

STUDI EKSPERIMENTAL PENDINGIN TERMOAKUSTIK

¹FA. Rusdi Sambada, ²I Gusti Ketut Puja

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sanata Dharma Yogyakarta

Kampus III Paingan Maguwoharjo Depok Sleman Yogyakarta

¹sambada@engineer.com, ²ketut@staff.usd.ac.id

Abstrak

Studi eksperimental pendingin termoakustik ini bertujuan untuk mengetahui koefisien unjuk kerja (COP) dan beda temperatur yang dapat dihasilkan model pendingin termoakustik dengan menggunakan speaker sebagai sumber akustik. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tabung kaca berukuran panjang 23 cm dan diameter 2,1 cm sebagai resonator serta film fotografi berukuran 35 mm digunakan sebagai bahan regenerator. Frekuensi speaker divariasikan dengan menggunakan function generator antara 385 Hz sampai 674 Hz. Jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator divariasikan antara 0,5 sampai 8 cm. Daya masukan speaker divariasikan antara 1 sampai 10 W. Temperatur sisi dingin dan sisi panas regenerator yang terjadi diukur dengan menggunakan termokopel.

Hasil penelitian menunjukkan COP terbaik sebesar 10,7 ($COP_R=0,152$) dihasilkan pada daya speaker 4,5 W, frekuensi 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator sebesar 4 cm. Beda temperatur terbaik sebesar $6,8^{\circ}C$ dihasilkan pada daya speaker 10,1 W, frekuensi 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator sebesar 4 cm.

Kata kunci : termoakustik, COP, beda temperatur

Pendahuluan

Kebutuhan sistim pendingin dewasa ini semakin meningkat sejalan dengan perkembangan teknologi dan pertumbuhan penduduk. Sistim pendingin diperlukan untuk mendinginkan produk elektronik, obat-obatan, bahan kimia, bahan makanan dan sebagainya. Sistim pendingin yang ada umumnya masih menggunakan bahan pendingin yang dapat merusak lingkungan seperti penipisan lapisan ozon dan pemanasan global. Disamping itu sistim pendingin yang ada umumnya masih menggunakan sumber energi listrik. Penelitian untuk mencari bahan pendingin alternatif yang tidak merusak lingkungan terutama yang dapat menggunakan sumber energi alam sebagai penggerakannya semakin banyak dilakukan. Beberapa sistim pendingin alternatif yang banyak diteliti misalnya sistim absorpsi, adsorpsi, stirling dan termoakustik.

Sistim pendingin termoakustik merupakan salah satu sistim pendingin alternatif yang cukup menjanjikan dimasa datang karena konstruksinya sederhana, kehandalan yang cukup tinggi, tidak menggunakan bahan pendingin yang dapat merusak lingkungan serta dapat menggunakan sumber energi alternatif misalnya energi surya sebagai penggerakannya.

Makalah ini membahas hasil eksperimen awal tentang pendingin termoakustik menggunakan bahan yang mudah didapat di lokal untuk mengetahui unjuk kerja dan beda temperatur yang dapat dihasilkan. Hasil eksperimen ini diharapkan dapat dikembangkan ke penelitian yang lebih baik untuk menghasilkan disain pendingin termoakustik yang sesuai dengan potensi dan kondisi lokal yang ada.

Penelitian pendingin termoakustik menggunakan speaker dengan daya 40 W, regenerator film fotografi dan gas kerja udara dapat menghasilkan beda temperatur $15,5^{\circ}C$ (Russell, 2002). Penelitian pendingin termoakustik menggunakan daya 10 W, bahan regenerator stainless steel dan gas kerja helium menghasilkan beda temperatur $30^{\circ}C$ dan COP 0,334 (Nohotomi, 1999). Penelitian pendingin termoakustik menggunakan tabung melingkar dan regenerator bertingkat dapat menurunkan temperatur sebesar $22^{\circ}C$ (Sakamoto, 2003). Penelitian dengan menggunakan regenerator sepanjang 3 mm, tekanan awal 15 atm menghasilkan daya pendinginan $0,5 W/cm^2$ (Gendy, 2006).

