

RANCANG BANGUN PIRANTI TERMOAKUSTIK SEBAGAI PEMOMPA KALOR

Ikhsan Setiawan, Agung B.S. Utomo, dan Guntur Maruto

*Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada,
Sekip Utara, Yogyakarta 55281. Alamat e-mail: ikhsan_s@ugm.ac.id **

Andi R. Wijaya

*Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281*

Abstract

A simple thermoacoustic device as a heat pump has been successfully constructed and operated. The main parts of the device consist of a cylindrical resonator made of PVC pipe, a loudspeaker as a sound source, and a stack as a heat transfer element. The device was operated at a resonance frequency of the resonator, i.e. about 151 Hz, using atmospheric air as a working medium. A heat transfer from cold reservoir to hot reservoir has been observed where the cold reservoir temperature decreased about 5 °C and the hot reservoir temperature increased about 8 °C after 6 minutes of the device operation.

Keywords: *thermoacoustic device, heat pump, heat transfer*

1. Pendahuluan

Termoakustika (*thermoacoustics*) adalah suatu bidang yang berhubungan dengan fenomena fisis di mana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang bunyi, dan sebaliknya gelombang bunyi dapat menghasilkan perbedaan suhu. Suatu gelombang bunyi (akustik) di dalam gas biasanya hanya dipandang sebagai osilasi-osilasi tekanan dan gerak, padahal osilasi suhu juga selalu terjadi. Bila bunyi merambat dalam kanal-kanal kecil, maka kalor yang beresilasi juga akan mengalir ke dan dari dinding-dinding kanal. Gabungan semua osilasi ini akan menghasilkan fenomena atau efek termoakustik. Alat yang digunakan untuk menimbulkan efek termoakustik disebut piranti termoakustik. Piranti termoakustik dapat dibedakan menjadi dua, yaitu (a) mesin kalor termoakustik yang dapat membangkitkan gelombang akustik dengan adanya perbedaan suhu, dan (b) pendingin termoakustik atau pompa kalor termoakustik yang dapat menghasilkan perbedaan suhu dengan menggunakan gelombang akustik.

Artikel-artikel tentang termoakustik yang dipublikasikan dalam jurnal-jurnal ilmiah populer seperti yang ditulis oleh Swift (1995) dan oleh Garret dan Backhaus (2000) telah menjadikan konsep-konsep yang mendasari fenomena termoakustik dapat dipahami oleh khalayak luas. Sebelumnya, Wheatley *et al.* (1985) telah menyajikan pemahaman beberapa fenomena dalam termoakustik dan aplikasinya pada mesin kalor akustik. Sebuah pustaka acuan yang banyak dirujuk berbagai artikel tentang termoakustik dan sangat berharga bagi pemahaman kita tentang konsep-konsep yang terlibat dalam termoakustik telah ditulis oleh Swift (2002).

Beberapa piranti termoakustik untuk tujuan demonstrasi telah dibuat. Sebuah pendingin termoakustik telah dibuat dan beroperasi dengan baik, di mana suatu perbedaan suhu sekitar 15 °C antara bagian panas dan bagian dingin dapat dicapai dalam waktu 4 menit pengoperasian (Russell & Weibull, 2002). Jeromen (2003) telah menghasilkan sebuah mesin kalor termoakustik yang dapat menghasilkan gelombang akustik dengan frekuensi sekitar 200 Hz dan intensitas sekitar 60 dB. Mesin kalor Stirling-termoakustik frekuensi tinggi yang dapat menghasilkan gelombang akustik dengan intensitas lebih dari 100 dB pada frekuensi 560 Hz telah berhasil dibuat oleh Bastyr & Keolian (2003). Demonstrasi eksperimental tentang konversi energi termoakustik dalam sebuah resonator telah dilakukan oleh Biwa *et al.* (2004). Se-

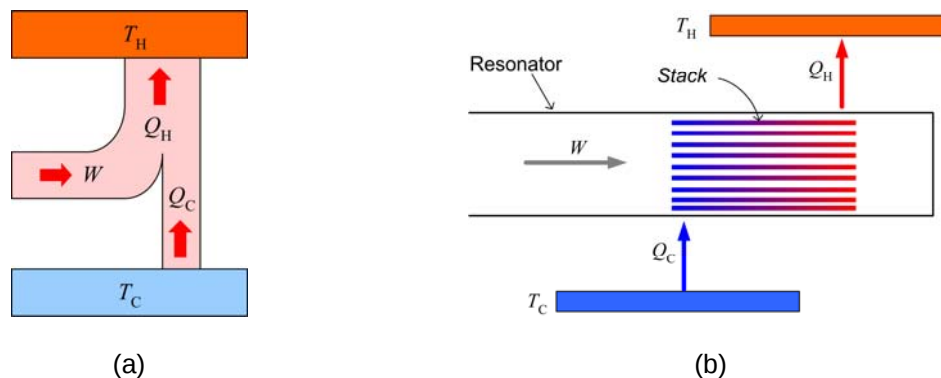
* Alamat penulis untuk korespondensi

dangkan studi eksperimental tentang mesin Stirling termoakustik dan aplikasinya sebagai pendingin telah dilakukan oleh Ueda *et al.* (2004).

