

## Pembuatan dan Pengujian *Prime Mover* Termoakustik

### Tipe Gelombang Tegak

Ikhsan Setiawan<sup>1, a\*</sup>, Prastowo Murti<sup>2</sup>, Agung B S Utomo<sup>1</sup>, Wahyu N Achmadin<sup>1</sup>,  
Makoto Nohtomi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara BLS 21,  
Yogyakarta 55281, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jl. Teknika Utara,  
Yogyakarta 55281, Indonesia

<sup>3</sup>Graduate School of Environment and Energy Engineering, Waseda University, Nishi-tomita 1011, Honjo-shi, Saitama pref., Japan

<sup>a</sup>ikhsan\_s@ugm.ac.id

### Abstrak

*Prime mover* termoakustik adalah alat/mesin pengkonversi energi termal menjadi energi gerak dalam wujud osilasi akustik (bunyi). Ia bersifat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan gas-gas buang dan dapat menggunakan berbagai sumber energi termal seperti sinar matahari dan limbah kalor (*waste heat*) sebagai sumber energi inputnya. Makalah ini memaparkan tentang pembuatan dan pengujian sebuah *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak. *Prime mover* termoakustik ini terdiri dari sebuah tabung resonator tertutup, sebuah *stack*, dan dua buah penukar kalor (*heat exchanger, HX*). Resonator terbuat dari pipa-pipa baja antikarat dengan panjang total 128 cm dan berisi udara bebas (tekanan atmosfer, suhu kamar). *Stack* dengan panjang 4 cm dibuat dari susunan rapat lembaran-lembaran kasa kawat (*wire mesh*) baja antikarat (*stainless-steel*) dengan nomor kasa 14 dan diletakkan di dalam resonator dengan jarak 15 cm dari salah satu ujung resonator. Penukar kalor panas (*hot HX*) dan penukar kalor lingkungan (*ambient HX*) masing-masing dipasang pada kedua ujung *stack* untuk menyediakan gradien suhu yang besar sepanjang *stack*. Sebuah alat pemanas listrik dengan daya maksimum 400 W dipasang pada penukar kalor panas untuk memberikan energi termal kepada *prime mover*. Suhu-suhu dan tekanan-tekanan dinamik di dalam resonator masing-masing diukur dengan menggunakan termokopel-termokopel tipe-K dan transduser-transduser tekanan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya input minimum alat pemanas yang diperlukan agar *prime mover* ini dapat membangkitkan gelombang bunyi adalah 225 W. Pengujian selanjutnya, dengan daya input 353 W, memberikan hasil-hasil sebagai berikut: Beda suhu *onset* sebesar 260 °C, dan waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi *onset* adalah 6 menit. Gelombang bunyi yang dihasilkan memiliki frekuensi 142 Hz dan amplitudo tekanan sekitar 5,1 kPa. Daya akustik yang dihasilkan adalah sekitar 5 W, sehingga diperoleh efisiensi termal-akustik sekitar 1,4%. Hasil-hasil tersebut mengindikasikan bahwa pembuatan *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak ini telah berhasil dengan baik. Upaya optimasi perlu dilakukan untuk dapat meningkatkan efisiensinya.

Kata kunci: *Prime mover*, termoakustik, gelombang tegak

### Pendahuluan

Termoakustika merupakan sebuah bidang kajian tentang interaksi antara kalor dan

bunyi, yaitu tentang konversi energi termal menjadi energi akustik dan sebaliknya yaitu konversi energi bunyi menjadi energi termal.

Alat atau perangkat yang mengkonversi energi termal menjadi energi akustik disebut *prime mover* termoakustik (*thermoacoustic prime mover*), sedangkan perangkat yang memompa kalor dari tandon kalor suhu rendah ke tandon kalor suhu tinggi disebut pompa kalor termoakustik (*thermoacoustic heat pump*) atau alat pendingin termoakustik (*thermoacoustic heat pump*).

Perangkat-perangkat termoakustik telah menarik minat dan perhatian para peneliti dalam beberapa tahun belakangan ini karena perangkat-perangkat tersebut bersifat ramah lingkungan, memiliki struktur yang sederhana dan daya tahan yang tinggi sehingga dapat dibuat dan dirawat dengan cukup mudah dan biaya yang relatif murah. Secara khusus, pengoperasian *prime mover* termoakustik dapat menggunakan energi termal matahari [1,2] atau limbah kalor (*waste heat*) [3] sebagai sumber energi termal input, dan tidak menghasilkan gas-gas buang seperti karbon dioksida yang dihasilkan oleh mesin-mesin konvensional. Di sisi lain, alat pendingin termoakustik dapat menggunakan gas-gas *inert*, seperti udara dan gas-gas mulia, sebagai zat kerja (*working medium*) [4] sehingga tidak berbahaya terhadap lingkungan, tidak seperti alat-alat pendingin konvensional yang menggunakan *chloro-fluoro-carbons* (CFCs) atau *hydro-flouro-carbons* (HFCs) yang berpotensi merusak lapisan ozon di atmosfer dan bersifat sebagai gas rumah kaca.