Metodologi

Eksperimen ini menggunakan speaker sebagai sumber akustik dengan impedansi sebesar 8 ohm. Gas kerja dalam tabung kaca adalah udara dengan tekanan awal sama dengan tekanan udara ruang. Tabung kaca berukuran panjang 23 cm dan diameter 2,1 cm digunakan sebagai resonator dan film

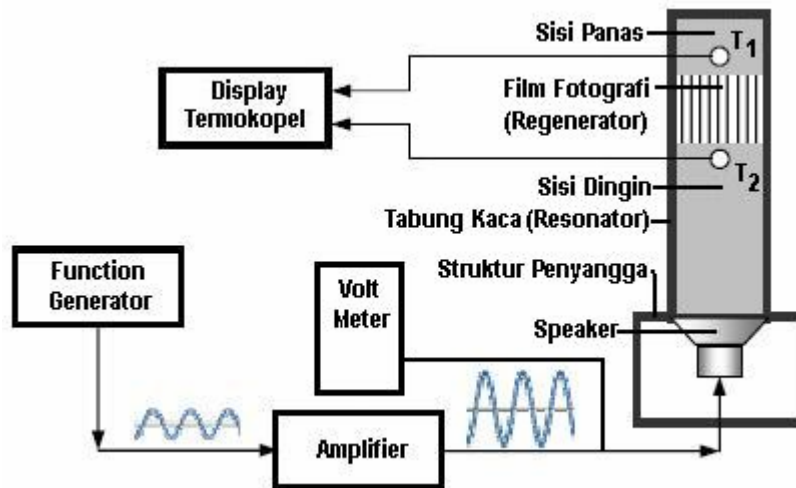
fotografi berukuran 35 mm digunakan sebagai bahan regenerator. Temperatur sisi panas (T_1) dan sisi dingin (T_2) regenerator yang terjadi diukur dengan menggunakan termokopel. Skema alat eksperimen dapat dilihat pada gambar 1. Pada eksperimen ini dilakukan beberapa variasi parameter sebagai berikut :

Variasi daya masukkan speaker

Pada eksperimen variasi daya masukkan speaker, frekuensi diatur tetap sebesar 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung juga tetap sebesar 4 cm. Daya masukkan speaker divariasikan sebesar 1,1 W; 4,5 W dan 10,1 W dengan mengatur volume suara dan mengukur tegangan keluaran amplifier pada kondisi terpasang. Data temperatur sisi dingin dan sisi panas regenerator dicatat tiap 0,5 menit selama 8 menit.

Variasi frekuensi speaker

Pada eksperimen variasi frekuensi speaker daya masukkan speaker diatur tetap sebesar 4,5 W dan jarak regenerator dari ujung atas tabung juga diatur tetap sebesar 4 cm. Frekuensi speaker divariasikan menggunakan function generator sebesar 385 Hz, 481,1 Hz; 574,8 Hz dan 673,7 Hz. Data temperatur sisi dingin dan sisi panas regenerator dicatat tiap 0,5 menit selama 8 menit.



Gambar 1. Skema alat eksperimen

Variasi jarak regenerator dari ujung atas tabung

Pada eksperimen variasi jarak regenerator dari ujung atas tabung daya masukkan speaker diatur tetap sebesar 4,5 W dan frekuensi speaker diatur tetap sebesar 385 Hz. Jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator divariasikan dari 0,5 cm; 1,0 cm; 1,5 cm; 2,0 cm; 4,0 cm; 6,0 cm dan 8,0 cm. Data temperatur sisi dingin dan sisi panas regenerator dicatat tiap 0,5 menit selama 8 menit.

Dari data yang diperoleh dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut :

Daya speaker P_{in} (watt) dihitung dengan persamaan :

$$P_{in} = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

Daya akustik \dot{W} (watt) dihitung dengan persamaan :

$$\dot{W} = \frac{1}{4} \cdot \Pi \cdot \delta_K \cdot \Delta x \cdot \frac{T_m \cdot \beta^2 \cdot \omega}{\rho \cdot C_p} \cdot p_e^2 \cdot (\Gamma - 1) \quad (2)$$

Daya pendinginan \dot{Q} (watt) dihitung dengan persamaan :

$$\dot{Q} = -\frac{1}{4} \cdot \Pi \cdot \delta_K \cdot T_m \cdot \beta \cdot p_e \cdot u \cdot (\Gamma - 1) \quad (3)$$