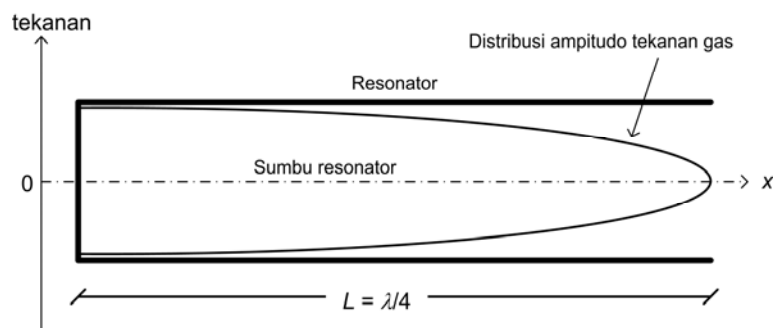
Makalah ini memaparkan penelitian tentang pembuatan sebuah piranti termoakustik sebagai pemompa kalor. Tujuan yang ingin dicapai adalah terwujudnya sebuah pompa kalor termoakustik sederhana yang dapat melakukan transfer kalor dari tandon dingin ke tandon panas yang ada pada piranti termo-akustik yang dibuat tersebut dengan menggunakan gelombang bunyi.

2. Dasar Teori

Pompa kalor termoakustik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu sumber bunyi, resonator, dan *stack* yang diletakkan di dalam resonator. *Stack* merupakan salah satu jenis pemindah kalor yang terdiri atas sejumlah kanal-kanal kecil atau permukaan-permukaan sejajar dengan sumbu tabung resonator, dan digunakan untuk tujuan menghasilkan gradien suhu di sepanjangnya. Gambar 1 memperlihatkan skema prinsip dasar sebuah pendingin atau pompa kalor termoakustik, di mana suatu kerja W dari luar memindahkan kalor Q_C dari tandon dingin bersuhu T_C ke tandon panas bersuhu T_H . Dalam hal ini kerja dilakukan oleh gelombang akustik tegak di dalam tabung resonator.



Gambar 1. Diagram skematik prinsip dasar: (a) pendingin atau pompa kalor, (b) pendingin atau pompa kalor termoakustik. T_H adalah tandon panas, T_C adalah tandon dingin, Q_C adalah kalor yang memasuki *stack*, Q_H adalah kalor yang keluar dari *stack*, dan W adalah kerja dari luar (bunyi)

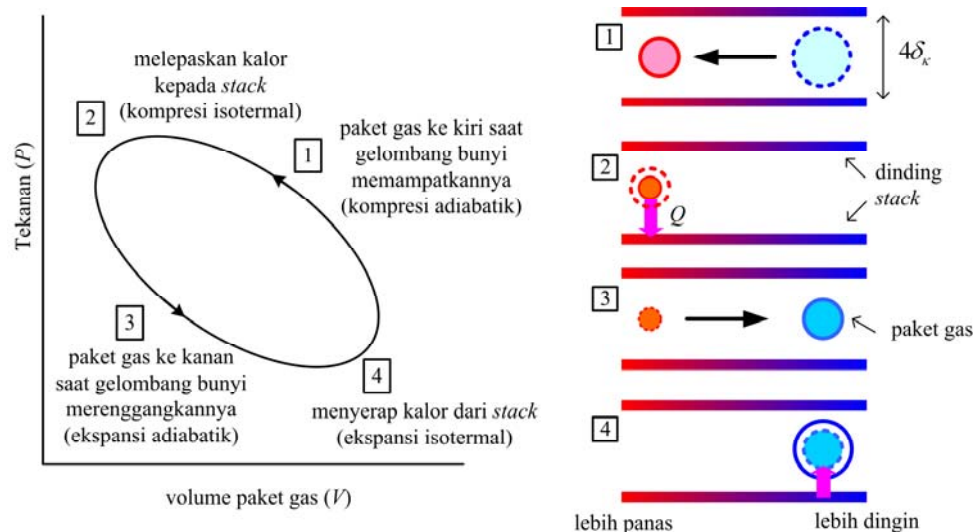


Gambar 2. Distribusi amplitudo tekanan gas saat terjadi gelombang bunyi tegak pada frekuensi nada dasar di dalam resonator dengan panjang $L = \lambda/4$, dengan λ adalah panjang gelombang bunyi nada dasar