Di samping banyak keunggulannya, *prime mover* termoakustik memiliki kekurangan, yaitu secara umum efisiensinya rendah. Sejauh ini, efisiensi termal *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak (*standing wave*) umumnya terbatas hingga 20% [5,6]. Hal tersebut terjadi karena perangkat-perangkat tersebut bekerja dengan siklus termodinamik yang secara intrinsik bersifat tak-reversibel. Efisiensi termal yang lebih tinggi hingga 30%, yaitu setara dengan efisiensi mesin-mesin konvensional, telah dicapai oleh *prime mover* termoakustik tipe gelombang berjalan (*traveling wave*) yang dibuat oleh Backhauss dan Swift [6], namun strukturnya tidak lagi sederhana. Perangkat-perangkat termoakustik tipe gelombang berjalan beroperasi dengan

siklus Stirling yang secara inheren bersifat reversibel.

Meskipun *prime mover* termoakustik secara umum memiliki efisiensi termal yang rendah, kemampuan mesin-mesin tersebut bekerja dengan menggunakan limbah kalor atau kalor-kalor yang berkualitas rendah lainnya membuat penerapan *prime mover* termoakustik menjadi menarik dan menguntungkan untuk meningkatkan efisiensi sistem-sistem termal secara keseluruhan. *Prime mover* termoakustik biasanya diaplikasikan untuk membangkitkan energi listrik dengan cara menggabungkannya dengan sebuah alternator linear [7,8]. Selain itu, apabila *prime mover* termoakustik dikombinasikan dengan alat pendingin termoakustik, maka kita dapat memperoleh sebuah sistem pendingin tanpa bagian-bagian yang bergerak (*no moving parts*) [9,10].

Penelitian-penelitian tentang *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak di dunia masih terus dilakukan. Salah satu penelitian terbaru yang dipublikasikan pada tahun 2015 ini telah dilakukan oleh Hariharan dkk [11]. Mereka mempelajari kinerja *prime mover* termoakustik dengan menvariaksi panjang resonator, panjang *stack*, dan ketebalan plat *stack*. Contoh lain dari publikasi-publikasi terbaru tentang *prime mover* termoakustik telah ditulis oleh Normah dkk [12] dan Hao dkk [13]. Normah dkk mengembangkan sebuah mesin termoakustik yang portabel yang mengkonversi energi termal dari proses pembakaran menjadi daya akustik. Mereka menggunakan obor propana sebagai model sumber kalor dari pembakaran biomassa. Hao dkk secara eksperimen mempelajari tentang pengaruh fluida-fluida kerja yang berbeda terhadap kinerja sebuah *prime mover* termoakustik “kembar” pada berbagai tekanan operasi, kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil simulasi sistem tersebut dengan menggunakan perangkat lunak DeltaEC (*Design Environment for Low-amplitude Thermo-Acoustic Energi Conversion*) [14].

Makalah ini memaparkan tentang rancangan bangun sebuah *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak serta pengujianya secara eksperimen. Dalam bab selanjutnya, prinsip-prinsip dasar *prime mover* termoakustik tipe

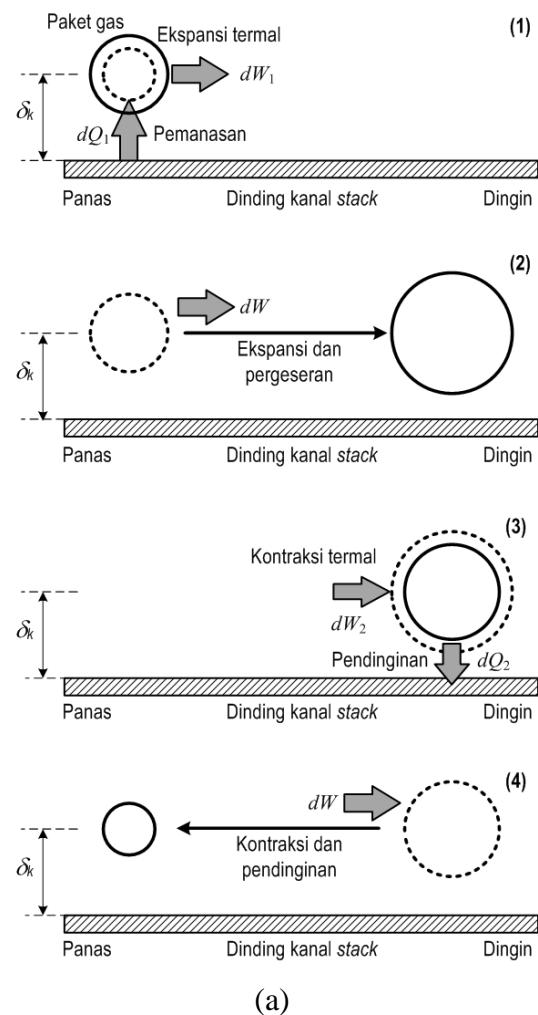
gelombang tegak disajikan. Setelah itu, pilihan desain dan pembuatan mesin termoakustik tersebut, mencakup *stack*, penukar kalor (*heat exchanger, HX*), dan resonator, diuraikan bersama-sama dengan penjelasan tentang peralatan eksperimen dan susunannya. Berikutnya hasil-hasil eksperimen ditampilkan dan dibahas, dan diakhiri dengan beberapa kesimpulan.

