

**Analisis Kinerja Pompa Kalor Termoakustik
Pada Variasi Diameter *Stack* Berpori Lingkaran**
(*Analysis Of Thermoacoustic Heat Pump Performance
For Varied Circle Pored Stack*)

A.Cahyono, Ikhsan Setiawan dan Agung Bambang Setio Utomo
Jurusan Fisika, FMIPA-UGM

Intisari

Telah dilakukan penelitian mengenai perbandingan kinerja pompa kalor termoakustik menggunakan tabung resonator berpanjang 70 cm, diameter 4,6 cm dan *stack* berbahan plastik dengan panjang 10 cm dan pori-porinya berbentuk lingkaran pada berbagai diameter. Metode yang digunakan untuk mencari diameter optimum pori-pori *stack*, yaitu dengan cara menempatkan *stack* pada posisi $\lambda / 20$ diukur dari ujung tabung tertutup dengan tegangan masukan 15 volt selama 10 menit pengoperasian pada frekuensi resonansi. Dari hasil penelitian, pada frekuensi resonansi 127 Hz didapat diameter pori-pori *stack* terbaik pada diameter 3,61 mm dengan perbedaan suhu 19 °C antara bagian panas dan dingin.

Kata kunci : Stack, pori lingkaran, frekuensi harmonik, beda suhu.

Abstract

The experiment to know the performance of thermoacoustic heat pump performance using the length of pipe of 70 cm, diameter 4,6 cm, and the stack material which consists of plastic with the length of 10 cm and circle pore varied diameter has been done. The method to determine stack pore optimum diameter is by placing the stack center position at $\lambda / 20$, which in measured from the tube end, and input voltage is 15 volt for 10 minutes operation on the resonance frequency.

The result of this experiment, on the resonance frequency 127 Hz, it is obtained that the optimum stack pore diameter is at 3,61 mm with the temperature difference between hot and cool reservoirs is around of 19 °C.

Key word : stack, circle pore, harmonic frequency, temperature difference.

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan bidang industri yang semakin pesat, dengan ditemukannya berbagai teknologi yang canggih dan modern, diiringi tingkat kehidupan manusia yang semakin maju membuat segala sesuatunya serba rumit dan juga berdampak. Dalam hal ini misalnya saja adanya penggunaan gas Freon pada AC dan lemari es yang mempunyai dampak buruk terhadap kesehatan walaupun dalam jangkauan yang lama. Karena alasan itulah perlu diciptakan teknologi modern yang sederhana, murah, praktis dan juga tidak mempunyai dampak buruk terhadap kehidupan

manusia. Untuk dapat mewujudkan itu semua, penelitian perlu dilakukan guna menunjang keberhasilan terciptanya teknologi tersebut.

Berdasarkan pada pemaparan yang telah dikemukakan diatas, penulis tergerak untuk melakukan penelitian mengenai termoakustik. Hal ini didukung dengan telah dilakukannya beberapa penelitian termoakustik baik di dalam maupun di luar negeri. Diharapkan dalam penelitian ini dapat dipelajari fenomena yang terjadi pada piranti termoakustik dan untuk kedepannya dapat menjadikan teknologi termoakustik sebagai salah satu teknologi yang diandalkan oleh masyarakat di Indonesia.

Termoakustik adalah suatu bidang yang berkaitan dengan fenomena fisis dimana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang akustik (bunyi) atau sebaliknya gelombang bunyi dapat menimbulkan perbedaan suhu. Alat untuk menghasilkan efek termoakustik sering disebut sebagai piranti termoakustik. Piranti termoakustik sendiri dikelompokkan menjadi dua, yaitu yang menghasilkan gelombang akustik akibat adanya perbedaan suhu disebut mesin kalor termoakustik. Sedangkan alat yang menghasilkan perbedaan suhu akibat gelombang bunyi disebut pendingin termoakustik. Teknologi termoakustik menawarkan keuntungan besar bila ditinjau dari aspek ekonomis serta dampak aplikasinya bagi kehidupan. (Wu dkk, 2003).

Adapun beberapa aplikasi dari teknologi ini di antaranya adalah untuk pendingin keping elektronik (*chip*), dengan suhu tinggi bisa digunakan untuk mencairkan gas alam dan sebagai pendingin perlengkapan elektronik pada kapal laut. (Anonim 1, 2007)

Dengan adanya beberapa keuntungan yang bisa kita dapatkan dari teknologi ini, maka tidaklah mengherankan bila penelitian mengenai teknologi ini banyak dilakukan oleh para ilmuwan. Hal ini berkaitan dengan masih banyaknya parameter kinerja pompa termoakustik sistem. Oleh karena itulah penelitian lanjutan mengenai teknologi ini sangat perlu dilakukan.

Penelitian akan dibatasi pada pengaruh *stack* diameter pori lingkaran dari bahan plastik terhadap kinerja pompa kalor termoakustik yang beroperasi pada frekuensi resonansi. Dalam penelitian ini diameter pori *stack* yang digunakan ada 4 jenis, (jenis 1 berdiameter 2,13 mm; jenis 2 berdiameter 2,45 mm; jenis 3 berdiameter 3,61 mm dan jenis 4 berdiameter 4,93 mm). Optimasi diameter *stack* ditunjukkan dengan indikator perbandingan beda suhu antara tandon panas dengan tandon dingin yang dihasilkan dari kinerja pompa kalor termoakustik ini.

Penelitian termoakustik telah dipelopori oleh para ilmuwan Amerika tepatnya di *Los Alamos Laboratory for the United State Department of Energy* (Anonim 2, 2007). Termoakustik dipublikasikan pada acara workshop yang pertama oleh Technische Universiteit Eindhoven and the Acoustical Society of America pada tanggal 22-25 April 2001 di s-Hertogenbosch, Belanda (Anonim 3, 2007).