Pada resonator silindris dengan satu ujung tertutup, distribusi amplitudo tekanan gas saat terjadi gelombang bunyi tegak dengan frekuensi nada dasar diperlihatkan oleh Gambar 2. Dalam kondisi ini, tekanan maksimum (perut tekanan) terjadi di ujung tertutup, sedangkan tekanan minimum (simpul tekanan) terjadi di ujung terbuka. Ketika osilasi gelombang bunyi menyebabkan suatu paket gas bergerak ke kiri, maka volume paket gas tersebut mengecil,

tekanannya meningkat dan suhunya naik sebagai akibat sifat adiabatik gas. Sebaliknya, saat paket gas bergerak ke kanan, volume paket gas membesar, tekanannya berkurang dan suhunya turun. Dengan demikian, selain osilasi tekanan dan simpangan molekul gas, osilasi suhu terjadi pula dalam gelombang bunyi.

Siklus proses pendinginan atau pemompaan kalor secara termoakustik dilukiskan oleh Gambar 3. (Bagian sebelah kanan pada Gambar 3 merujuk pada sebuah kanal pada *stack*.) Saat gelombang akustik menyebabkan paket gas di dalam *stack* bergerak ke kiri (ke bagian panas) gas termampatkan dan tekanan meningkat. Paket gas yang termampatkan ini sekarang lebih panas dari pada dinding *stack* di dekatnya sehingga ia melepaskan kalor ke *stack* dan volume paket gas tersebut menyusut. Saat gelombang tegak melanjutkan siklusnya, paket gas bergerak kembali ke kanan di mana tekanannya lebih rendah, dalam hal ini paket gas menjadi lebih renggang dan lebih dingin dari pada dinding *stack* di dekatnya, sehingga ia menyerap kalor dari dinding *stack* dan mengembang. Siklus ini terus berulang dan efeknya adalah transfer kalor dari bagian dingin ke bagian panas *stack*.



Gambar 3. Kiri: Diagram P - V yang memperlihatkan empat tahap dalam siklus pendingin / pompa kalor termoakustik. Kanan: Proses transfer kalor pada *stack* (Russell & Weibull, 2002)

Batasan utama dalam merancang *stack* adalah bahwa lebar kanal *stack* haruslah beberapa kali dari besar kedalaman penetrasi termal gas medium, dan empat kali kedalaman penetrasi termal adalah nilai jarak optimumnya (Swift, 1995). Kedalaman penetrasi termal (δ_κ) didefinisikan sebagai jarak difusi kalor melalui gas dalam selang waktu $t = 1/\pi f$, dengan f adalah frekuensi gelombang akustik tegak (Swift, 1997). Kedalaman penetrasi termal ini bergantung pada konduktivitas termal gas (κ) dan kerapatan gas (ρ) serta kalor spesifik isobarik per satuan massa gas (c_p) menurut persamaan (Swift, 1997)

$$\delta_\kappa = \sqrt{\frac{\kappa}{\pi f \rho c_p}} \quad (1)$$

Jika jarak antara lapisan-lapisan *stack* terlalu besar, maka gas tidak dapat memindahkan kalor secara efektif ke dan dari dinding-dinding *stack*. Akan tetapi, jika lapisan-lapisan *stack* terlalu berdekatan, maka akan menghambat gerak partikel-partikel gas.

Faktor lain yang juga sangat penting pengaruhnya terhadap unjuk kerja pendingin termoakustik adalah gradien suhu longitudinal kritis (Swift, 1997):

$$\nabla T_{\text{kritis}} = \frac{p}{\xi \rho c_p}, \quad (2)$$

dengan p dan ξ berturut-turut adalah amplitudo tekanan dan amplitudo pergeseran akustik. Dalam hal ini, transfer kalor tidak akan terjadi bila variasi suhu puncak ke puncak yang disebabkan oleh kompresi adiabatik gas ($2p/\rho c_p$) tepat sama dengan variasi suhu dinding lokal ($2\xi \nabla T_{\text{kritis}}$) antara simpangan-simpangan maksimum gerak partikel-partikel gas. Transfer kalor dari bagian dingin ke bagian panas *stack* yang mengakibatkan pendinginan hanya akan terjadi jika variasi suhu di dalam gas yang diinduksi oleh gelombang bunyi lebih besar dari pada gradien suhu antara bagian panas dan bagian dingin *stack*. Hal ini memerlukan gelombang bunyi dengan intensitas yang agak tinggi di dalam resonator.