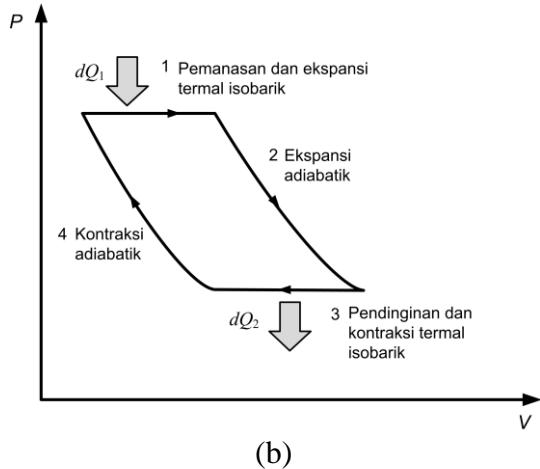
### **Prinsip-Prinsip Dasar *Prime mover* Termoakustik Tipe Gelombang Tegak**

Sebuah *prime mover* termoakustik terdiri sebuah tabung resonator, *stack*, gas kerja, dan dua buah penukar kalor. Tabung resonator diisi dengan sebuah gas kerja, seperti udara, gas mulia, atau gas-gas *inert* lainnya. *Stack* adalah medium berpori tempat proses konversi energi termoakustik terjadi. *Stack* diapit oleh penukar kalor panas (*hot HX*) dan penukar kalor lingkungan (*ambient HX*). Gabungan *stack* dan dua buah penukar kalor tersebut diletakkan di dalam tabung resonator di dekat salah satu ujungnya, dengan sisi panas *stack* berdekatan dengan ujung resonator tersebut. Kedua penukar kalor akan memberikan gradien suhu yang besar sepanjang *stack* searah sumbu resonator. Gradien suhu tersebut diperlukan agar proses konversi energi secara termoakustik dapat terjadi. Beda suhu minimum antara kedua ujung *stack* yang diperlukan untuk memulai osilasi spontan gas kerja (yaitu dimulainya pembangkitan gelombang bunyi) disebut beda suhu *onset* ( $\Delta T_{onset}$ ).

Proses pembangkitan gelombang bunyi dapat dijelaskan dengan baik dengan mengikuti hal-hal yang terjadi pada sebuah paket gas di dalam sebuah kanal (saluran) di dalam *stack* (dalam cara pandang Lagrangian makroskopik), sebagaimana diperlihatkan secara skematis oleh Gambar 1(a) [11][15]. Dalam hal ini sisi panas berada di sebelah kiri, sisi dingin di sebelah kanan, dan pusat paket gas dianggap berjarak sejauh satu kedalaman penetrasi termal ( $\delta_k$ ) di dalam gas kerja. Dengan mengirim kalor kepada penukar kalor panas, gas di sisi kiri mengalami pemanasan yang mengakibatkan terjadinya peningkatan energi kinetik molekul-molekul gas dan terjadinya ekspansi termal paket gas. Dalam

langkah ke-1 ini, paket gas menyerap kalor  $dQ_1$  dan mengalami ekspansi termal. Dalam hal ini, usaha  $dW_1$  dilakukan oleh paket gas. Kemudian pada langkah ke-2, paket gas yang panas ini menyebar ke kanan karena proses ekspansi dan karena di dekat ujung sebelah kiri *stack* terdapat ujung tertutup resonator. Hal ini menyebabkan daerah di sisi panas menjadi bertekanan rendah. Pada langkah ke-2 ini usaha  $dW$  dilakukan oleh paket gas. Selanjutnya pada langkah ke-3, yaitu ketika paket gas telah berada di sisi kanan, paket gas tersebut lebih panas daripada dinding kanal *stack*, sehingga paket gas melepaskan kalor  $dQ_2$  kepada dinding, dan oleh karena itu paket gas mengalami pendinginan dan kontraksi termal. Dalam hal ini usaha  $dW_2$  dilakukan pada paket gas. Berikutnya dalam





Gambar 1. (a) Empat langkah yang dijalani oleh paket gas dalam satu siklus. (b) Skema diagram  $P$ - $V$  siklus Brayton.

langkah ke-4, paket gas bergerak kembali ke sisi panas dan mengisi daerah yang bertekanan rendah tadi, dan oleh karena itu paket gas mengalami kompresi dan usaha  $dW$  dilakukan pada paket gas. Paket gas kemudian akan mengalami pemanasan lagi (langkah ke-1), dan proses-proses peningkatan energi kinetik dan ekspansi termal dimulai kembali. Ekspansi termal paket gas pada tekanan tinggi dan kontraksi termal pada tekanan rendah terjadi berulang-ulang, dan hal ini menghasilkan usaha netto  $dW_1 - dW_2$  yang dilakukan oleh paket gas berupa muculnya gelombang bunyi. Daya akustik akan dihasilkan apabila gradien suhu sepanjang *stack* terus dipertahankan. Proses siklis yang dijalani oleh paket gas dapat didekati oleh siklus Brayton, yaitu siklus yang terdiri dari dua langkah adiabatik reversibel dan dua langkah transfer kalor isobarik tak-reversibel, sebagaimana ditunjukkan secara skematis dalam diagram tekanan-volume ( $P$ - $V$ ) oleh Gambar 1(b) [16].