Perimeter regenerator dalam arah tegak lurus aliran kalor Π (m) dihitung dengan persamaan :

$$\Pi = \frac{A_R}{\delta_K} \quad (4)$$

Kedalaman penetrasi termal fluida gas δ_K (m) dihitung dengan persamaan :

$$\delta_K = \sqrt{\frac{2.k}{\omega.\rho.C_p}} \quad (5)$$

Temperatur rata-rata sisi panas dan sisi dingin T_m (K) dihitung dengan persamaan :

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (6)$$

Koefisien ekspansi termal udara β (1/K) dihitung dengan persamaan :

$$\beta = \frac{1}{T_m} \quad (7)$$

Frekuensi angular ω (rad/detik) dihitung dengan persamaan :

$$\omega = 2.\pi.f \quad (8)$$

Tekanan akustik efektif P_e (Pa) dihitung dengan persamaan :

$$P_e = \frac{P}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

Rasio gradien temperatur Γ dihitung dengan persamaan :

$$\Gamma = \frac{|dT/dx|}{|dT/dx|_{\text{kritis}}} \quad (10)$$

Gradien temperatur dT/dx (K/m) dihitung dengan persamaan :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (11)$$

Gradien temperatur maksimum atau gradien kritis $|dT/dx|_{\text{kritis}}$ (K/m) dihitung dengan persamaan :

$$\left| \frac{dT}{dx} \right|_{\text{kritis}} = (\gamma - 1).K.T_a \quad (12)$$

Jumlah gelombang K (rad/m) adalah perbandingan rapat gelombang terhadap jarak dan dihitung dengan persamaan :

$$K = \frac{\omega}{c} \quad (13)$$

Kecepatan gelombang, u_1 (m/detik) dihitung dengan persamaan :

$$u = \frac{P_e}{\rho.c} \quad (14)$$

Koefisien unjuk kerja COP dihitung dengan persamaan :

$$COP = \left(\frac{T_m}{DT} \right) \Gamma \quad (15)$$

Koefisien unjuk kerja siklus Carnot COP_C dihitung dengan persamaan :

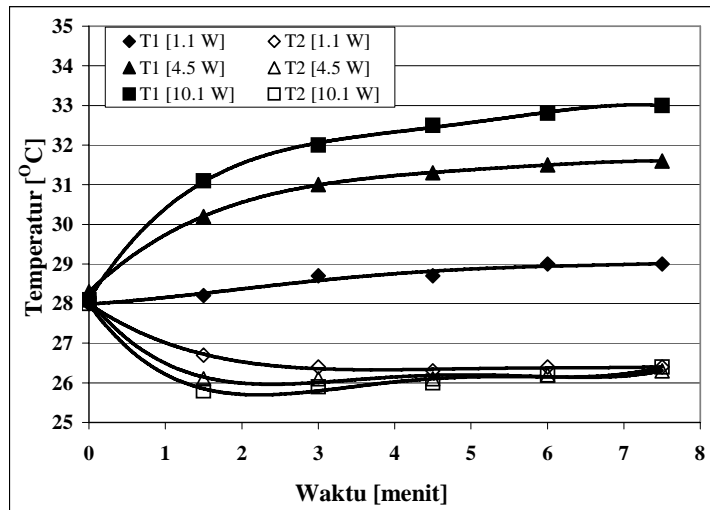
$$COP_C = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (16)$$

Koefisien unjuk kerja akustik relatif COP_R dihitung dengan persamaan :

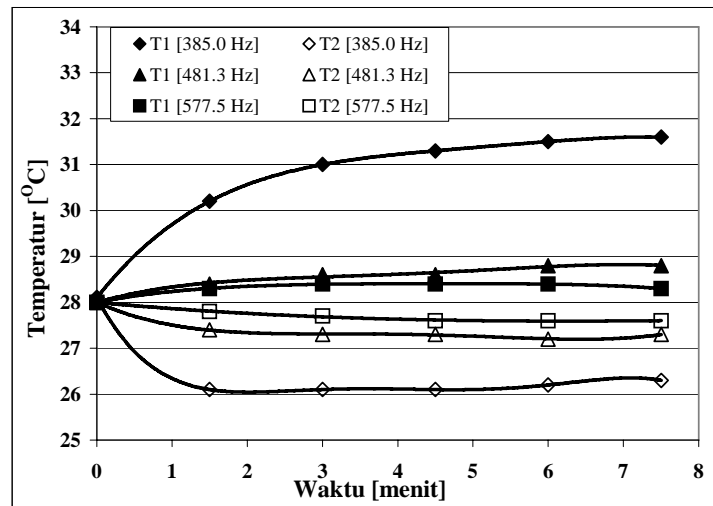
$$COP_R = \frac{COP}{COP_C} \quad (17)$$

