

Analisis Kinerja Mesin Pendingin Termoakustik Performance Analysis of Thermoacoustic Refrigerator

Oleh: Heldinawati Hanifa Haq¹, Agus Purwanto²

¹Mahasiswa Program Studi Fisika FMIPA UNY

²Dosen Program Studi Fisika FMIPA UNY

heldinawati_hanifa@yahoo.co.id

Abstrak

Telah dilakukan penelitian untuk menyelidiki osilasi suhu pada gelombang stasioner, mengukur frekuensi resonansi pipa (resonator termoakustik) dan menguji sistem termoakustik. Metode yang digunakan untuk menyelidiki osilasi suhu pada gelombang stasioner adalah mengamati dan mengukur suhu di setiap titik dengan menggunakan sensor LM 35DZ bersamaan dengan mengukur amplitudo pada tiap titik menggunakan *mic condensor*. Metode yang digunakan untuk mengukur frekuensi resonansi adalah meletakkan *mic condensor* pada posisi $(10,00 \pm 0,05)$ cm di ujung pipa kemudian memvariasi frekuensi pada *loudspeaker*. Metode yang digunakan untuk menguji sistem termoakustik adalah meletakkan sensor suhu LM 35DZ pada tandon panas dan tandon dingin kemudian sistem dijalankan selama 100 menit. Hasil dari penyelidikan osilasi suhu pada gelombang stasioner menunjukkan bahwa terdapat beda suhu di posisi perut dan simpul gelombang stasioner yakni $0,2^{\circ}\text{C}$ pada kondisi sistem tidak terisolasi (tanpa selubung *styrofoam*) dan $1,2^{\circ}\text{C}$ untuk kondisi sistem terisolasi (dengan selubung *styrofoam*). Hasil dari pengukuran frekuensi resonansi pipa menunjukkan bahwa pipa memiliki frekuensi resonansi sebesar 392,8408 Hz dengan letak perut gelombang stasioner berada pada posisi $(19,00 \pm 0,05)$ cm. Hasil dari pengujian sistem termoakustik pada suhu ruangan 29°C menunjukkan bahwa beda suhu antara tandon panas dan tandon dingin setelah sistem dijalankan selama 100 menit adalah $7,22^{\circ}\text{C}$.

Kata Kunci : gelombang stasioner, osilasi suhu, frekuensi resonansi, tandon panas dan dingin, termoakustik.

Abstract

The study has been done to investigate the temperature oscillation in stationary wave, to measure the resonance frequency of the pipe, and to test thermoacoustic system. The method used to investigate the temperature oscillation was by measuring the temperature at several points of resonator using LM 35DZ sensor and measuring the amplitude using mic condensor. The method used to measure the resonance frequency was by placing a condensor mic at position (10.00 ± 0.05) cm from the end of the pipe and then varying the frequency of loudspeaker. The method used to test the thermoacoustic system was by placing the temperature sensor LM35DZ at the hot and cold reservoirs then the system was run for 100 minutes. The results of investigation showed that there was a temperature difference of 0.2°C between the antinodal and nodal of points when the system was not isolated (without styrofoam) and 1.3°C for the isolated system (with styrofoam). The results of measurement of resonance frequency showed that the pipe (thermoacoustic resonator) with length (80.00 ± 0.05) cm had a resonance frequency of 392.8408 Hz and the antinodal at the position (19.00 ± 0.05) cm measured from the end of pipe. The results of the testing thermoacoustic system at room temperature (29°C) showed that the temperature difference between the hot and cold reservoirs after the system was run for 100 minutes was 7.22°C .

Keywords : stationary wave, temperature oscillation, resonance frequency, hot and cold reservoir, thermoacoustics.

