengujian 3: Mengubah lebar celah $stack$ $2y_0$

Percobaan 3 ini dilakukan untuk mengecek lebar celah  $stack$  optimum pada mesin pendingin yang telah dibuat. Berdasarkan analisis, lebar celah  $stack$  optimum terletak pada rentang 0,57 mm sampai 1,15 mm. Namun karena frekuensi resonansi sistem berubah (dari 86,8 Hz menjadi 100 Hz), maka lebar celah  $stack$  optimum perlu diuji untuk mengecek apakah terjadi pergeseran nilai lebar celah  $stack$  optimum. Hasil pengujian yang diperoleh diperlihatkan pada gambar 5. Pengujian dilakukan pada frekuensi operasi 100 Hz. Dari pengujian ini, kesimpulan dapat ditarik bahwa lebar celah  $stack$  0,8 mm memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan lebar celah 0,35 mm dan 1,3 mm. Hal ini menunjukkan bahwa lebar celah  $stack$  optimum masih berada dalam rentang 0,57 mm sampai 1,15 mm.



Gambar 5. Perbedaan temperatur  $\Delta T$  untuk lebar celah  $stack$  yang berbeda

## KESIMPULAN

Mesin pendingin termoakustik tipe gelombang tegak telah berhasil dibuat dan mampu menghasilkan beda temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 25,99°C, peningkatan temperatur sisi panas 18,97°C, dan penurunan temperatur sisi dingin sebesar 7,02°C. Apabila ingin dikembangkan menjadi alat peraga, mesin pendingin ini perlu dikembangkan lebih lanjut sehingga pengambilan data dapat dilakukan dengan lebih mudah dan tabung resonator menggunakan bahan yang transparan sehingga pelajar dapat mengamati fenomena yang terjadi di dalamnya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini.

## REFERENSI

1. M.J. Moran dan H.N. Saphiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Edisi 7, John Wiley & Son Inc., New York (2012)
2. M.J. Molina dan F.S. Rowland, *Stratospheric Sink for Chloroflouromethane: Chlorine Atom-catalyzed Destruction of Ozone*, *Nature*, **249(5460)**:810-812 (1974)
3. Na Pan, Chao Shen, dan Shuangfeng Wang, *Experimental Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Thermoacoustic Core*, *Experimental Thermal and Fluid Physics*, **44(2013)**:219-226 (2012)

4. M.E.H. Tijani, *Loudspeaker-Driven Thermo-Acoustic Refrigeration*, Thesis, Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherland (2001)
5. Halliday dan R. Resnick, *Fundamentals of Physics*, Edisi 9, John Willey & Son Inc., New Yowk (2011)
6. G. Swift, *Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators*, Edisi 5, Los Alamos National Laboratory, New Mexico (2001)
7. Masoud Akavanbazaz, *Design, Analysis, Testing, and Development of a Thermoacoustic System for Refrigeration Applications*, Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Quebec, Canada (2004)
8. <http://publications.shecco.com/publications/view/71>, Diakses pada 30 Januari 2017.