Hasil dan Pembahasan

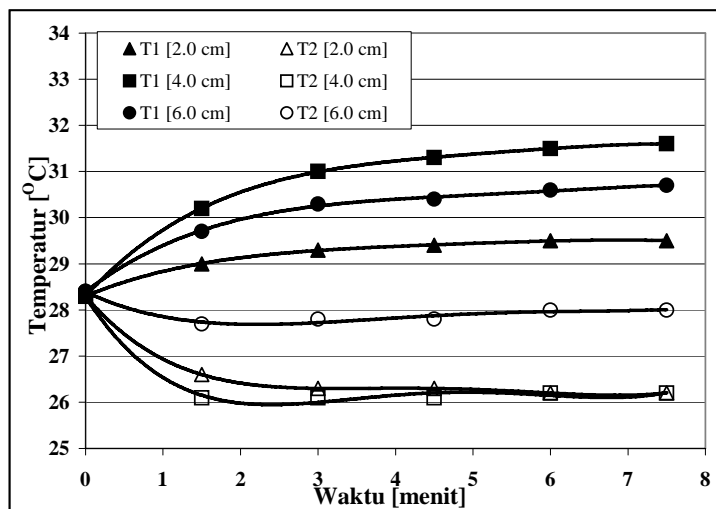
Untuk memudahkan analisa maka hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada gambar 2 sampai gambar 8 berikut :



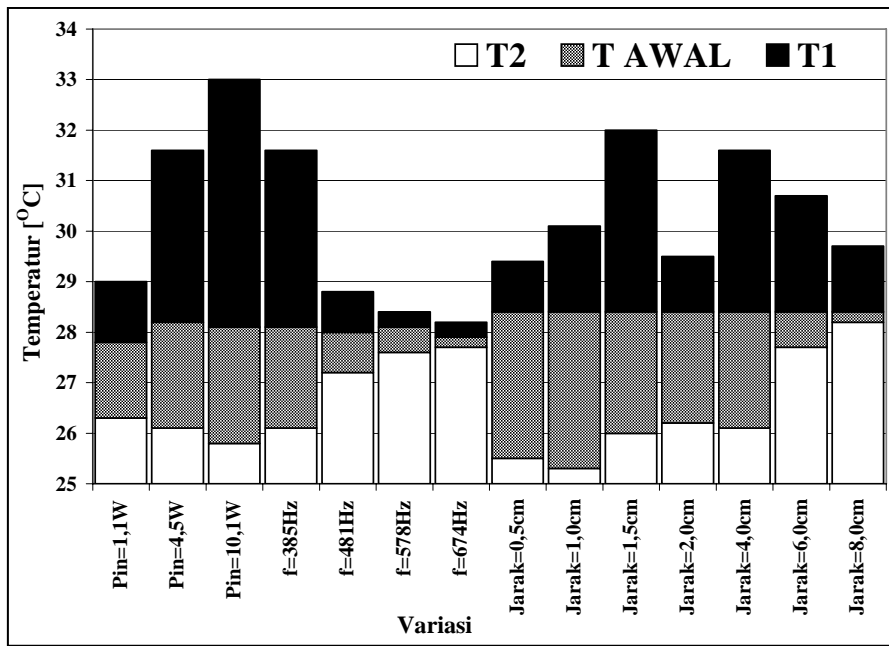
Gambar 2. Hubungan waktu dengan temperatur sisi panas (T_1) dan temperatur sisi dingin (T_2) pada variasi daya speaker