Banyak artikel tentang termoakustik yang dimuat dalam jurnal ilmiah diantaranya yang dipelopori oleh Wheatley dkk (1985) yang menuliskan tentang pemahaman dasar fenomena termoakustik. Penelitian berlanjut pada tahun 1988 oleh Swift yang menyatakan bahwa bentuk resonator silindris merupakan bentuk resonator termudah untuk piranti termoakustik. Swift (1995) menuliskan tentang teori dasar dan aplikasi termoakustik. Pada tahun 2000 Swift berhasil menemukan jenis gelombang yang bisa di gunakan dalam penyusunan piranti termoakustik yaitu gelombang tegak (*standing wave*) dan gelombang berjalan (*travelling wave*).

Penelitian tentang teknologi termoakustik terus berlanjut, Russel dan Weibull (2002) mampu membuat sebuah piranti termoakustik untuk demonstrasi yaitu sebuah mesin pendingin termoakustik yang mampu beroperasi dengan baik yang menghasilkan

perbedaan suhu sekitar 15 °C antara bagian panas dan dingin yang dapat dicapai dalam waktu 4 menit pengoperasian. Swift (2002) meneliti tentang jarak antar lapisan *stack* dan diperoleh hasil bahwa penurunan suhu maksimum didapat ketika jarak antar lapisan/dinding *stack* adalah empat kali kedalaman penetrasi termal. Tijani (2002) melakukan penelitian termoakustik dengan menggunakan *stack* berbahan sedotan minuman yang menghasilkan beda suhu 30 °C untuk diameter pori-pori *stack* 2 mm. Demonstrasi eksperimental tentang konversi energi termoakustik dalam sebuah resonator juga telah dilakukan oleh Biwa dkk (2004).

Saat ini penelitian termoakustik sedang dilakukan di Laboratorium Fisika Atom dan Inti FMIPA UGM. Dimulai tahun 2005 penelitian tentang termoakustik telah berhasil merancang dan membuat sebuah piranti termoakustik sebagai sarana pendingin dan pemanas secara simultan (Setiawan dkk, 2005; Setiawan dkk, 2007). Uji kinerja alat ini dengan memvariasikan frekuensi dan amplitude gelombang akustik yang digunakan. Dengan frekuensi 152 Hz dan tegangan speaker 11 volt didapat perbedaan suhu 13 °C antara bagian yang panas dan dingin untuk *stack* dari bahan kardus dan untuk *stack* dari bahan film dihasilkan beda suhu sebesar 12,5 °C antara bagian yang panas dan yang dingin.

Elyanita (2006) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi frekuensi dan posisi *stack* bahan kardus terhadap perubahan suhu pada sistem termoakustik dan diperoleh posisi terbaik *stack* dengan beda suhu optimal yang didapat sebesar 9 °C antara bagian panas dan bagian dingin pada frekuensi 150 Hz. Penelitian mengenai pengaruh diameter resonator terhadap kinerja piranti termoakustik dilakukan oleh Sampurna (2006), didapat diameter optimum 4,6 cm dengan beda suhu yang dihasilkan antara bagian panas dan dingin sebesar 10,9 °C dalam waktu 10 menit pengoperasian. Wagiyanti (2007) berhasil melakukan penelitian mengenai korelasi panjang resonator 70 cm dan diameter 3,8 cm dengan *stack* dari bahan kertas manila dengan panjang *stack* 10 cm di dapat beda suhu 23 °C antara bagian yang panas dengan bagian yang dingin.

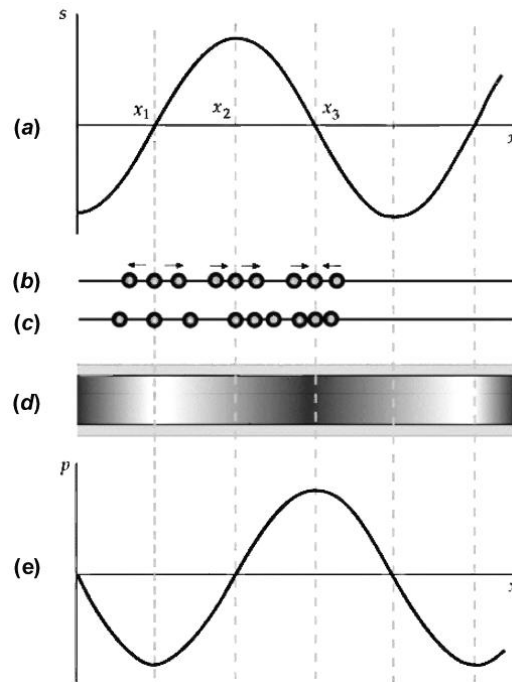
2. Tinjauan teori

Gelombang bunyi adalah contoh gelombang longitudinal yang merambat melalui suatu medium yang dapat berupa medium padat, cair, dan gas. Gelombang bunyi dapat terjadi karena adanya perapatan dan perenggangan molekul-molekul mediumnya. Partikel-partikel bahan yang mentransmisikan sebuah gelombang seperti itu beresilasi di dalam arah penjalaran gelombang itu sendiri. Gelombang bunyi dibatasi oleh jangkauan frekuensi yang dapat merangsang telinga dan otak manusia kepada sensasi pendengaran (20 Hz sampai dengan 20.000 Hz). (Tipler, 1991)

Terkait dengan penelitian termoakustik, satu hal yang menjadi komponen penting adalah gelombang akustik atau biasa juga disebut gelombang bunyi. Dalam medium udara, sumber yang bergetar akan menggetarkan molekul molekul udara di sekitarnya dan benturan antar molekul bertanggungjawab terhadap perambatan gelombang akustik (bunyi). Gelombang akustik yang ditimbulkan oleh sumber harmonik disebut gelombang akustik harmonik, misalnya saja garputala dan speaker yang dihubungkan dengan generator digital pembangkit gelombang.