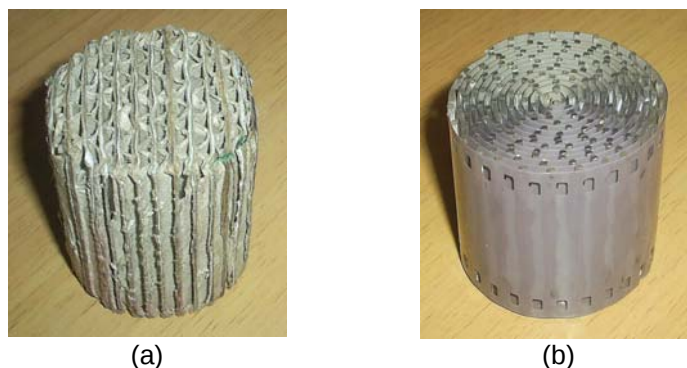
3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama adalah pembuatan dan penyusunan bagian-bagian piranti pompa kalor termoakustik serta perakitannya menjadi sistem pompa kalor termoakustik. Sedangkan tahap kedua adalah pengujian kinerja piranti tersebut.

Sebagaimana telah disebutkan pada awal Bagian 2, piranti pompa kalor termoakustik yang dibuat pada penelitian ini terdiri atas sistem sumber bunyi, resonator, dan *stack*. Sistem sumber bunyi terdiri atas sebuah *loudspeaker* 60W 8Ω dengan kotaknya yang dihubungkan ke keluaran penguat audio dari AFG (*audio function generator*) digital. Dengan AFG ini, frekuensi bunyi yang digunakan dapat diatur dengan mudah, dengan ketelitian 1 Hz. Selain itu, sebuah voltmeter digunakan untuk memonitor tegangan masukan *loudspeaker* berkaitan dengan kuat bunyi yang dihasilkannya.

Pada penelitian ini, piranti termoakustik yang dibuat adalah jenis gelombang tegak dengan alasan kemudahan dan kesederhanaan desainnya. Selain itu, dengan alasan yang sama, bentuk resonator yang dipilih adalah bentuk silinder, meskipun pendingin termoakustik dengan bentuk seperti ini memiliki efisiensi rendah (Swift, 1988). Resonator ini terbuat dari pipa PVC dengan panjang $L = 55$ cm dan diameter $D = 4$ cm. Salah satu ujung resonator dibuat terbuka dan dihadapkan ke sistem sumber bunyi, sedangkan ujung lainnya dibuat tertutup dengan menggunakan sumbat karet. Gas pengisi resonator adalah udara atmosfer pada suhu ruang sekitar 30 °C. Dengan demikian, frekuensi nada dasar gelombang bunyi tegak (frekuensi resonansi) resonator ini ditaksir sekitar 154 Hz ($\lambda = 4L = 220$ cm), dengan menganggap bahwa cepat rambat bunyi di udara sebesar 340 m/s.

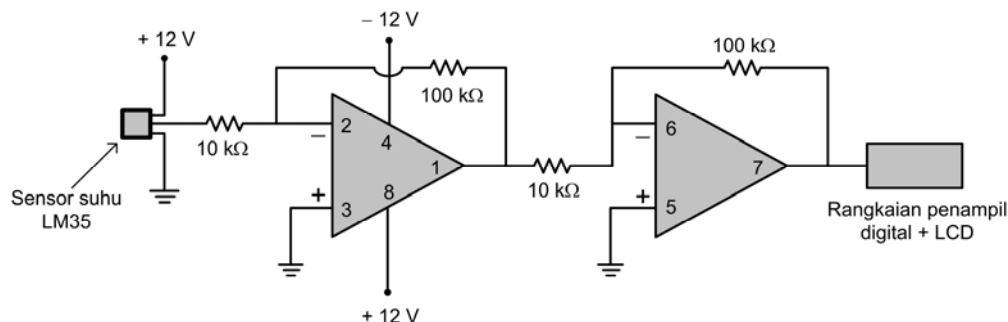
Ada dua buah *stack* yang digunakan pada penelitian ini, keduanya terbuat dari bahan yang berbeda, yaitu kertas kardus dan film fotografi 35 mm. *Stack* dari kertas kardus (Gambar 4.a) dibuat dengan cara menumpuk dan merekatkan kertas-kertas kardus dan kemudian mem-bentuknya sehingga berbentuk silinder dengan arah lubang kanal-kanal sepanjang sumbu silinder. Panjang *stack* kardus dibuat sama dengan panjang *stack* film, yaitu 35 mm. Sedangkan *stack* dari film (Gambar 4.b) dibuat dengan cara menggulung film fotografi 35 mm dengan terlebih dahulu merekatkan benang-benang nylon (tali pancing) secara melintang pada film tersebut dengan jarak yang sama, seperti disarankan oleh Hoffer (1986). Di sini, diameter benang nylon yang digunakan adalah $1,3 \times 10^{-3}$ m dan jarak antar benang nylon adalah 0,5 cm.