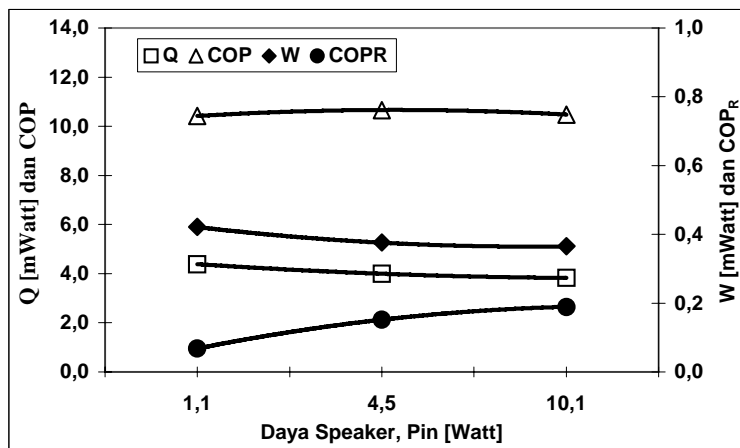
Gambar 3. Hubungan waktu dengan temperatur sisi panas (T_1) dan temperatur sisi dingin (T_2) pada variasi frekuensi



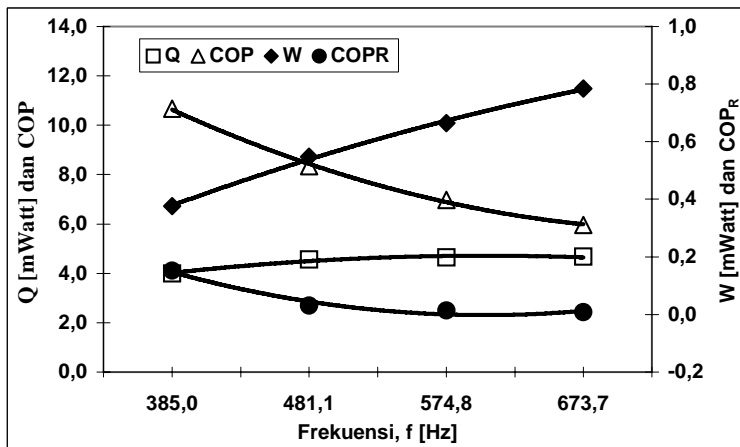
Gambar 4. Hubungan waktu dengan temperatur sisi panas (T_1) dan temperatur sisi dingin (T_2) pada variasi jarak regenerator



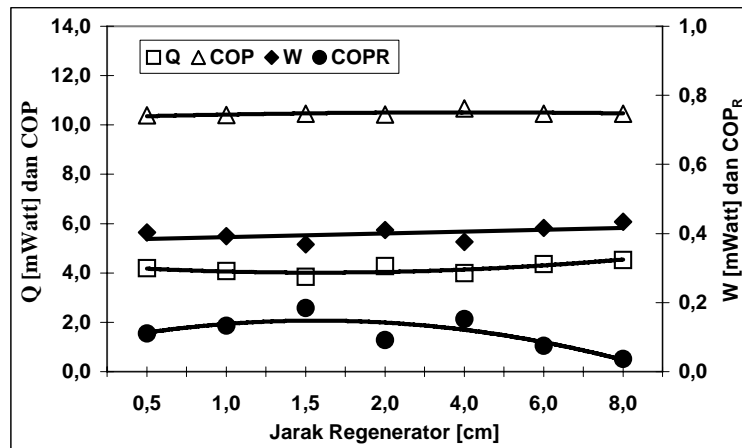
Gambar 5. Hubungan variasi parameter dengan temperatur sisi dingin (T_2) minimum, temperatur awal (T_{AWAL}) dan temperatur sisi panas (T_1) maksimum



Gambar 6. Hubungan daya speaker dengan daya pendinginan (Q), daya akustik (W), COP dan COP relatif (COP_R)



Gambar 7. Hubungan frekuensi dengan daya pendinginan (Q), daya akustik (W), COP dan COP relatif (COP_R)



Gambar 8. Hubungan jarak regenerator dengan daya pendinginan (Q), daya akustik (W), COP dan COP relatif (COP_R)