Pendahuluan

Pada proses pendinginannya, AC memerlukan gas *refrigeran* yang berfungsi sebagai media pendingin. Media ini mampu menyerap sekaligus melepas kalor. *Refrigeran* yang biasa digunakan dalam industri AC adalah *CFC* (*Chlorofluorocarbons*) yang terbentuk dari atom klorin (*Cl-chlorine*), fluorin (*F-fluorin*), dan karbon (*C-carbon*) (Bo Nordell, 2003:306). Saat *CFC* telah menyebar ke lapisan ozon dan terkena sinar UV, energi UV memecah atom klorin dan molekul *CFC*. Klorin memecah molekul ozon dan membentuk klorin monoksida dan dua atom oksigen yang terlepas ke atmosfer. Atom oksigen tersebut kemudian memecah molekul klorin monoksida dan menghasilkan oksigen dan klorin sebagai radikal bebas; siklus perusakan ozon oleh klorin dimulai lagi. Perlahan kandungan ozon (O_3) di atmosfer akan semakin berkurang lalu menipis di tempat tertentu sampai akhirnya lapisan ozon berlubang, sehingga fungsinya sebagai filter radiasi matahari akan hilang.

Karena begitu banyaknya resiko penggunaan mesin pendingin ini, perlu adanya mesin pendingin lain yang lebih ramah lingkungan. Salah satu alternatif yang bisa dipertimbangkan adalah menggunakan pendingin termoaustik.

Termoaustik bukanlah sebuah bidang yang tergolong baru, penelitian secara eksperimen serta teori telah dilakukan lebih dari dua abad yang lalu sampai saat ini. Seperti namanya, termoaustik menggabungkan dua bidang yakni termodinamika dan akustik untuk menggambarkan hubungan suhu dan bunyi.

Penjelasan mengenai termoaustik dimulai oleh Rayleigh pada tahun 1887 dalam bukunya *The Theory of Sound*. Prinsip termoaustik dibangun dari asumsi bahwa pada gelombang bunyi yang merambat bukan hanya osilasi tekanan saja namun juga osilasi panas (*heat*). Dalam percakapan sehari-hari sebenarnya ada juga osilasi panas, namun tidak terdeteksi karena hanya menghasilkan panas sebesar $10^{-4}^{\circ}C$ (Girgin, 2012:30). Adapun komponen utama termoaustik adalah gas sebagai medium perambatan bunyi, *stack*, tabung resonansi, dan sumber bunyi. Beberapa penelitian telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dan mendapatkan hasil yang cukup memuaskan seperti penelitian yang dilakukan oleh M.E.H Tijani dkk, telah mampu mencapai temperatur pada sisi dingin hingga $-65^{\circ}C$ (Tijani, 2001:8).

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan November 2014 sampai dengan bulan Mei 2015, bertempat di Laboratorium Getaran dan Gelombang, Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY.

Instrumen Penelitian dan Program Analisis

Instrumen penelitian pada sistem sumber bunyi antara lain: 1 buah *loudspeaker* jenis *midrange* dengan impedansi 8Ω dan daya 120 watt dan *box* setebal $(1,00 \pm 0,05)$ cm, 1 buah *Audio Frequency Generator* (AFG), dan 1 buah *amplifier* merek Uchida.

Instrumen penelitian pada sistem deteksi bunyi yakni 1 buah *mic condensor* dan 1 buah Laptop. Instrumen penelitian pada

sistem termoakustik yakni 1 buah pipa PVC dengan panjang $(80,00 \pm 0,05)$ cm dan diameter $(3,00 \pm 0,05)$ cm, 1 lembar kertas mika, malam, dan benang *nylon*. Sementara instrumen penelitian pada sistem deteksi suhu antara lain: 3 buah sensor suhu LM 35DZ, 1 buah *power supply*, 2 buah multimeter digital, dan beberapa kabel penghubung.

Program analisis yang digunakan pada penelitian ini adalah *SpectraPLUS*, *Microsoft Excell*, *Origin 5.0*, dan *Matlab R2010a*.

Teknik Pengambilan Data (Prosedur)

Prosedur pengambilan data diawali dengan perancangan sistem termoakustik, kemudian selanjutnya masuk ketahap pengujian alat. Tahap pengujian ini diawali dengan menyelidiki keberadaan osilasi suhu pada gelombang stasioner yang menjalar di sepanjang resonator. Tahapan ini diawali dengan mengkalibrasi sensor suhu LM 35DZ pada *range* 20°C - 90°C ; *range* ini dipilih karena sistem termoakustik bekerja pada suhu ruangan 27°C . Setelah sensor dikalibrasi dan diperoleh nilai gradien grafik atau kenaikan tegangan per 1°C , kemudian penyelidikan dilakukan dengan meletakkan sensor suhu dan sensor bunyi (*mic condensor*) bersamaan pada setiap titik resonator dengan *range* jarak dimulai dari 0 cm sampai dengan 60 cm. Hasil dari penyelidikan ini akan menunjukkan keselarasan antara nilai amplitudo dengan suhu pada titik yang sama.