Simpangan gelombang sebagai fungsi posisi x dan waktu t bagi gelombang akustik harmonik akan menyebabkan terjadinya variasi kerapatan udara dan tekanan udara. Oleh karena tekanan dalam gas sebanding dengan kerapatan, maka perubahan tekanan akan maksimum ketika perubahan kerapatannya maksimum. Ketika gelombang bunyi

bergerak seiring waktu, simpangan molekul udara, kerapatan dan tekanan pada satu titik semuanya berubah secara sinusoidal dengan frekuensi f , yang sama dengan frekuensi sumber getar. (Gambar 1)



Gambar 1. Menunjukkan perbedaan fase gelombang tekanan terhadap gelombang simpangan. (Tipler, 1991)

Gambar 1. (a) Simpangan dan titik setimbang molekul-molekul udara dalam gelombang bunyi harmonik versus posisi. Posisi setimbang di x_1 dan x_3 dan mencapai simpangan maksimum di x_2 . (b) Beberapa molekul yang ditempatkan sama pada posisi kesetimbangannya sebelum gelombang bunyi tiba. Arah anak panah menyatakan arah simpangan yang akan disebabkan gelombang bunyi. (c) Molekul-molekul di dekat x_1 , x_2 , dan x_3 setelah gelombang bunyi tiba. (d) Kerapatan maksimum pada x_3 dan minimum pada x_1 . (e) Perubahan tekanan versus posisi. Perubahan tekanan dan simpangan berbeda fase 90° (Tipler, 1998).

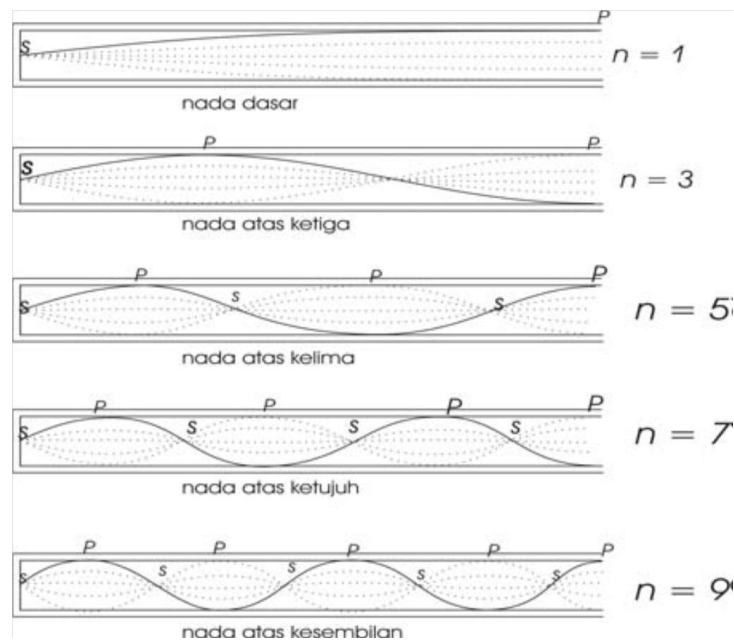
Ditinjau sebuah pipa tertutup (kedua ujungnya tertutup), selalu dicirikan dengan adanya simpul simpangan di kedua ujung pipa. Panjang gelombang simpangan molekul udara di dalam pipa tertutup adalah panjang gelombang yang sesuai dengan panjang pipa sehingga terdapat simpul pada setiap ujungnya. Hal ini dapat dilihat dari persamaan yang mewakilinya, sebagai

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad ; n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

dengan L adalah panjang pipa, λ_n adalah panjang gelombang bunyi (jarak yang ditempuh bunyi selama satu getaran) dan n adalah bilangan bulat yang sering disebut sebagai ragam getaran dan bila $n = 1$ maka yang terjadi adalah nada dasar atau sebagai harmonik pertama.

Pada frekuensi tertentu, pola-pola gelombang sinusoidal dapat dihasilkan, frekuensi tersebut dinamakan frekuensi resonansi sistem. Pada pipa organa tertutup, (dimana salah satu ujungnya terbuka) frekuensi dasarnya adalah $v/4L$, dengan v adalah cepat

rambat gelombang bunyi di udara, sehingga harmoni yang ada hanya harmoni angka ganjil. (Gambar 2)



Gambar 2. Memperlihatkan pola gelombang simpangan tegak pada pipa organa tertutup saat nada dasar orde ganjil (1, 3, 5.....). (Tipler, 1991)

Pada pipa silindris dimana salah satu ujungnya tertutup dan ujung lainnya terbuka, maka pada ujung tertutup terjadi simpul simpangan dan pada ujung terbuka terjadi perut simpangan. Diandaikan panjang pipa adalah L , maka modus dasar getaran adalah $\lambda = 4L$ dan modus berikutnya adalah $3\lambda = 4L$, sehingga syarat frekuensi gelombang berdiri dapat dituliskan sebagai

$$f_n = n \frac{c}{4L} ; n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

dengan frekuensi alami sistem ini terjadi dalam rasio 1: 3: 5: 7 . . . , yang berarti bahwa harmonik genap hilang.

Dilain pihak kajian tentang energi, kerja, temperatur, pemanasan, dan konsep-konsep makroskopik dikenal sebagai termodinamika. Secara pengertian termodinamika adalah ilmu fisika yang membahas konversi energi termal menjadi usaha yang bermanfaat. Termodinamika mencakup pengetahuan dasar tentang suhu, kalor, dan sifat-sifat yang dipengaruhi oleh suhu dan kalor.