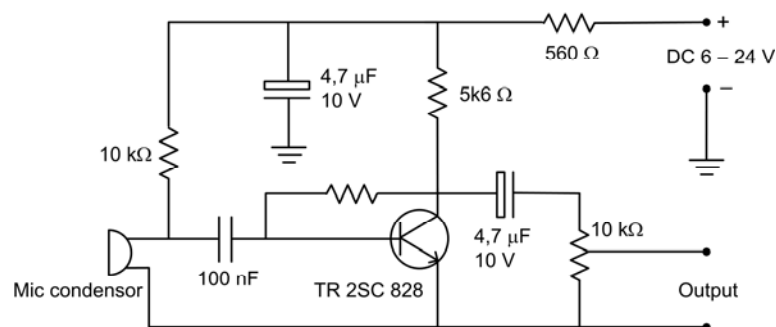
Gambar 4. (a) Stack terbuat dari kertas kardus. (b) Stack terbuat dari film

Diameter nylon tidak lain adalah jarak antara lapisan *stack*, dan jarak yang digunakan di sini hanya sekitar 0,6 dari kedalaman penetrasi termal sebesar $2,1 \times 10^{-3}$ mm untuk medium gas berupa udara dan frekuensi bunyi sekitar 154 Hz menurut persamaan (1). *Stack* diletakkan di dalam resonator dengan jarak 11 cm dari ujung tertutup resonator ke pertengahan *stack*. Jarak ini adalah 1/20 dari panjang gelombang bunyi yang digunakan dan merupakan jarak yang optimum (Swift, 2002).

Selain bagian-bagian utama tersebut di atas, piranti pemompa kalor termoakustik dalam penelitian ini dilengkapi dengan sistem deteksi suhu dan sistem deteksi bunyi. Sistem deteksi suhu di sini adalah dua buah termometer digital yang masing-masing terdiri atas sebuah sensor suhu LM35 dan sebuah rangkaian penampil digital menggunakan IC JRC 4558. Sistem deteksi suhu ini dirakit sendiri dengan rangkaian seperti pada Gambar 5. Ketelitian termometer digital ini mencapai 0,1 °C. Sistem ini perlu dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk memantau suhu tandon panas dan suhu tandon dingin.



Gambar 5. Skema rangkaian termometer digital dengan sensor suhu LM35 dan menggunakan IC JRC 4558

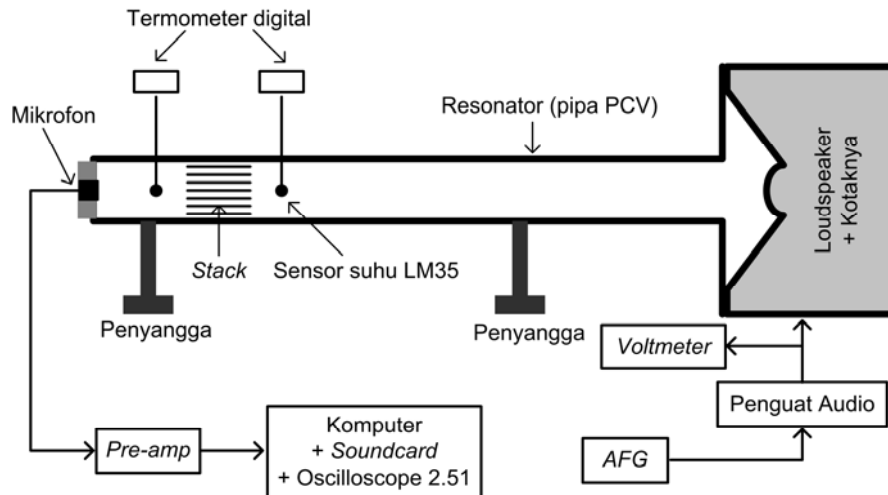


Gambar 6. Diagram rangkaian *pre-amp* dan mikrofon (*mic condensor*)