Tahap pengujian yang kedua adalah mengukur frekuensi resonansi resonator.

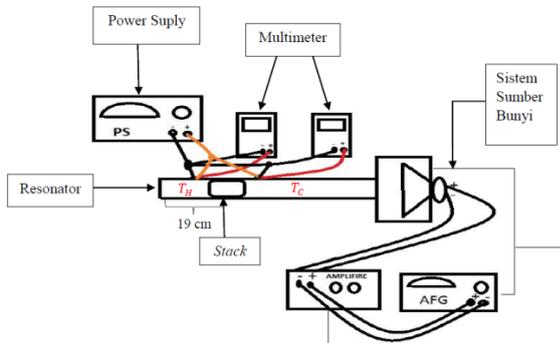
Pengukuran dilakukan dengan meletakkan *mic condensor* pada posisi $(10,00 \pm 0,05)$ cm dari ujung pipa kemudian memvariasi nilai frekuensi terukur pada *SpectraPLUS* dengan *range* 350 Hz sampai dengan 420 Hz. Sampel dari pengukuran ini akan menunjukkan puncak dengan amplitudo tertinggi yang mengindikasikan frekuensi resonansi. Setelah frekuensi resonansi diperoleh, selanjutnya mengukur letak perut gelombang stasioner sebagai posisi peletakan *stack*. Pengukuran dilakukan dengan memvariasi jarak *mic condensor* dengan *range* data dimulai 0 cm sampai dengan 40 cm. Frekuensi yang digunakan adalah frekuensi resonansi.

Tahap selanjutnya adalah pengujian sistem termoakustik yang diawali dengan merancang pembuatan *stack*. *Stack* merupakan mesin dari sistem termoakustik. Di *stack* inilah transfer panas terjadi sehingga menghasilkan beda suhu di kedua tandon. Dipilih *stack* dengan bahan yang memiliki konduktivitas termal bahan rendah. Dipilih *stack* berbahan mika dengan benang *nylon* disusun setiap panjang $(0,50 \pm 0,05)$ cm sepanjang mika. Benang *nylon* dipilih dengan tebal $(0,500 \pm 0,001)$ mm. Tebal ini ditentukan sesuai dengan *penetration depth* sebagai parameter desain *stack*. *Penetration depth* ini merupakan ketentuan jarak terbaik antar lapisan *stack*. Diperoleh *penetration depth* pada frekuensi resonansi resonator adalah 0,500 mm, sehingga benang *nylon* dipilih dengan tebal ini sebagai pembatas lapisan antar *stack* (mika) seperti pada Gambar 1. Kemudian tahapan ini berlanjut dengan menguji sistem termoakustik. Pengujian sistem termoakustik dilakukan dengan

meletakkan dua sensor LM 35DZ di dalam resonator, masing-masing diletakkan di tandon dingin dan tandon panas. Frekuensi yang digunakan untuk menggerakkan sumber bunyi adalah frekuensi resonansi. Di antara kedua tandon diletakkan *stack*. *Stack* diletakkan di posisi perut kemudian sumber dinyalakan selama 100 menit dengan perolehan satu nilai suhu di setiap satu menit. Ragkaian alat pengujian sistem termoakustik seperti pada Gambar 2.



Gambar 1. Desain *stack* mika



Gambar 2. Rangkaian pengujian sistem termoakustik

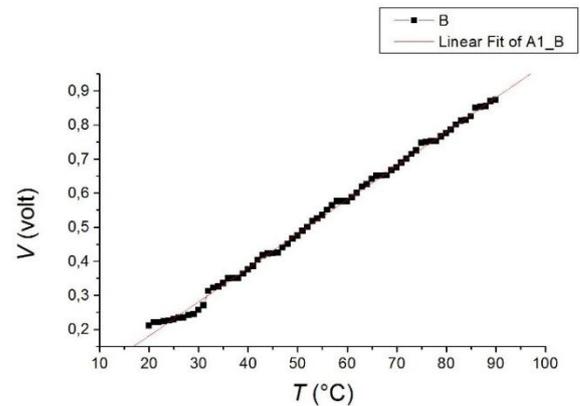
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Grafik dan analisis osilasi suhu pada gelombang stasioner dari bunyi yang merambat sepanjang resonator