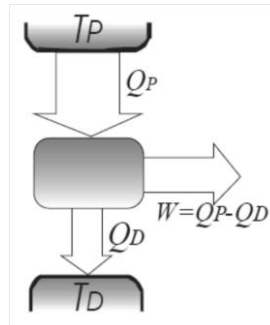
Sebagai contoh apabila kita letakkan benda panas dan benda dingin dalam keadaan kontak termal, maka temperatur dari benda panas menurun dan temperatur dari benda dingin meningkat sampai keduanya berada pada temperatur yang sama dan dua benda dikatakan berada dalam keadaan setimbang termal.

Dalam termodinamika hukum ke-nol menyebutkan bahwa jika dua buah benda bersinggungan berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem yang lain (benda ketiga), maka kedua sistem tersebut juga berada dalam kesetimbangan termal. Sedangkan apabila sejumlah gas terdapat dalam sebuah bejana silinder berpiston diberi kalor pada tekanan tetap maka sebagian kalor digunakan untuk menaikkan suhu gas (terjadi perubahan kecil tenaga internal sistem dU) dan sebagian lagi digunakan untuk melakukan kerja luar dW , yang secara umum dituliskan sebagai

$$dQ = dU + dW \quad (3)$$

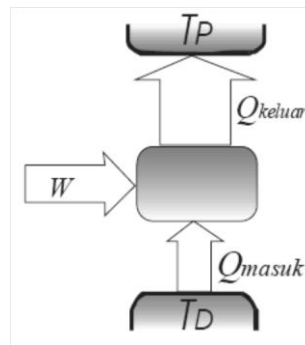
Persamaan 3, dikenal sebagai *Hukum Pertama Termodinamika*, yang intinya mengatakan bahwa energi bersifat kekal. Kerja dW mencakup semua jenis kerja mekanik, elektrik, dan magnetik.

Pada mesin kalor terdapat sebuah “sistem” yang dapat memberikan panas dalam jumlah besar dan lainnya dapat menyerap panas dalam jumlah besar pula, tanpa terjadi perubahan suhu yang berarti. Skema kerja mesin kalor dapat dilihat pada Gambar 3, dengan T_P dan T_D adalah suhu tandon panas dan dingin, sedangkan Q_P adalah kalor dari tandon panas dan Q_D adalah kalor menuju tandon dingin serta W adalah usaha mekanik.



Gambar 3. Mesin kalor menghasilkan kerja W dari kalor Q_P yang diserap dari tandon suhu tinggi T_P , membuang limbah kalor Q_D ke tandon yang bersuhu lebih rendah T_D .

Dilain pihak mekanisme kerja sistem termoakustik didasarkan pada operasi sistem pendingin atau pompa kalor. Gambar 4, memperlihatkan operasi dasar sebuah pendingin atau pompa kalor, dimana suatu kerja dari luar memindahkan kalor Q dari tandon (*reservoir*) suhu rendah T_D ke tandon suhu tinggi T_P dengan kerja W dilakukan oleh gelombang akustik berdiri dalam tabung resonator kedalam sistem.



Gambar 4. memperlihatkan operasi dasar sebuah pendingin atau pompa kalor, dimana suatu kerja W dari luar memindahkan kalor Q dari tandon (*reservoir*) suhu rendah T_D ke tandon suhu tinggi T_P .

Adapun komponen termoakustik mempunyai beberapa parameter yang kesemuanya berpengaruh pada kinerja piranti termoakustik, parameter tersebut antara lain adalah medium gas yang digunakan dalam tabung resonator, *stack*, resonator dan jenis gelombang yang digunakan. Resonator yang digunakan pada penelitian ini adalah resonator pipa silindris dengan satu ujung terbuka dan satu ujung lainnya tertutup, dengan frekuensi resonansi menurut persamaan (Setiawan, 2006)

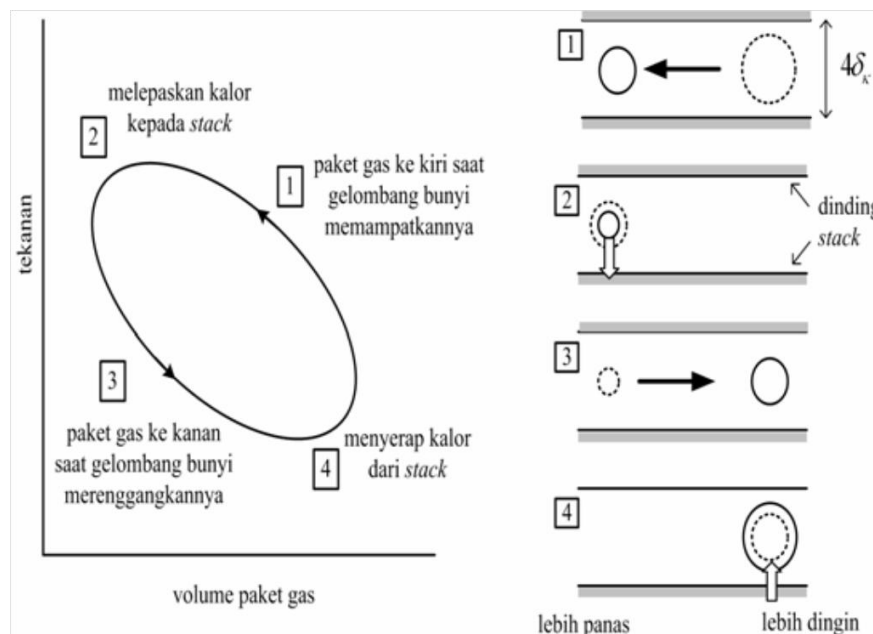
$$f_n = \frac{nv}{4\left(L + \frac{1}{2} \frac{4D}{3\pi}\right)} \quad (4)$$

dengan D adalah diameter tabung resonator.