Sistem deteksi bunyi digunakan untuk memonitor bentuk gelombang dan spektrum frekuensi bunyi di dalam resonator. Sistem ini terdiri dari sebuah mikrofon kecil (*mic condensor*) dengan *pre-amp* yang dibuat dengan rangkaian seperti ditunjukkan oleh Gambar 6, dan sebuah komputer yang dilengkapi dengan *soundcard* dan perangkat lunak Oscilloscope 2.51 (perangkat lunak ini bersifat *freeware* dan dapat diperoleh dalam format .zip yang berukuran hanya sekitar 100 KB dari <http://polly.phys.msu.ru/~zeld/oscill.html>). Mikrofon diletakkan di ujung tertutup resonator, dan sinyal keluarannya diperkuat oleh *pre-amp* kemudian diteruskan ke komputer melalui sebuah *soundcard*. Pada komputer, sinyal ini diamati dengan menggunakan perangkat lunak Oscilloscope 2.51. Dengan perangkat lunak ini, bentuk gelombang bunyi dapat dipantau secara langsung (*real time*), dan jika fasilitas *FFT* (*fast fourier transform*) diaktifkan, maka spektrum frekuensi bunyi juga dapat diamati secara langsung.

Skema susunan piranti pompa kalor termoakustik dan peralatan pengukuran serta monitornya secara keseluruhan diperlihatkan oleh Gambar 7. Ruang di sebelah kiri *stack* meru-

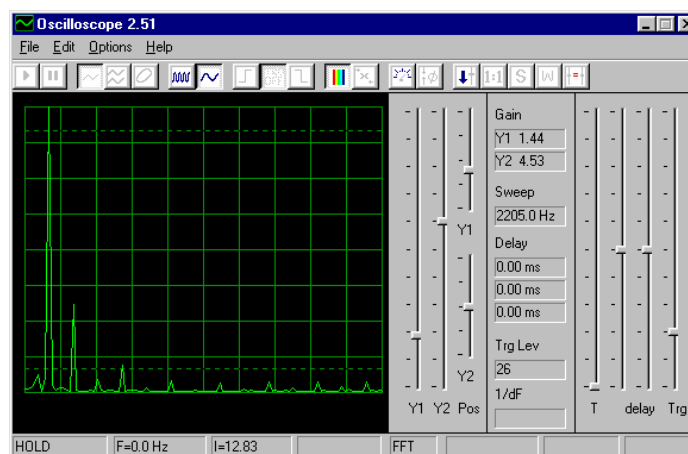
pakan tandon panas, sedangkan ruang di sebelah kanan *stack* merupakan tandon dingin. Suhu kedua ruang ini masing-masing diukur dengan menggunakan dua buah termometer digital yang telah dirakit. Setelah susunan ini terwujud, maka tahap berikutnya adalah pengujian kinerja piranti. Pengujian yang dimaksud di sini adalah apakah piranti ini telah dapat bekerja melakukan pemompaan atau transfer kalor dari tandon dingin ke tandon panas, dan seberapa besar penurunan suhu tandon dingin serta kenaikan suhu tandon panas akibat transfer kalor tersebut.



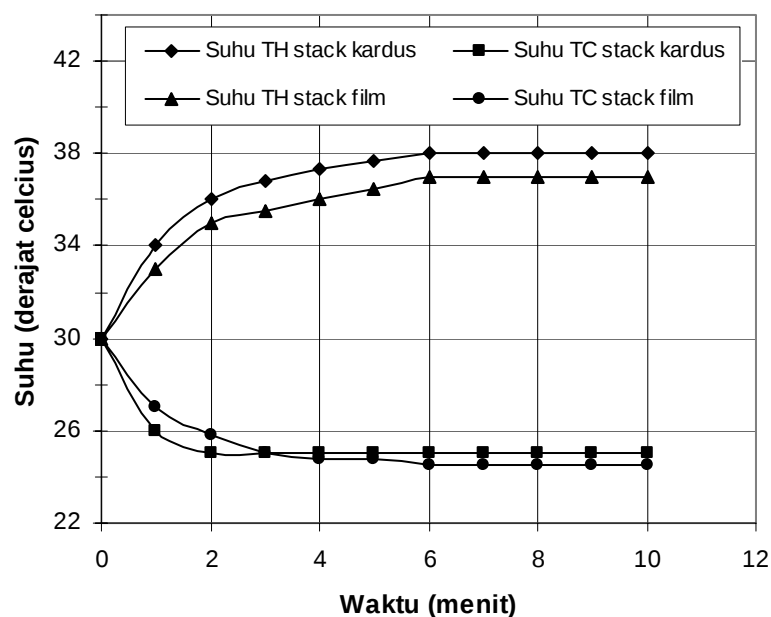
Gambar 7. Skema susunan piranti pompa kalor termoakustik beserta peralatan pengukuran dan monitornya