Salah satu hal penting dalam pengoperasian perangkat termoakustik tipe gelombang tegak adalah bahwa paket-paket gas harus berada pada jarak sekitar satu kedalaman penetrasi termal ( $\delta_k$ ) dari dinding kanal *stack*. Paket-paket gas tersebut memiliki kontak termal yang cukup baik dengan dinding kanal untuk dapat saling mempertukarkan kalor, tetapi pada saat bersamaan, paket-paket gas tersebut memiliki kontak termal yang kurang baik sedemikian sehingga memberikan waktu

tunda yang sesuai antara gerak dan transfer kalor [15]. Kedalaman penetrasi termal dapat dihitung dengan rumus berikut: [17]

$$\delta_k = \sqrt{2\alpha/\omega} \quad (1)$$

dengan  $\alpha$  adalah difusivitas termal gas kerja dan  $\omega$  adalah frekuensi anguler gelombang bunyi. Di lain pihak, paket-paket gas yang berada lebih jauh lagi dari dinding kanal tidak merasakan kontak termal dengan dinding kanal dan hanya mengalami kompresi dan ekspansi secara adiabatik ketika dilalui oleh gelombang bunyi.

Agar persyaratan tersebut di atas dapat dipenuhi, maka ukuran kanal *stack* yang tepat harus dipilih. Untuk melakukan hal ini, nilai parameter  $\omega\tau$  perlu ditinjau, dengan  $\tau$  adalah waktu relaksasi termal pada penampang lintang kanal *stack* yang diungkapkan sebagai

$$\tau = r_h^2/2\alpha \quad (2)$$

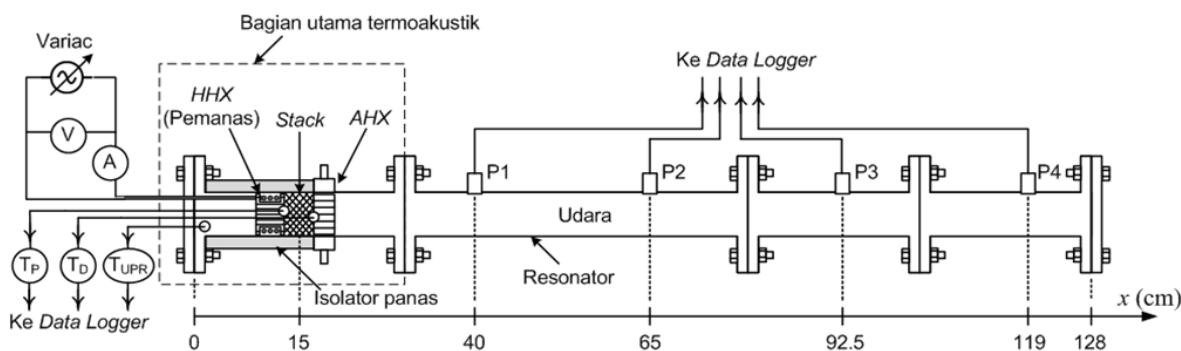
dengan  $r_h$  adalah jejari hidrolik kanal *stack*. Apabila  $\omega\tau \ll 1$ , gas di dalam kanal akan bergerak secara reversibel dan suhunya selalu sama dengan suhu dinding lokal, sedangkan apabila  $\omega\tau \gg 1$ , maka gerak gas bersifat isentropik tetapi secara pendekatan masih bersifat reversibel. Osilasi gas secara termodinamik bersifat irreversibel sebagai akibat dari adanya transfer kalor tak sempurna ke dinding kanal ketika  $\omega\tau \sim 1$  [18]. Dari Pers. (1) dan Pers. (2), diperoleh ungkapan parameter  $\omega\tau$  sebagai

$$\omega\tau = (r_h/\delta_k)^2. \quad (3)$$

Mengingat persyaratan kontak termal tak sempurna tersebut di atas antara paket gas dan dinding kanal *stack* dalam perangkat termoakustik tipe gelombang berdiri, maka kita perlu memilih atau membuat *stack* dengan ukuran pori-pori yang memiliki jejari hidrolik seorde dengan kedalaman penetrasi termal sehingga memberikan  $\omega\tau \sim 1$ .

## Pemilihan Desain dan Pembuatan *Prime mover* Termoakustik

Diagram skematik *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak dengan resonator lurus dan tertutup yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2. Di dalam resonator terdapat sebuah *stack*, penukar kalor panas (*HHX*), penukar kalor lingkungan (*AHX*), dan udara biasa dengan tekanan atmosfer (1 atm) dan suhu kamar (27 °C). Pada tekanan dan suhu tersebut, cepat rambat bunyi (*a*) di udara adalah sekitar 348 m/s.



Gambar 2. Skema diagram *prime mover* termoakustik. *HHX* dan *AHX* masing-masing adalah penukar kalor panas dan penukar kalor lingkungan.  $T_P$ ,  $T_D$ , dan  $T_{UPR}$  adalah termokopel-termokopel, dan  $P_1$ - $P_4$  adalah transduser-transducer tekanan. Resonator berisi udara biasa (1 atm, 28 °C).

gelombang akustik tegak di dalamnya. Frekuensi dasar gelombang bunyi di dalam resonator tersebut diperkirakan dengan menggunakan persamaan  $f_1 = a/2L_{reso}$  yang memberikan nilai frekuensi dasar sekitar 136 Hz. Selanjutnya, dengan menggunakan nilai frekuensi ini dan nilai-nilai besaran-besaran udara pada tekanan 1 atm dan suhu 27 °C, serta dengan menggunakan Pers. (1), diperoleh bahwa nilai kedalaman penetrasi termal di udara pada kondisi tersebut di dalam resonator adalah sebesar 0,23 mm.