Stack terbuat dari sejumlah permukaan-permukaan yang plat sejajar dengan sumbu tabung resonator, dan digunakan untuk menghasilkan gradien suhu di tabung. Satu hal yang menjadi kendala adalah jarak antar lapisan-lapisan *stack*. Faktor ini akan berpengaruh dalam proses termoakustik, jika jarak antar lapisan *stack* terlalu besar, maka gas tidak dapat memindahkan kalor secara efektif ke dan dari dinding *stack*. Jika lapisan-lapisan terlalu berdekatan akan menghambat gerak partikel-partikel gas. Adapun material *stack* harus mempunyai konduktifitas termal yang rendah dan kapasitas kalor yang lebih besar dibanding gas yang bekerja, sehingga suhu dalam *stack* tetap (Tijani, dkk, 2002).

Siklus proses pendinginan secara termoakustik dapat dilihat pada Gambar 5 saat gelombang akustik menyebabkan paket gas di dalam *stack* bergerak ke bagian panas, maka tekanan akan meningkat dan gas termampatkan. Paket gas yang termampatkan ini sekarang lebih panas dari dinding *stack* di dekatnya sehingga gas akan melepaskan kalor ke *stack* sehingga menyusutkan volume paket gas tersebut.

Saat gelombang berdiri melanjutkan siklusnya, paket gas ditarik kembali ke bagian yang tekanannya lebih rendah, paket gas menjadi lebih renggang dan lebih dingin dari pada dinding di sekitarnya, sehingga gas menyerap kalor dari dinding *stack* untuk mengembang. Siklus ini terus berulang dan efeknya adalah transfer kalor dari bagian dingin ke bagian panas *stack*.



Gambar 5. (a) Diagram P - V yang memperlihatkan empat tahap dalam siklus pendingin (*refrigerator*) termoakustik, (b) proses transfer kalor antara paket gas dan dinding *stack* (Russell dan Weibull, 2002).

3. Metodologi Penelitian

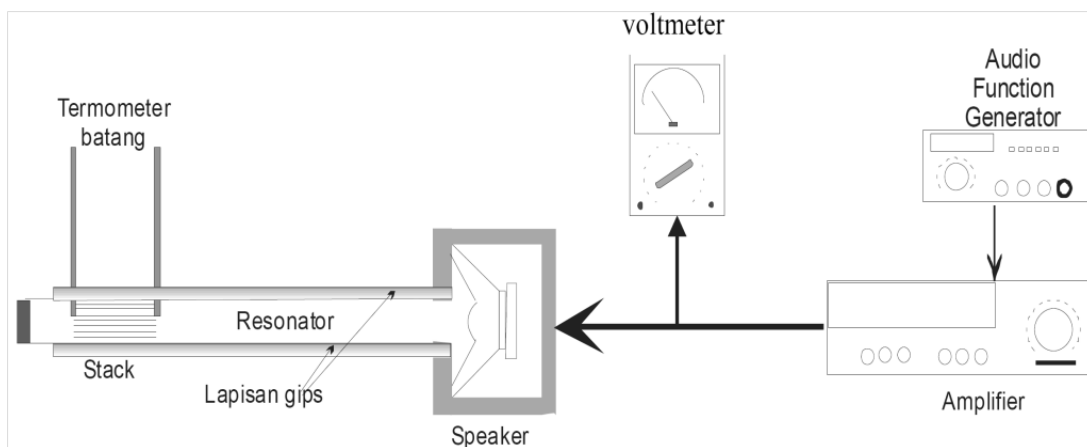
3.1 Alat yang digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1. Sistem sumber bunyi yang terdiri dari *Loudspeaker* (dan kotaknya) dari Woofer, ACR, Model : C 610 WH, Max. POWER : 60 watts, IMPEDANCE : 8 OHMS (1 buah), *Digital Audio Function Generator* (AFG) Model GFG-8016 G, *Power Amplifier*, Karaoke AV System, MV_8000 (MEGAFOX) dan Multimeter (AC), merek SANWA. 2. Sistem Deteksi Suhu yang terdiri dari dua buah termometer batang dan 3. Sistem Deteksi Bunyi yang terdiri dari MIC Kondensor + *Pre-Amp* + Kabel dan Komputer + *sound card* + perangkat lunak Winscope 2.51.

3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah 1. Tabung Resonator, terbuat dari pipa PVC berdiameter 4,6 cm dengan panjang 70 cm, 2. *Stack*, terbuat dari bahan plastik berdiameter : $2,13 \pm 0,05$ mm (isi ballpoint); $2,45 \pm 0,05$ mm (pembungkus kabel); $3,61 \pm 0,05$ mm (sedotan minuman air mineral kemasan gelas), dan $4,93 \pm 0,05$ mm (sedotan minuman), 3. Penutup tabung resonator terbuat dari bahan karet dan 4. Udara sebagai medium.

Skema susunan lengkap peralatan yang digunakan tertera pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema peralatan yang digunakan dalam penelitian termoakustik, dengan dua buah termometer sebagai pendeteksi suhu, ketika mencari beda suhu terbaik untuk 4 jenis diameter *stack* yang berbeda.