4. Hasil Dan Pembahasan

Piranti pompa kalor termoakustik yang telah disusun ini dioperasikan pada frekuensi resonansi tabung resonator, yaitu 151 Hz untuk piranti yang menggunakan *stack* kardus dan 152 Hz untuk piranti yang menggunakan *stack* film. Tegangan masukan *loudspeaker* yang digunakan adalah tegangan maksimum yang dapat dicapai, yaitu sebesar 11 volt. Terjadinya resonansi dapat diketahui dari tampilan *FFT* pada perangkat lunak Oscilloscope 2.51, seperti ditunjukkan oleh Gambar 8. Di sana tampak pula komponen frekuensi lain yang hadir di dalam resonator saat terjadinya resonansi. Puncak spektrum yang paling tinggi pada Gambar 8 berkaitan dengan frekuensi nada dasar tabung resonator. Puncak-puncak spektrum lainnya berkaitan dengan kelipatan ganjil dari frekuensi nada dasar tersebut.



Gambar 8. Tampilan perangkat lunak Oscilloscope 2.51 yang memperlihatkan spektrum frekuensi bunyi yang hadir di dalam tabung resonator saat terjadi resonansi pada frekuensi sekitar 151 Hz



Gambar 9. Grafik suhu tandon panas T_H dan tandon dingin T_C selama 10 menit pertama pengoperasian piranti pompa kalor termoakustik yang dibuat. Tegangan loudspeaker adalah 11 volt.

Hasil yang diperoleh dari piranti pompa kalor termoakustik selama pengoperasian 10 menit, diperlihatkan oleh Gambar 9, baik untuk piranti yang menggunakan *stack* kardus maupun *stack* film. Dari gambar tersebut tampak bahwa piranti ini telah dapat beroperasi sebagai pemompa kalor. Hal ini terlihat dari adanya penurunan suhu tandon dingin T_C dan kenaikan suhu tandon panas T_H yang mengindikasikan terjadinya transfer kalor dari tandon dingin ke tandon panas akibat adanya kerja yang dilakukan oleh gelombang akustik. Suhu awal kedua tandon sebelum piranti dioperasikan adalah 30 °C. Dalam dua menit pertama pengoperasian piranti, terjadi perubahan suhu tandon yang relatif cepat, kenaikan suhu tandon panas mencapai 5°C (*stack* film) hingga 6°C (*stack* kardus), sedangkan penurunan suhu tandon dingin mencapai 4°C (*stack* film) hingga 5°C (*stack* kardus). Suhu kedua tandon stabil setelah piranti dioperasikan selama 6 menit yang menandakan bahwa kesetimbangan termal antara sistem dan lingkungannya telah tercapai. Untuk piranti dengan *stack* kardus, kenaikan maksimum suhu tandon panas adalah sebesar 8°C dan penurunan maksimum suhu tandon dingin adalah sebesar 5 °C. Sedangkan untuk piranti dengan *stack* film, kenaikan maksimum suhu tandon panas adalah sebesar 7°C dan penurunan maksimum suhu tandon dingin adalah sebesar 5,5°C. Dengan demikian, secara kasar kedua jenis *stack* yang telah digunakan di sini memperlihatkan kinerja yang tidak jauh berbeda. Perbedaan yang ada dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti kapasitas kalor bahan *stack* dan luas penampang total kanal-kanal *stack*.

Di sisi lain, baik untuk piranti dengan *stack* kardus maupun piranti dengan *stack* film, perubahan suhu tandon panas lebih besar dari pada perubahan suhu tandon dingin. Hal ini dapat disebabkan oleh volume ruang tandon panas yang jauh lebih kecil dari pada volume ruang tandon dingin, sehingga sejumlah kalor yang sama menyebabkan perubahan suhu yang berbeda. Selain itu, sumbat karet yang menjadi penutup tandon panas merupakan konduktor kalor yang buruk sehingga kalor yang terkumpul di dalam tandon panas sulit keluar ke lingkungannya.

Selain itu, adanya sumbat karet dapat mengurangi optimasi suhu minimum tandon dingin melalui arus balik kalor yang melalui *stack*. Oleh karena itu, sebaiknya sumbat karet tersebut di atas diganti dengan penutup yang terbuat dari bahan konduktor kalor yang baik seperti tembaga.