Dari grafik hubungan daya speaker dengan temperatur dari waktu ke waktu (gambar 2) terlihat temperatur sisi panas (T_1) akan semakin besar dan temperatur sisi dingin (T_2) akan semakin rendah dengan membesarnya daya speaker. Beda temperatur yang terjadi juga semakin besar dengan membesarnya daya speaker (gambar 5). Dengan makin besarnya daya speaker terlihat kenaikan temperatur sisi panas lebih besar dibandingkan dengan penurunan temperatur sisi dingin, bahkan temperatur sisi dingin cenderung menjadi sama setelah beberapa waktu. Hal ini disebabkan karena pada eksperimen ini pendinginan sisi panas hanya menggunakan udara secara alami sedangkan tabung resonator terbuat dari kaca yang mempunyai nilai konduktivitas termal yang rendah. Pendinginan sisi panas yang kurang baik menyebabkan kalor tidak dapat keluar dari sistem dan mempengaruhi sisi dingin. Daya akustik (W) dan daya pendinginan (Q) cenderung turun dengan naiknya daya speaker (gambar 6), hal ini disebabkan harga koefisien ekspansi termal udara (β) cenderung turun. Turunnya harga koefisien ekspansi termal ini juga disebabkan karena pendinginan sisi panas yang kurang baik. Perbandingan daya pendinginan (Q) dengan daya akustik (W) adalah koefisien unjuk kerja (COP) alat, pada variasi daya speaker ini harga COP mencapai harga maksimum pada daya speaker 4,5 W yakni sebesar 10,7. Harga COP relatif yang merupakan perbandingan COP alat dengan COP Carnot cenderung makin besar dengan bertambahnya daya speaker, hal ini disebabkan harga COP Carnot yang semakin kecil. COP Carnot yang semakin kecil disebabkan karena beda temperatur (ΔT) yang semakin besar sedangkan penurunan temperatur sisi dingin (T_2) tidak terlalu besar.

Dari grafik hubungan frekuensi dengan temperatur dari waktu ke waktu (gambar 3) terlihat temperatur sisi panas (T_1) akan semakin kecil dan temperatur sisi dingin (T_2) akan semakin besar dengan membesarnya frekuensi. Beda temperatur yang terjadi juga semakin kecil dengan membesarnya frekuensi (gambar 5). Hal ini disebabkan kedalaman penetrasi termal udara pada regenerator tidak sesuai lagi. Dengan makin besarnya frekuensi kedalaman penetrasi termal udara pada regenerator harus semakin kecil. Pada eksperimen ini kedalaman penetrasi termal udara yang digunakan tetap sehingga regenerator tidak dapat mengambil kalor dari udara pada sisi panas dan tidak dapat memberikan kalor ke udara pada sisi dingin. Karena regenerator tidak dapat berfungsi dengan baik maka temperatur sisi panas (T_1) dan temperatur sisi dingin (T_2) cenderung semakin sama. Daya akustik (W) cenderung naik dengan naiknya frekuensi (gambar 7), hal ini disebabkan karena daya akustik berbanding lurus dengan frekuensi. Daya pendinginan (Q) relatif tetap dengan naiknya frekuensi. Harga COP alat cenderung turun karena daya akustik (W) makin besar sedangkan daya pendinginan (Q) relatif tetap. Harga COP relatif cenderung turun dengan naiknya frekuensi hal ini disebabkan selain harga COP alat yang turun juga karena COP Carnot makin besar dengan makin besarnya frekuensi. Harga COP Carnot yang semakin besar disebabkan karena beda temperatur yang terjadi semakin kecil dan temperatur sisi dingin yang semakin besar.

Dari grafik hubungan jarak regenerator dengan temperatur dari waktu ke waktu (gambar 4 dan gambar 5) terlihat temperatur sisi panas (T_1) dapat mencapai nilai terbesar pada jarak regenerator 1,5

cm dari bagian atas tabung resonator dan temperatur sisi dingin (T_2) dapat mencapai nilai terendah pada jarak regenerator 1,0 cm. Secara keseluruhan beda temperatur terbesar didapatkan pada jarak regenerator 1,5 cm. Gelombang akustik di dalam tabung resonator menyebabkan fluktuasi tekanan udara sepanjang tabung resonator. Pada posisi dengan tekanan udara yang besar seolah-olah udara mengalami kompresi sehingga pada posisi ini temperatur udara naik dan memberikan panasnya pada regenerator (sisi panas). Pada posisi dengan tekanan udara yang rendah seolah-olah udara mengalami ekspansi sehingga pada posisi ini temperatur udara turun dan mengambil panas dari regenerator (sisi dingin). Regenerator harus diletakkan pada posisi dimana satu ujung regenerator berada pada posisi sisi panas sedangkan ujung yang lain berada pada posisi sisi dingin. Bahan regenerator juga harus terbuat dari bahan yang mempunyai harga konduktivitas termal yang tidak terlalu besar sehingga panas tidak mudah merambat dari sisi panas ke sisi dingin. Jika penempatan regenerator tidak tepat (pada eksperimen ini pada posisi 6 cm dan 8 cm) maka dapat terjadi sisi dingin tidak dapat mencapai temperatur rendah atau sisi panas tidak dapat mencapai temperatur tinggi atau keduanya (sisi dingin tidak dapat mencapai temperatur rendah dan sisi panas tidak dapat mencapai temperatur tinggi). Daya akustik (W), daya pendinginan (Q) dan harga COP dan COP relatif pada variasi jarak regenerator ini relatif tetap (gambar 8).