3.3 Menentukan frekuensi resonansi tabung resonator untuk penentuan diameter pori-pori *stack* optimal.

Untuk menentukan frekuensi resonansi dapat dilakukan dengan cara perhitungan (teori) menggunakan rumus (merupakan rumus frekuensi resonansi gelombang berdiri pada nada dasar harmonik pertama). Sedangkan secara eksperimen dilakukan dengan memberikan beberapa variasi frekuensi pada saat posisi *mic* (untuk deteksi bunyi) berada pada posisi $\lambda/20$ dari ujung tertutup. Pengamatan dilakukan pada *winscope* sebagai *spectrum analyzer*, yang akan memperlihatkan puncak-puncak spektrum bunyi

di dalam resonator. Frekuensi resonansi ditunjukkan pada saat *winscope* menunjukkan puncak sinyal keluaran tertinggi dengan tegangan input speaker di pasang pada posisi maksimal sebesar 15 volt dan variasi frekuensi disekitar frekuensi resonansi dengan kelipatan 1 Hz.

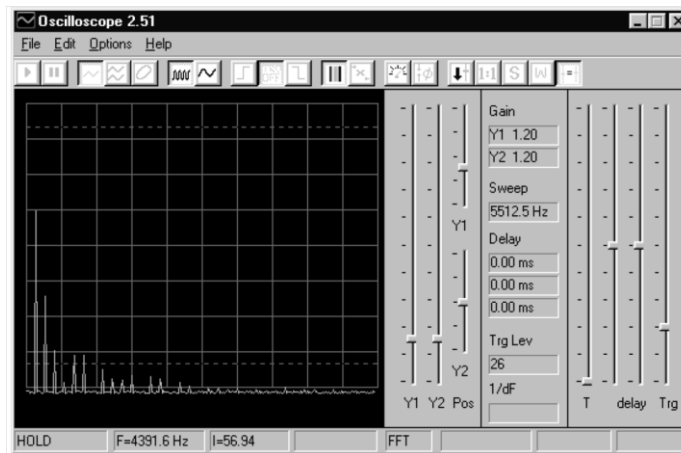
3.4 Menyelidiki pengaruh diameter pori-pori *stack* terhadap perbedaan suhu optimum yang dihasilkan

Untuk optimasi diameter pori-pori *stack* bahan plastik panjang 10 cm, dilakukan variasi menggunakan empat jenis diameter pori yang berbeda (2,13 mm; 2,45 mm; 3,61 mm dan 4,91 mm) dengan tegangan input speaker maksimal 15 volt dan pada frekuensi resonansi. Pada tiap jenis pori yang digunakan, perubahan suhu antara tandon panas dan tandon dingin diamati. Perbedaan suhu terbesar setelah 10 menit pengamatan dari tiap variasi diameter pori-pori *stack* menunjukkan diameter optimal. Demikian pula laju pendinginan dan pemanasan diamati dan dicatat tiap 1 menit dalam waktu 10 menit.

4. Hasil Dan Pembahasan

Dari penelitian menggunakan resonator tertutup dengan panjang tabung 70 cm, *stack* berbahan plastik dengan panjang 10 cm dan tegangan masukan speaker dibuat maksimal sebesar 15 volt, diperoleh gelombang sinyal keluaran serta spektrum bunyi menggunakan mikrofon dan *scope*. (Gambar 7)

Secara perhitungan menggunakan rumus didapatkan frekuensi resonansi untuk panjang tabung 69 cm adalah 122,5 Hz atau dengan pembulatan diperoleh frekuensi resonansi secara perhitungan 123 Hz.

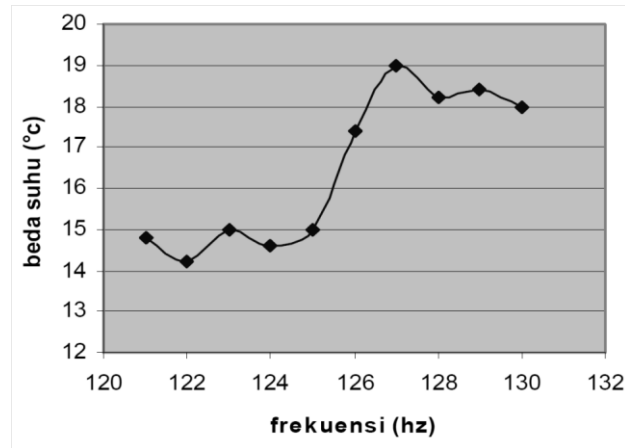


Gambar 7. Gelombang sinyal keluaran dan spektrum bunyi yang teramati pada *scope* pada beberapa frekuensi.

Dilain pihak secara eksperimen menggunakan *winscope* dapat dilakukan penentuan frekuensi resonansi ini dengan cara mengamati frekuensi pada intensitas terbesar dan didapat frekuensi resonansi sebesar 125 Hz ketika tanpa adanya *stack* dan pada 127 Hz menggunakan *stack*. Dengan adanya *stack* didalam tabung resonator akan terbentuklah dua buah daerah (tandon) di ujung ujung *stack*.

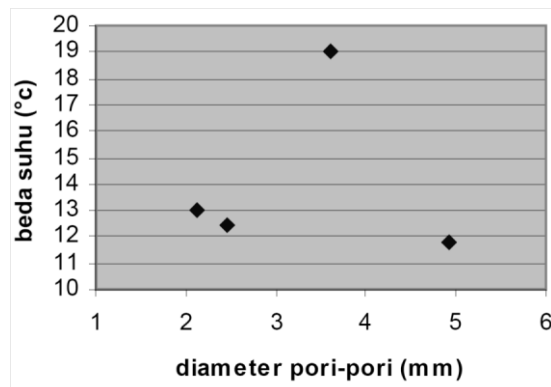
4.1 Pengaruh diameter pori-pori *stack* berbentuk lingkaran terhadap perbedaan suhu optimum yang dihasilkan

Penentuan diameter pori *stack* optimum didasarkan pada perbedaan suhu optimum yang dihasilkan dari masing-masing *stack* dan setelah diamati selama waktu tertentu diperoleh beda suhu antara tandon panas dengan tandon dingin (Gambar 8). Terlihat bahwa beda suhu optimum yang dihasilkan terjadi pada frekuensi 127 Hz dan menggunakan *stack* dengan diameter pori-porinya sekitar 3,61 mm. Hal ini sesuai bahwa kondisi beda suhu optimum terjadi pada frekuensi resonansi, dengan kata lain bahwa pada frekuensi resonansi transfer suhu paling optimum.