*Stack* diletakkan di dalam resonator sejauh 15 cm dari ujung kiri resonator, seperti dapat dilihat dalam Gambar 2. *Stack* dibuat dari tumpukan yang rapat lembaran-lembaran kasa kawat (*wire mesh*) baja antikarat sedemikian sehingga panjang *stack* mencapai 4 cm. Dipilih kasa kawat dengan nomor kasa (*mesh number*) (*n*) 14 yang memiliki diameter kawat ( $D_{kw}$ ) sebesar 0,32 mm, sehingga kita punya  $\omega\tau \sim 1$ , sebagaimana akan diperlihat-

kan berikut ini. Jejari hidrolik *stack* diperkirakan dengan menggunakan persamaan [17]

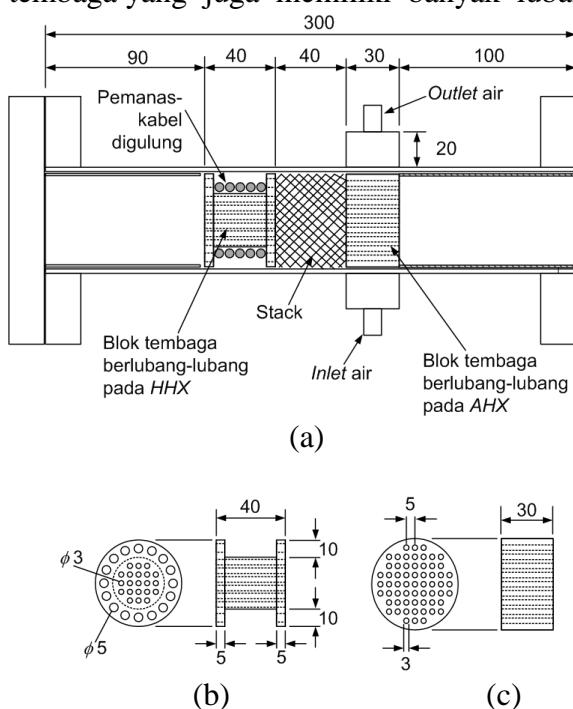
$$r_h = D_{kw} \frac{\phi}{4(1-\phi)}, \quad (4)$$

dengan  $\phi$  adalah porositas *stack* yang ditaksir dengan menggunakan persamaan  $\phi = 1 - (\pi n D_{kw}/4)$ , sehingga diperoleh  $\phi = 0,86$  dan  $r_h = 0,50$  mm. Selanjutnya, digunakan sebuah model pendekatan yang telah teruji untuk *stack* kasa kawat, yaitu larik (*array*) tabung-tabung berpenampang lingkaran. Dalam model ini, jejari penampang tabung diwakili oleh besaran yang disebut jejari lingkaran efektif ( $r_{ef}$ ) [19], yang diungkapkan sebagai

$$r_{ef} = \sqrt{\frac{r_h D_{kw}}{2}}. \quad (5)$$

Jejari efektif  $r_{ef}$  ini tidak lain adalah jejari hidrolik dari *stack* larik tabung-tabung berpe-

nampang lingkaran. Untuk *stack* yang digunakan dalam penelitian ini, nilai jejari efektifnya adalah 0,28 mm. Dengan demikian, untuk *prime mover* termoakustik yang dibuat pada penelitian ini kita punya  $\omega\tau = 1,5$ . Diagram skematis yang lebih rinci menge-nai bagian utama termoakustik diperlihatkan oleh Gambar 3(a). Di sebelah kiri *stack*, penu-kar kalor panas (*HHX*) terdiri sebuah alat pemanas listrik berupa kabel (kawat) fleksibel yang terbungkus (*sheathed flexible cable heater*) dan sebuah inti berupa blok tembaga yang berlubang-lubang. Alat pemanas tersebut (model 2M-2-400) memiliki daya input maksimum 400 W dan digulung pada blok tembaga. Blok tembaga, yang secara skematis diperlihatkan oleh Gambar 3(b), memiliki banyak lubang kanal kecil yang memungkinkan gas berosilasi di sepanjang kanal-kanal tersebut. Penukar panas ini akan menyalurkan kalor kepada *prime mover* termoakustik. Daya input alat pemanas diatur dengan menggunakan *variac* dan dihitung dari perkalian tegangan dan arus listrik yang masing-masing diukur dengan voltmeter V dan amperemeter A. Di sisi kanan *stack* dipasang sebuah blok tembaga yang juga memiliki banyak lubang



Gambar 3. Skema diagram: (a) Bagian utama termoakustik, (b) blok tembaga pada *HHX*,

dan (c) blok tembaga pada *AHX*. Satuan ukuran dalam milimeter (mm).

kanal kecil, seperti diperlihatkan secara skematis oleh Gambar 3(c). Di sebelah luarnya, dipasang sebuah sistem *inlet-outlet* air yang dialirkan dari dan ke sebuah tandon air, seperti tampak pada Gambar 3(a). Gabungan blok tembaga dan sistem *inlet-outlet* air tersebut membentuk sebuah penukar kalor ling-kungan (*AHX*). Selain itu, dua buah pipa tipis baja antikarat yang diletakkan di dalam pipa resonator digunakan untuk menahan *stack* dan kedua blok tembaga agar tetap berada di tempatnya.