Berdasarkan percobaan pembuktian adanya osilasi suhu pada tabung resonator, diperoleh adanya beda suhu antara perut dengan simpul gelombang. Percobaan ini dilakukan dengan dua kondisi, yakni tabung resonator tanpa selubung *styrofoam* (sistem

tidak terisolasi) dan tabung resonator dengan selubung *styrofoam* (sistem terisolasi).

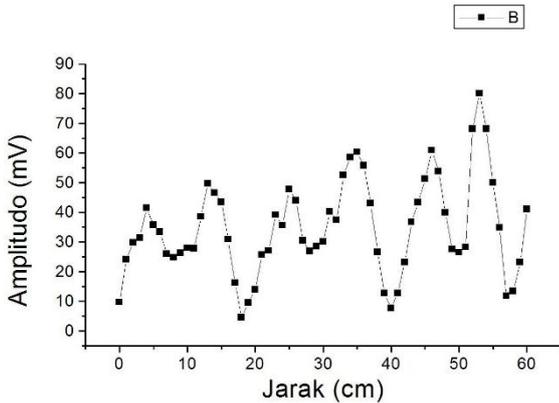
1. Pengujian sensor suhu LM 35DZ



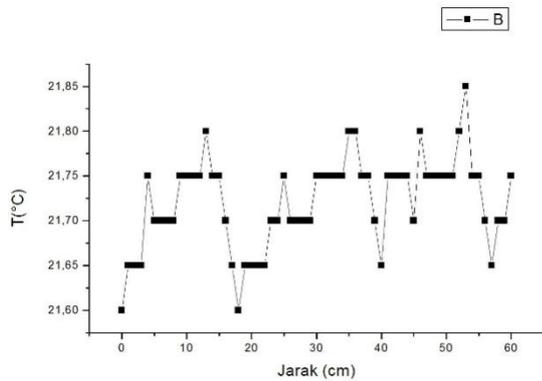
Gambar 3. Grafik linearitas tegangan keluaran LM 35DZ terhadap suhu
 Dari grafik tersebut diperoleh nilai A adalah (-18 ± 4) mV dan nilai B adalah $(9,98 \pm 0,06)$ mV/°C. B merupakan nilai gradien dari persamaan garis lurus hubungan tegangan dengan suhu. Dapat disimpulkan bahwa tegangan keluaran LM 35DZ akan naik sebesar 9,98 mV untuk setiap kenaikan suhu 1°C. Sensor suhu LM 35DZ kemudian digunakan untuk mengukur suhu pada posisi simpul dan perut gelombang stasioner. Pada kondisi awal perancangan sistem termoakustik, resonator terbuat dari pipa PVC yang kemudian dihubungkan oleh sumber bunyi. Pada kondisi awal ini telah berhasil diukur suhu pada posisi perut dan simpul gelombang stasioner. Kemudian diketahui selisih suhu pada posisi perut dan simpul hanya sebesar 0,2°C. Kemudian penelitian selanjutnya dilakukan dengan menyelubungi resonator termoakustik tersebut dengan bahan yang dapat menjaga suhu di dalam resonator yakni *styrofoam*. Atas dasar inilah kemudian

penyelidikan ini dilakukan dengan dua kondisi. Berikut hasil perbandingan antara kondisi awal (sistem tidak terisolasi) dengan kondisi yang kedua (sistem terisolasi).