Gambar 8. Tipe grafik frekuensi vs beda suhu optimum yang dihasilkan, ketika diameter pori-pori *stack* sekitar 3,61 mm. (Cahyono, 2007)

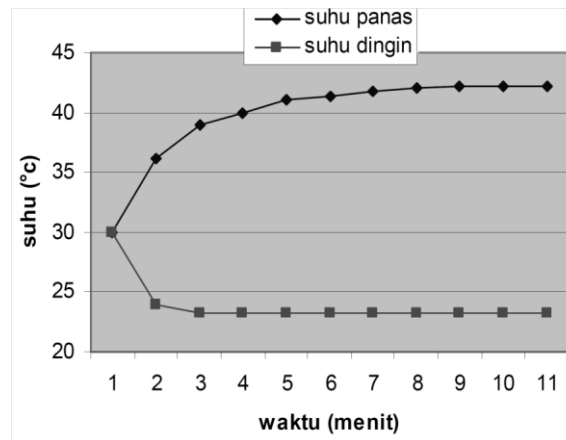
Dari empat variasi diameter pori-pori *stack* (2,13 mm; 2,45 mm; 3,61 mm dan 4,93 mm) (Gambar 9), didapatkan perbedaan suhu paling tinggi sebesar 19 °C pada saat diameter pori *stack* sebesar 3,61 mm dengan kenaikan suhu sebesar 12,2 °C dan penurunan suhu 6,8 °C saat beroperasi pada frekuensi 127 Hz (Gambar 10).



Gambar 9. Grafik diameter pori-pori *stack* (mm) vs beda suhu (°C) pada frekuensi 127 Hz. (Cahyono, 2007)

Perbedaan suhu antara ke dua tandon terbentuk disebabkan oleh adanya transfer kalor, dimana transfer kalor dipengaruhi oleh gerak osilasi dari molekul udara dalam gelombang bunyi. Dengan adanya transfer kalor dari tandon satu ke tandon yang lain, akan terbentuklah tandon dingin bagi yang berkurang kalornya dan tandon panas bagi yang bertambah kalornya. Dalam hal ini kecepatan molekul udara untuk mentransfer

kalor dipengaruhi oleh frekuensi resonansi sehingga dapat dikatakan bahwa frekuensi resonansi mempengaruhi perbedaan suhu yang timbul dari kedua tandon.



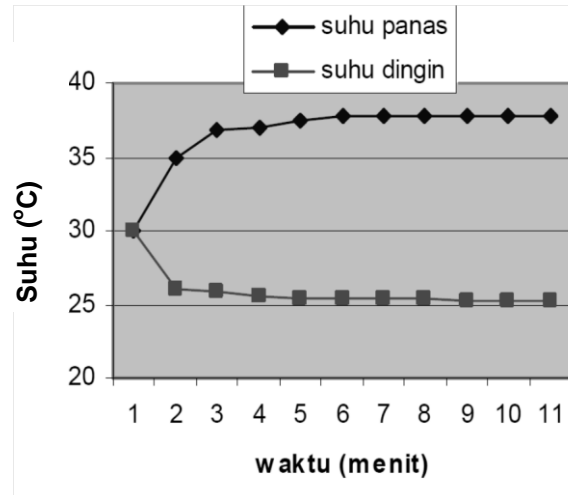
Gambar 10. Grafik suhu tandon panas dan tandon dingin pompa kalor termoakustik, saat frekuensi 127 Hz dengan *stack* yang berdiameter porinya 3,61 mm. (Cahyono, 2007)

Dari hasil yang didapat bisa dikatakan bahwa untuk *stack* dengan karakter pori-porinya berbentuk lingkaran transfer kalor paling efektif terjadi pada diameter 3,61 mm pada frekuensi resonansi 127 Hz. Untuk *stack* dengan diameter 2,13 mm, 2,45 mm dan 4,93 mm perbedaan suhu yang dihasilkan lebih rendah dari pada saat diameter pori 3,61 mm. Hal ini terjadi karena pada diameter 4,93 mm rongga pori terlalu besar sehingga gas tidak dapat memindahkan kalor secara efektif ke dan dari dinding *stack*. Begitu pula untuk *stack* dengan diameter 2,13 mm dan 2,45 mm rongga pori *stack* terlalu berdekatan sehingga gerak partikel partikel gas sedikit terhambat.

Sebelumnya Susilowati (2006) melakukan penelitian mengenai optimalisasi jarak antar lapisan *stack* dan telah memperoleh jarak antar lapisan *stack* optimum sebesar 0,88 mm bentuk spiral (lapisan yang digulung). Akan tetapi bentuk *spiral* memberikan penyebaran ujung *stack* yang tidak begitu merata. Sedangkan pada penelitian ini pola pori-pori *stack* dapat menyebar merata dipermukaan ujung *stack* dengan pori berbentuk lingkaran.