Dua buah termokopel tipe-K (model T35105)  $T_P$  dan  $T_D$  masing-masing digunakan untuk mengukur suhu ujung panas dan suhu ujung dingin pada *stack*. Suhu di ujung kiri resonator (ujung panas resonator) diukur dengan termokopel tipe-K lainnya,  $T_{UPR}$ . Tekanan-tekanan dinamik gelombang bunyi di dalam resonator di empat lokasi yang berbeda diukur dengan menggunakan transduser-transduser tekanan Kyowa model PGM-10KH. Lokasi pemasangan transduser-transduser tekanan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Termokopel-termokopel dan transduser-transduser tekanan dihubungkan dengan sebuah data logger yang dikendalikan dengan sebuah komputer.

### Pengujian Prime Mover Termoakustik

*Prime mover* termoakustik yang telah dibuat dioperasikan dengan cara menyalurkan energi termal (kalor) kepada mesin termoakustik melalui penukar kalor panas dengan daya input tertentu. Diamati nilai daya input minimum yang diperlukan oleh mesin termoakustik untuk dapat menghasilkan gelombang bunyi. Diamati juga besar suhu sisi panas ( $T_P$ ) dan suhu sisi dingin ( $T_D$ ) *stack* ketika terjadi *onset*, yaitu saat awal terjadinya pembangkitan gelombang bunyi. Dari sini, beda suhu *onset* ( $\Delta T_{onset}$ ) dapat diketahui. Selain itu, amplitudo tekanan gelombang bunyi yang dihasilkan dicari melalui sinyal tekanan dinamik yang dideteksi oleh transduser tekanan, sedangkan frekuensi gelombang bunyi ditentukan dari spektrum frekuensi yang diperoleh dengan transformasi Fourier cepat (*fast*

*Fourier transform, FFT* dari sinyal osilasi tekanan gelombang bunyi yang dihasilkan.

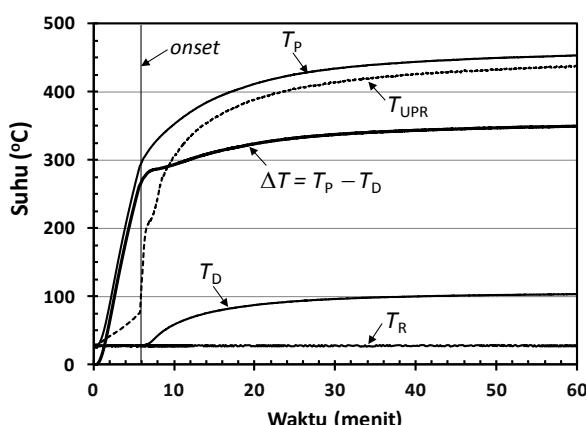
### Hasil dan Pembahasan

Sebagai hasil dari pengujian awal, ditemukan bahwa daya input minimum yang diperlukan oleh *prime mover* termoakustik ini untuk dapat membangkitkan gelombang bunyi adalah 225 W.

Pada pengujian selanjutnya, digunakan daya input sebesar 353 W, dan diperoleh hasil seperti tampak pada Gambar 4, yaitu hasil pengukuran suhu-suhu sebagai fungsi waktu. Terlihat bahwa mula-mula suhu ujung panas  $T_P$  meningkat dengan cepat, sedangkan suhu ujung panas resonator  $T_{UPR}$  meningkat secara lambat. Di sisi lain, suhu ujung dingin  $T_D$  tetap pada nilai yang sama dengan suhu ruangan  $T_R$ , sehingga beda suhu antara kedua ujung stack, yaitu  $\Delta T = T_P - T_D$ , bertambah besar secara cepat seiring dengan ke-naikan suhu ujung panas  $T_P$ . Beberapa saat kemudian kondisi *onset* tercapai; di dalam Gambar 4 hal ini diindikasikan oleh adanya perubahan yang mencolok pada nilai-

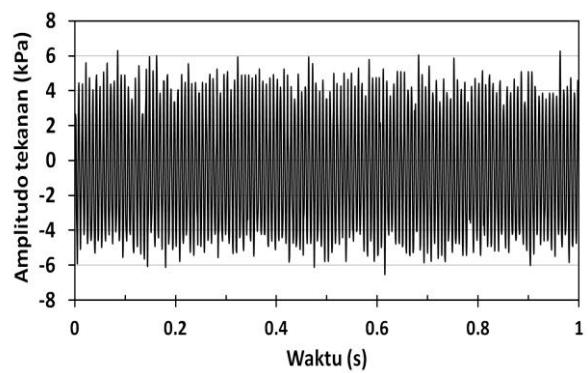
kitar 6 menit. Pada saat *onset*, nilai  $T_{UPR}$  meningkat tajam karena adanya gelombang bunyi yang mengakibatkan kalor yang ter-kumpul di sisi panas *stack* menjadi tersebar cepat ke arah ujung panas resonator yang berada di dekatnya. Selain itu, gelombang bunyi tersebut juga menyebarkan kalor ke arah sisi dingin *stack*, sehingga suhu sisi dingin *stack*  $T_D$  juga meningkat secara men-colok pada saat *onset*. Adanya peningkatan  $T_D$  tersebut selanjutnya (setelah *onset*) menyebabkan beda suhu antara kedua ujung stack  $\Delta T$  hanya dapat meningkat secara lambat, meskipun kalor terus diberikan oleh alat pemanas ke ujung panas stack. Peningkatan  $T_D$  yang cukup besar hingga mencapai 100 °C menunjukkan kurang efektifnya rancangan *AHX* yang digunakan sehingga aliran air melalui *AHX* tidak mampu membawa cukup banyak kalor keluar dari ujung dingin *stack*.