2. Sistem tidak terisolasi (tanpa selubung styrofoam)

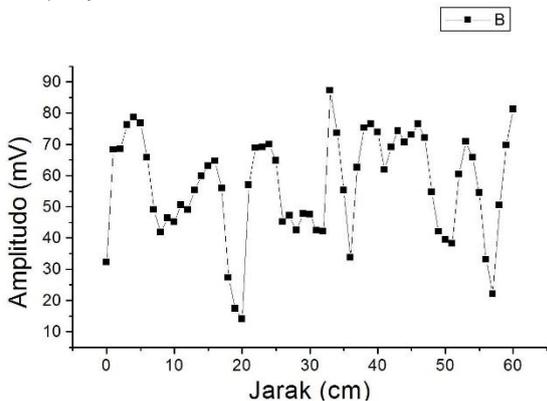


Gambar 4. Grafik hubungan amplitudo dengan jarak pada sistem tidak terisolasi

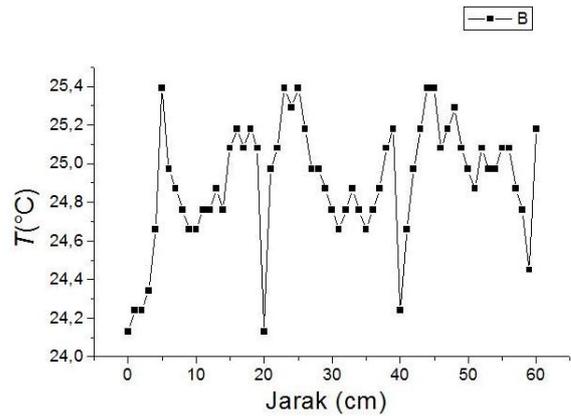


Gambar 5. Grafik hubungan suhu dengan jarak pada sistem tidak terisolasi

3. Sistem terisolasi (dengan selubung styrofoam)



Gambar 6. Grafik hubungan amplitudo dengan jarak pada sistem terisolasi



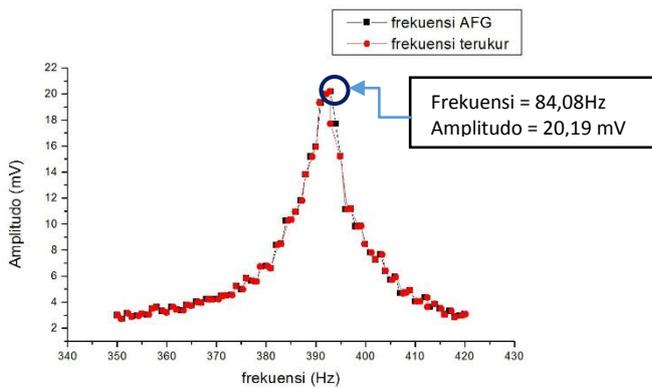
Gambar 7. Grafik hubungan suhu dengan jarak pada sistem terisolasi

Pada grafik hubungan antara jarak dengan suhu terlihat selisih suhu antara perut dan simpul. Pada sistem tidak terisolasi selisih suhu antara perut dan simpul adalah 0,2°C, sedangkan pada sistem terisolasi diperoleh selisih suhu 1,3°C. Hal ini mengindikasikan jika pada sistem tidak terisolasi ada pengaruh suhu luar lingkungan yang masuk ke dalam sistem. Kemudian pada sistem terisolasi karena sistem tertutup, suhu di dalam sistem menjadi lebih panas dan kerja dari sistem terjaga sehingga menghasilkan selisih suhu yang lebih besar dibandingkan dengan sistem tidak terisolasi. Tabung resonator pada sistem ini diselubungi *styrofoam* dengan diameter dalam sama dengan diameter luar pipa dan dengan tebal ($2,50 \pm 0,05$) cm, sehingga sulit untuk lingkungan luar dari sistem mempengaruhi sistem yang ada di dalam pipa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa selain osilasi tekanan pada gelombang bunyi yang merambat, osilasi suhu juga terjadi di dalamnya.

Pada saat volume partikel terkompres maka pada titik tersebut tekanan udara maksimum karena partikel lebih rapat.

Partikel-partikel yang volumenya terkompres mengakibatkan partikel bertumbukan lebih sering dan lebih banyak energi yang dibuang menjadi panas. Oleh karena itu pada saat tekanan maksimum suhu di titik tersebut juga maksimum. Hal ini sesuai dengan persamaan *Euler* linear. Hasil penyelidikan ini menunjukkan bahwa pada gelombang stasioner juga terdapat osilasi suhu.