4.2 Laju pendinginan dan pemanasan udara untuk diameter pori *stack* optimum.

Laju pendinginan dan pemanasan menggambarkan seberapa besar suhu yang naik (tandon panas) dan suhu yang turun (tandon dingin) setelah 10 menit pengoperasian. (Gambar 11)



Gambar 11. Grafik laju pendinginan dan pemanasan suhu tandon panas dan tandon dingin pompa kalor termoakustik, saat frekuensi 122 Hz dengan *stack* yang berdiameter porinya 2,13 mm

Dari data yang diperoleh bahwa laju kenaikan suhu lebih besar dari pada laju penurunan suhu. Hal ini terjadi karena pemanasan terjadi pada tandon yang volumenya lebih kecil dari pada volume tandon dingin, sehingga tekanannya juga semakin besar. Karena tekanan besar akibat gas yang bertambah tenaga kinetiknya akan menyebabkan suhu naik dengan cepat. Untuk laju pendinginan yang terletak pada tandon dingin, volumenya lebih besar maka tekanannya lebih kecil dan penurunan suhunya tidak begitu cepat bila dibandingkan dengan tandon panas.

Pada dasarnya kalor yang ditambahkan ke tandon panas sama dengan kalor yang diambil dari tandon dingin, akan tetapi karena adanya perbedaan besar volume ruang masing-masing tandon sehingga distribusi kalornya pun berbeda.

5. Kesimpulan Dan Saran

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa: diameter pori-pori *stack* mempengaruhi besar kecilnya nilai perbedaan suhu antara bagian panas dan bagian dingin dan diperoleh diameter pori-pori *stack* optimum adalah pada diameter 3,61 mm dengan perbedaan suhu 19 °C antara bagian yang panas dan dingin.

5.2 Saran

Pada dasarnya untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat mengenai diameter optimum pori-pori *stack*, perlu dilakukan penelitian dengan variasi diameter pori yang lebih banyak. Disamping perlunya dilakukan penelitian dengan menggunakan *stack* diameter pori lingkaran untuk beberapa variasi panjang *stack* dan panjang tabung resonator.

Daftar Pustaka

- Anonim 1, 2007, *Thermoacoustics Heat Pump for Upgrading Industrial Waste Heat*, diakses tanggal 5 Agustus 2007, di http://www.ecn.nl/eei/research/waste_heat/tahp/application.en.html.

- Anonim 2, 2007, *What is Thermoacoustics*, diakses pada tanggal 5 Agustus 2007, di <http://www.lanl.gov/projects/thermoacoustics/>
- Anonim 3, 2007, *First International Workshop on Thermoacoustics*, diakses tanggal 5 Agustus 2007, di <http://www.phys.tue.nl/lt/workshop/workshop.html>
- Biwa, T., Yashirc, Y., Kozuka, M., Yazaki, T. dan Mizutani, U., 2004, Experimental demonstration of thermoacoustic energy conversion in a resonator, *Phys. Rev. E* 69, 066304.
- Cahyono A, 2007, Analisa Perbandingan Kinerja Pompa Kalor Termoakustik pada Frekuensi Harmonik orde 1, 3, 5, dan 7 untuk *stack* Berpori Lingkaran, Skripsi, Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Elyanita, M.S., 2006. Pengaruh Variasi Frekuensi dan Posisi Stack Bahan Kardus Terhadap Perubahan Suhu pada Sistem Termoakustik, Skripsi, Jurusan Fisika, FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Russell, D.A. dan Weibull, P., 2002, Tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstration, *Am. J. Phys.* 70, 1231-1233.
- Sampurna, D, 2006, Studi Eksperimen Untuk Mengetahui Pengaruh Diameter Tabung Resonator Terhadap Kinerja Piranti Termoakustik, Skripsi, Jurusan Fisika, FMIPA,UGM.
- Setiawan, I., Agung, B.S.U., dan Andi, R.W., 2005, *Rancang Bangun Piranti Termoakustik Sebagai Pendingin dan Pemanas Udara Secara simultan*, Laporan Penelitian antar Bidang Ilmu, FMIPA-UGM.
- Setiawan, I., 2006, Pengaruh Dimensi Resonator Terhadap Kinerja Piranti Pendingin Termoakustik, Lab Atom-Inti FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Setiawan, I., Agung, B.S.U., Maruto, G, dan Andi, R.W., 2007, *Rancang Bangun Piranti Termoakustik Sebagai Pemompa Kalor*, *SIGMA* Jurnal Sains dan Teknologi Vol 10 no.1, Yogyakarta.
- Susilowati, 2006, Optimalisasi Jarak antar Lapisan / Dinding Stack dan Penukar Kalor Terhadap Perbedaan Suhu pada Pompa Kalor Termoakustik, Skripsi S-1 Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Swift, G. W., 1995, Thermoacoustic engines and refrigerators, *Phys. Today* 48, 22-28.
- Swift, G. W., 2002, *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Los Alamos National Laboratory, Acoustical Society of America Publications.
- Tijani, M.E.H., 2001, *Loudspeaker-driven thermo-acoustic*, Technische Universiteit Eindhoven.
- Tijani, M.E.H., Zeegars, J.C.H dan Waele, T.A.M., 2002, The optimal stack spacing for Thermoacoustic Refrigerator, *J Acoust. Soc. Am.* 112, 128-130
- Tipler, P.A., 1991, *Fisika untuk Sains dan Teknik*, Jilid 1, Edisi Ketiga, Erlangga, Jakarta.
- Wagiyanti, 2006, Kajian Pengaruh Panjang Stack dan Panjang Alumunium Foil pada Stack Terhadap Perbedaan Suhu pada Kinerja Pompa Kalor Termoakustik, Skripsi, Jurusan Fisika, FMIPA-UGM.
- Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G. W., dan Migliori, A., 1985., Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines, *Am. J. Phys* 53, 147-162.
- Wu, F., Wu, C., Guo F., Li, Q. dan Chen, L., 2003, Optimization of a thermoacoustik engine With a complex heat transfer exponent, *Entropy* 5, 444-451