Meskipun bunyi yang dihasilkan tidak ter-dengar dari luar resonator karena resonator tertutup secara cukup rapat, adanya bunyi di dalam resonator dapat dikonfirmasi melalui getaran pada tabung resonator yang dapat dirasakan apabila disentuh dengan jari-jari tangan. Selain itu, kehadiran gelombang bunyi di dalam resonator juga dideteksi dengan menggunakan empat buah transduser tekanan yang dihubungkan dengan sebuah data logger dan komputer, dengan periode *sampling* 1 ms. Sinyal yang diperoleh disimpan dalam doku-men Excel dan dapat diplot kembali sebagaimana ditampilkan oleh Gambar 5(a) untuk kurun waktu 1 detik, sedangkan Gambar 5(b) memperlihatkan potongan sinyal tersebut da-

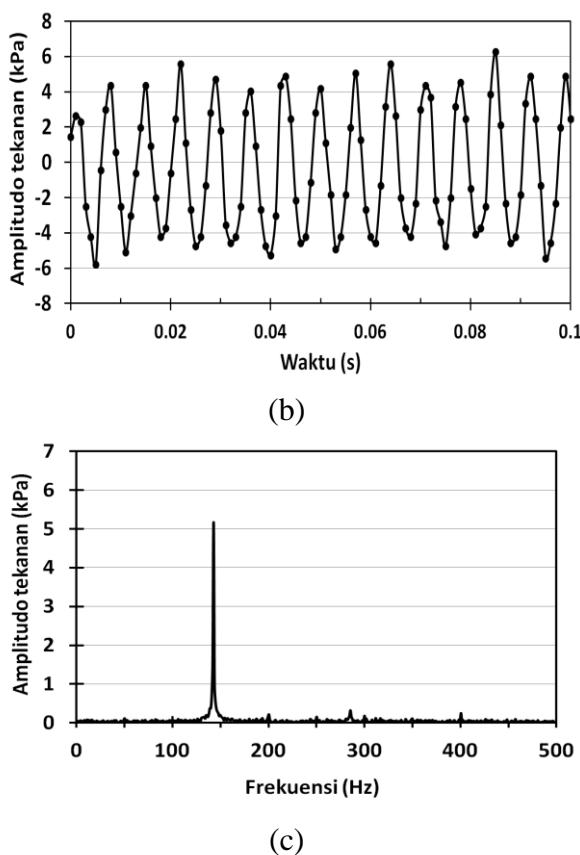


Gambar 4. Hasil pengukuran suhu sebagai fungsi waktu selama 60 menit pengoperasian.  $T_P$  dan  $T_D$  adalah suhu ujung panas dan suhu ujung dingin *stack*,  $\Delta T$  adalah beda suhu antara kedua ujung *stack*,  $T_{UPR}$  adalah suhu ujung panas resonator, dan  $T_R$  adalah suhu ruangan.

nilai  $\Delta T$ ,  $T_{UPR}$ , dan  $T_D$ . Dalam hal ini, diperoleh besar beda suhu *onset* ( $\Delta T$ )<sub>onset</sub> untuk *prime mover* termoakustik ini adalah sekitar 260 °C, sedangkan lama waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan *onset* adalah se-



(a)



Gambar 5. Contoh sinyal osilasi tekanan gelombang bunyi yang telah diperoleh dalam rentang waktu (a) 1 s dan (b) 0,1 s. (c) Spektrum frekuensi yang diperoleh dari (a).

lam rentang waktu 0,1 detik pertama. Selanjutnya, dengan melakukan transformasi Fourier cepat terhadap sinyal dalam Gambar 5(a), sebuah spektrum frekuensi dapat diperoleh, seperti ditunjukkan oleh Gambar 5(c). Dari gambar-gambar tersebut diketahui bahwa gelombang bunyi yang dihasilkan memiliki amplitudo tekanan sekitar 5,1 kPa dan frekuensi 142 Hz. Nilai frekuensi ini sedikit berbeda dengan perkiraan nilai frekuensi resonansi resonator setengah panjang gelombang yang digunakan, yaitu 136 Hz. Adanya perbedaan ini disebabkan oleh kehadiran *stack* dan penukar-penukar kalor di dalam resonator.

Daya akustik ( $\dot{W}_{ak}$ ) yang dihasilkan diukur dan dihitung dengan metode dua sensor [17, 20], yaitu dengan menggunakan persamaan

$$\dot{W}_{ak} \cong \frac{A}{2\omega\rho_m\Delta x} |p_A||p_B| \sin \theta \quad (6)$$

dengan  $p_A$  dan  $p_B$  adalah amplitudo tekanan yang terukur oleh dua buah transduser (sensor) di titik A dan titik B yang terpisah oleh jarak  $\Delta x$ ,  $\theta$  adalah beda fase  $p_A$  mendahului  $p_B$ ,  $A$  adalah luas penampang resonator,  $\omega$  adalah frekuensi anguler gelombang bunyi, dan  $\rho_m$  adalah rapat massa rerata gas kerja. Dengan cara ini, diperoleh besar daya akustik sekitar 5 W. Mengingat bahwa daya listrik input (yaitu daya termal input) yang digunakan untuk mengoperasikan *prime mover* ini adalah sebesar 353 W, maka dalam hal ini nilai efisiensi termal-akustik yang diperoleh adalah 1,4%.