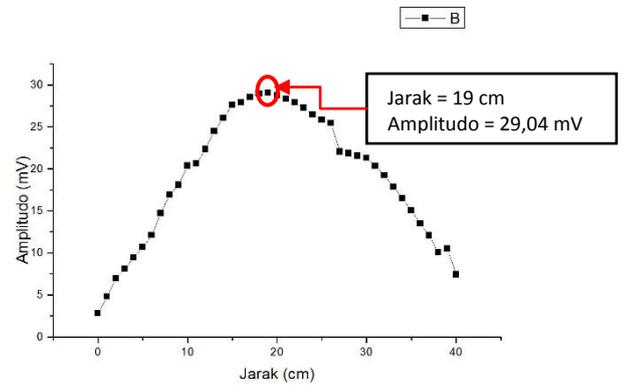
Grafik dan analisis pengukuran frekuensi resonansi resonator termoakustik



Gambar 8. Grafik hubungan frekuensi dengan amplitudo

Grafik tersebut memperlihatkan amplitudo maksimum pada frekuensi terukur (dengan *software*) 392,8408 Hz dengan amplitudo sebesar 20,19 mV. Frekuensi tersebut menunjukkan frekuensi resonansi yang ditandai dengan adanya bunyi dengung dibandingkan dengan frekuensi yang lainnya. Bunyi dengung ini ditunjukkan dengan nilai amplitudo maksimum. Eksperimen ini dilakukan dengan meletakkan *mic condensor* dititik yang sama, yakni (10,00 ±0,05) cm dari ujung resonator terbuka, dimana nilai frekuensi divariasikan untuk menunjukkan adanya amplitudo maksimal yang mengindikasikan frekuensi resonansi.

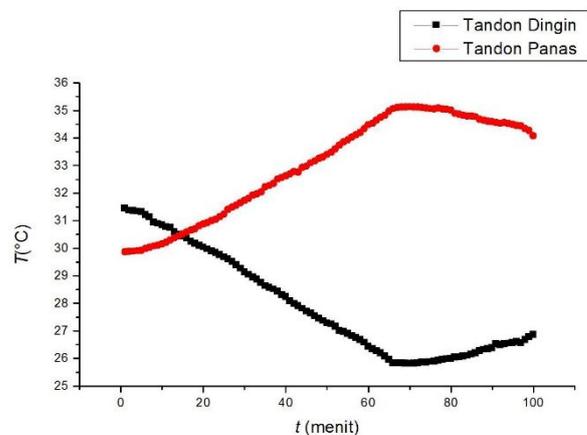
Berdasarkan perolehan nilai frekuensi resonansi ini masih perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui letak perut (amplitudo maksimum) dari frekuensi resonansi ini. Berikut hasil perolehannya:



Gambar 9. Grafik hubungan jarak dengan amplitudo

Eksperimen dilakukan dengan memvariasi jarak dari *mic condensor* yang digunakan dan masing-masing jarak mempunyai nilai amplitudo. Nilai amplitudo ini akan menunjukkan dimana letak perut tekanan dari gelombang stasioner dengan menggunakan frekuensi resonansi yang telah diperoleh dari eksperimen sebelumnya.

Pengujian sistem termoakustik dengan *stack* berbahan mika yang dilapisi *nylon*



Gambar 10. Grafik beda suhu di kedua tandon

Grafik diatas adalah hasil pengujian sistem termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada suhu $29,86^{\circ}\text{C}$, suhu tersebut menjadi titik awal tandon panas. Sedangkan pada tandon dingin diawali pada suhu $31,45^{\circ}\text{C}$. Suhu ruangan berada pada 29°C . Sensor suhu diletakkan ($2,00 \pm 0,05$) cm dari ujung *stack* pada masing-masing tandon. Jarak ini dipilih karena jika pengukuran terlalu jauh, sedangkan tandon panas dan tandon dingin memiliki ruang yang berbeda akan menyebabkan pengukuran menjadi tidak seimbang antara pengukuran suhu di tandon dingin dan pengukuran suhu di tandon panas. Frekuensi diatur pada frekuensi resonansi orde kedua sebesar $392,8408$ Hz pada program *SpectraPLUS*. Memasuki menit ke 20, suhu di tandon panas naik lagi pada kisaran suhu $30,87^{\circ}\text{C}$ dengan suhu di tandon dingin menurun lagi pada suhu $30,04^{\circ}\text{C}$. Suhu di tandon panas terus naik begitupun dengan suhu di tandon dingin yang terus turun sampai dengan menit ke 70. Pada *range* waktu menit ke 71 sampai menit ke 76 suhu di tandon panas berfluktuasi naik turun begitupun suhu di tandon dingin. Kemudian pada menit ke 77 sampai dengan menit ke 100 suhu di tandon panas mulai turun dan suhu di tandon dingin perlahan naik. Suhu di tandon panas maksimal berada pada suhu $35,13^{\circ}\text{C}$ pada menit ke 70. Suhu di tandon dingin minimum berada pada suhu $25,81^{\circ}\text{C}$; titik ini juga terjadi pada menit ke 70.