5. Kesimpulan dan Saran

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa rancang bangun piranti termoakustik sederhana sebagai pemompa kalor beserta peralatan-peralatan pendukung pengukurannya telah berhasil dilakukan dan piranti tersebut telah dapat melakukan transfer kalor dari tandon dingin ke tandon panas melalui kerja yang dilakukan oleh gelombang akustik.

Piranti ini belum cukup efisien sebagai sebuah alat transfer kalor. Efisiensi dapat ditingkatkan dengan menggunakan pemindah kalor yang dipasang pada kedua ujung stack. Pengembangan lain dapat dilakukan dengan memodifikasi geometri resonator atau menggunakan jarak antara lapisan *stack* film yang optimum. Kajian selanjutnya yang dapat dilakukan pada piranti ini diantaranya adalah bagaimana pengaruh intensitas bunyi terhadap kinerjanya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan sangat banyak terima kasih kepada Dana Masyarakat FMIPA Universitas Gadjah Mada yang telah membiayai penelitian ini melalui kegiatan Penelitian Antar Bidang Ilmu Tahun 2005.

Kepustakaan

- Bastyr, K. J. and Keolian, R. M. 2003. "High-frequency Thermoacoustic-Stirling Heat Engine Demonstration Device." *ARLO*, **4**: 37–40.
- Biwa, T., et al. 2004. "Experimental Demonstration of Thermoacoustic Energy Conversion in a Resonator." *Phys. Rev. E*, **69** (66304): 1–6.
- Garret, S. L. and Backhaus, S. 2000. "The power of sound." *Am. Sci*, **88**: 516–525.
- Hofler, T. 1986. *Ph.D. Thesis*. Physics Department, University of California at San Diego, Appendix C.
- Jeromen, A. 2003. "A Simplified Thermoacoustic Engine Demonstation." *Am. J. Phys*, **71**: 496–498.
- Russell, D. A. and Weibull, P. 2002. "Tabletop Thermoacoustic Refrigerator for Demonstration." *Am. J. Phys*, **70**: 1231–1233.
- Swift, G. W. 1988. "Thermoacoustic Engines." *J. Acoust. Soc. Am*, **84**: 1145–1180.
- Swift, G. W. 1995. "Thermoacoustic Engines and Refrigerators, *Phys. Today*, **48**: 22–28.
- Swift, G. W. 1997. "Thermoacoustic Engine." Dalam: M. J. Crocker (Ed). *Encyclopedia of Acoustics*. New York: Wiley. 695–701.
- Swift, G. W. 2002. *Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators*. Los Alamos National Laboratory. Acoustical Society of America Publications.
- Ueda, Y. et al. 2004. "Experimental Studies of a Thermoacoustic Stirling Engine Prime Mover and Its Application to a Cooler." *J. Acoust. Soc. Am*, **115**: 1134–1141.
- Wheatley, J. et al. 1985. "Understanding Some Simple Phenomena in Thermoacoustics with Applications to Acoustical Heat Engines." *Am. J. Phys*, **53**: 147–162.

IKHSAN SETIAWAN

Tahun 1999 lulus S1 dan tahun 2002 lulus S2 keduanya dari Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada. Saat ini menjadi dosen tetap di Jurusan Fisika, FMIPA, UGM. Minat penelitian: Termoakustika, Akustika, Spektroskopi.

AGUNG BAMBANG SETIO UTOMO

Tahun 1982 lulus S1 dan tahun 1987 lulus S2 keduanya dari Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada. Lulus S3 di bidang Fisika dari *University College of Swansea*, Inggris tahun 1994. Saat ini menjadi dosen tetap di Jurusan Fisika, FMIPA, UGM. Minat penelitian: Spektroskopi Laser, Termoakustika.

GUNTUR MARUTO

Tahun 1978 lulus S1 dan tahun 1987 lulus S2 keduanya dari Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada. Saat ini menjadi dosen tetap di Jurusan Fisika, FMIPA, UGM dan sedang menempuh S3 Fisika di UGM. Minat penelitian: Spektroskopi Laser.

ANDI RAHADIYAN WIJAYA

Lulus S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada pada tahun 1998, S2 di bidang *Ergonomics* (2001) dan *Sound and Vibration* (2003) dari *Lulea Tekniska Universitet*, Swedia. Saat ini bekerja sebagai dosen tetap di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UGM. Minat penelitian: Ergonomi, Vibrasi dan Bunyi.