Kesimpulan

1. COP terbaik yang diperoleh adalah 10,7 ($COP_R=0,152$). Kondisi ini didapat pada daya speaker 4,5 W, frekuensi 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator sebesar 4 cm.
2. Beda temperatur terbaik adalah $6,8^{\circ}\text{C}$. Kondisi ini didapat pada daya speaker 10,1 W, frekuensi 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator sebesar 4 cm.
3. COP relatif terbaik yang diperoleh adalah 0,2. Kondisi ini didapat pada daya speaker 10,1 W, frekuensi 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator sebesar 4 cm.
4. Temperatur sisi dingin terbaik yang diperoleh adalah $25,3^{\circ}\text{C}$. Kondisi ini didapat pada daya speaker 4,5 W, frekuensi 385 Hz dan jarak regenerator dari ujung atas tabung resonator 1 cm.
5. Sistem pendinginan sisi panas, kedalaman penetrasi termal dan posisi regenerator merupakan parameter penting dalam optimasi pendingin termoakustik.
6. Karena konstruksi yang sederhana dan tidak menggunakan bahan pendingin yang berbahaya pendingin termoakustik merupakan alternatif pendingin yang dapat digunakan dimasa datang untuk pendingin bahan makanan, obat, elektronik, kendaraan, proses-proses industri dan sebagainya.

Notasi

A_R	: luas penampang tabung resonator (m^2)
c	: kecepatan suara (m/detik), $c = 343$ m/detik di udara
COP	: koefisien unjuk kerja
COP_C	: koefisien unjuk kerja Carnot
COP_R	: koefisien unjuk kerja akustik relatif
C_p	: panas jenis udara ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
DT	: beda temperatur sisi panas dan sisi dingin = $T_1 - T_2$ (K)
dT/dx	: gradien temperatur (K/m)
$ dT/dx _{\text{kritis}}$: gradien temperatur maksimum atau gradien kritis (K/m)
f	: frekuensi (Hz)
k	: konduktivitas termal udara ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
K	: jumlah gelombang (rad/m)
P	: tekanan maksimum (Pa)
P_e	: tekanan akustik efektif (Pa)
P_{in}	: daya speaker (watt)
Q	: daya pendinginan (watt)
R	: impedansi speaker (ohm)
T_1	: temperatur sisi panas (K)
T_2	: temperatur sisi dingin (K)

T_a	: temperatur sekitar (K)
T_m	: temperatur rata-rata sisi panas dan sisi dingin (K)
u	: kecepatan gelombang, (m/detik)
V	: tegangan masukan speaker (volt)
W	: daya akustik (watt)
β	: koefisien ekspansi termal udara (1/K)
δ_K	: kedalaman penetrasi termal udara (m)
Δx	: panjang regenerator (m)
γ	: perbandingan panas jenis udara
ρ	: rapat massa udara (kg/m^3)
ω	: frekuensi angular (rad/detik)
Π	: perimeter regenerator dalam arah tegak lurus aliran kalor (m)
Γ	: rasio gradien temperatur

Daftar Pustaka

1. Gendy H.E, Kwon, Y.S, Lyard, L. and Symko, O.G, 2006, Optimization of Miniature Thermoacoustic Coolers, *Echoes*, Vol. 16, No. 3
2. Nohtomi, M., Katsuta, M, 1999, Experimental Study And Analysis On Components Of A Thermoacoustic Refrigerator And A Thermoacoustic Prime Mover, *Proceedings of the 5th ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, March 15-19, 1999, San Diego, California
3. Russell, D.A., Weibulla. P, 2002, Tabletop Thermoacoustic Refrigerator for Demonstrations, *American. Journal of Physics*, 70 ~121
4. Sakamoto, S., Tsujimoto, T., and Watanabe, Y., 2003, The Experimental Studies Of Thermoacoustic Cooler, *WCU 2003*, September 7-10, 2003, Paris