Kinerja *prime mover* ini dapat ditingkatkan lagi apabila gas kerja yang digunakan diganti, sebagai contoh, dengan gas helium atau gas campuran helium-argon yang bertekanan tinggi [15, 17]. Selain itu, optimisasi parameter *stack*, seperti jejari hidrolik, panjang *stack*, dan lokasi *stack* di dalam resonator juga diperlukan untuk dapat memperbaiki kinerja *prime mover* termoakustik ini.

## Kesimpulan

Sebuah *prime mover* termoakustik tipe gelombang tegak telah berhasil dibuat dan diuji dengan baik. Daya termal input minimum yang diperlukan oleh *prime mover* ini adalah 225 W. Dengan menggunakan daya input 353 W diperoleh beda suhu *onset* sebesar 260 °C, dan waktu untuk mencapai kondisi *onset* adalah 6 menit. Gelombang bunyi yang dihasilkan memiliki frekuensi 142 Hz, amplitudo tekanan sekitar 5,1 kPa. Daya akustik yang dihasilkan adalah sekitar 5 W, sehingga diperoleh efisiensi termal-akustik sekitar 1,4%. Beberapa upaya optimasi perlu dilakukan untuk dapat meningkatkan kinerja *prime mover* tersebut.

## Referensi

- [1] R.L. Chen dan S.L. Garret, Solar/heat-driven thermoacoustic engine, J. Acoust. Soc. Am. 103 (1998) 2841.
- [2] J.A. Adeff dan T.J. Hoffler, Design and construction of solar-powered, thermoacous-

- tically driven, thermoacoustic refrigerator, *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2000) L37-L42.
- [3] D.L. Gardner dan C.Q. Howard, Waste-heat-driven thermoacoustic engine and refrigerator, *Proc. of Acoustics* (2009), Australian Acoust. Soc., Adelaide, Australia.
- [4] M.E.H. Tijani, Loudspeaker-driven thermoacoustic refrigeration, Tesis Ph.D. (2001), Technische Universiteit Eindhoven, Belanda.
- [5] G.W. Swift, Analysis and performance of a large thermoacoustic engine, *J. Acoust. Soc. Am.* 92 (1992) 1551-1563.
- [6] S. Backhaus dan G.W. Swift, A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study, *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2000) 3148-3166.
- [7] S. Backhaus, E. Tward dan M. Petach, Traveling-wave thermoacoustic electric generator, *App. Phys. Lett.* 85 (2004) 1085-1087.
- [8] Y. Kitadani, S. Sakamoto, K. Sahashi dan Y. Watanabe, Basic studi for practical use of thermoacoustic electric generation system, *Proc. 20<sup>th</sup> Int'l Congr. Acoust.* (2010), Australian Acoust. Soc., Sidney.
- [9] B. Yu, E.C. Luo, S.F. Li, W. Dai dan Z.H. Wu, Experimental study of a thermoacoustically-driven traveling wave thermoacoustic refrigerator, *Cryogenics* 51 (2011) 49-54.
- [10] P. Saechan, H. Kang, X. Mao dan A.J. Jaworski, Thermoacoustic refrigerator driven by a combustion powered thermoacoustic engine – Demonstrator of device for rural areas of developing countries, *Proc. World Congr. Engineering* (2013), London, UK.
- [11] N.M. Hariharan, P. Sivashanmugan dan S. Kasthurirengan, Studies of performance of thermoacoustic prime mover, *Exp. Heat. Transf.* 28 (2015) 267-281.
- [12] M.G. Normah, A.R. Irfan, K.S. Koh, A. Manet dan Ab.M. Zaki, Investigation of a portable standing wave thermoacoustics engine, *Procedia Engineering* 56 (2013) 829-834.
- [13] X.H. Hao, Y.L. Ju, U. Behera dan S. Kasthurirengan, Influence of working fluid on the performance of a standing-wave thermoacoustic prime mover, *Cryogenics* 51 (2011) 559-561.
- [14] B. Ward, J. Clark, dan G.W. Swift, Design environment for low-amplitude thermo-acoustic energi conversion. DeltaEC version 6.3b11 user guide, LANL, [www.lanl.gov/thermoacoustics/DeltaEC.html](http://www.lanl.gov/thermoacoustics/DeltaEC.html).
- [15] G.W. Swift, Thermoacoustic engines, *J. Acoust. Soc. Am.* 84 (1988) 1145-1180.
- [16] P. Novotny, T. Vit dan J. Lopes, Standing-wave thermoacoustic engines, *EPJ Web of Conferences* 25 (2012) 01061-p1-p10.
- [17] G.W. Swift, Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators, *Acoust. Soc. Am.* (2002), New York, USA.
- [18] T. Yazaki, A. Iwata, T. Maekawa dan A. Tominaga, Traveling wave thermoacoustic engine in a looped tube, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 3128-3131.
- [19] Y. Ueda, T. Kato dan C. Kato, Experimental evaluation of the acoustic properties of stacked-screen regenerators, *J. Acoust. Soc. Am.* 125 (2009) 780-786.
- A.M. Fusco, W.C. Ward and G.W. Swift, Two-sensor power measurements in lossy ducts, *J. Acoust. Soc. Am.* 91 (1992) 2229-2235.