Berdasarkan grafik ini dapat dianalisis bahwa suhu yang lebih tinggi terjadi pada tandon panas dan tandon dingin mempunyai suhu yang lebih rendah. Sampai dengan menit ke 70 suhu di tandon panas terus naik dan suhu di tandon dingin terus turun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada sistem termoakustik terjadi kompresi udara yang berada di lapisan antar *stack*, kemudian panas dibuang ke tandon panas sehingga suhu di tandon panas terus naik. Pada sistem ini juga terjadi ekspansi pada daerah dingin sehingga suhu di daerah ini terus menurun.

SIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai analisis kinerja mesin pendingin termoakustik yang telah dilakukan dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan pranti termoakustik yang berhasil dibuat terdiri atas *box speaker*, resonator, *stack* dan sistem sumber bunyi.
2. Gelombang stasioner yang terjadi dalam tabung resonator menunjukkan adanya osilasi suhu yang sebanding dengan osilasi dari amplitudo tekanan gelombang bunyi dengan sistem termoakustik yang terisolasi menunjukkan beda suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem tidak terisolasi yakni dengan beda suhu $1,3^{\circ}\text{C}$ antara perut tekanan dengan simpul tekanan.
3. Frekuensi resonansi dari resonator dengan panjang ($80,00 \pm 0,05$) cm termoakustik adalah $392,8408$ Hz dengan nilai amplitudo $20,19$ mV dan perut tekanan

gelombang stasioner terletak pada jarak $(19,00 \pm 0,05)$ cm dari ujung tabung resonator.

4. Sistem termoakustik dengan *stack* berbahan mika yang dilapisi *nylon* dengan suhu ruangan 29°C menghasilkan beda suhu $7,22^{\circ}\text{C}$ antara tandon panas dan tandon dingin pada waktu pengoperasian 100 menit.

Saran

Alat yang dibuat pada tugas akhir skripsi ini masih banyak kekurangan serta perlu pengembangan dan perbaikan agar nantinya pendingin termoakustik ini dapat berkerja lebih optimal, baik secara teoritis maupun eksperimen. Perbaikan dan pengembangan yang perlu dilakukan adalah:

1. Ditambahkannya penukar panas (*heat exchanger*) pada tandon panas agar tidak terjadi arus balik kalor sehingga beda suhu menjadi lebih optimal.
2. Peredaman sistem sumber bunyi.
3. Perlu dibuat instrumen tambahan untuk memanfaatkan sistem termoakustik (tandon dingin) yang telah berhasil dibuat.

DAFTAR PUSTAKA

Bo Nordell. 2003. Global and Planetary Change. Thermal Pollution causes global warming. Sweden.

Garret, Steven L., 2003. *Thermoacoustic engines and refrigerators*. University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota. www.acs.psu.edu/thermoacoustics (diakses tanggal 6 Maret 2015, 13:01)

Girgin, I., and Turker, M., 2012, *Thermoacoustic Systems as an Alternative to Conventional Coolers*,

Journal of Naval Science and Engineering Vol. 8, No. 1, pp. 14-32.

Swift, Gregory W. 2001. *Thermoacoustics A Unifying Perspective For Some Engines and Refrigerators*. Published by the Acoustical Society of America. United States of America. <http://www.lanl.gov/thermoacoustics> (diakses tanggal 14 Oktober 2014, 18:28)

Tijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H., de Waele, A.T.A.M. 2001. *Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator*. *Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology*. *Cryogenics* 42 (2002) 59–66. Eindhoven, Netherlands. www.journals.elsevier.com/cryogenics (diakses tanggal 16 Januari 2015, 19:38)