

Pengaruh Jejeri Hidrolik *Stack* terhadap Beda Suhu *Onset* pada *Prime Mover* Termoakustik Gelombang Berdiri

Prastowo Murti^{1*)}, Adhika Widyaparaga¹, Ikhsan Setiawan², Agung Bambang Setio Utomo², Makoto Nohtomi³

¹Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT Universitas Gadjah Mada,
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281, Indonesia

²Jurusan Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara BLS 21 Yogyakarta 55281, Indonesia

³Graduate School of Environment and Energy Engineering, Waseda University,
Nishi-tomita 1011, Honjo-city, Saitama-pref., Japan.

*) prastowomurti@gmail.com

Abstrak

Prime mover termoakustik adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengkonversi panas menjadi kerja dalam bentuk bunyi. Panas yang digunakan dapat berasal dari sumber panas yang tak terpakai dan melimpah seperti insenerasi alat-alat rumah sakit, pabrik industri, geotermal, dan energi surya. Untuk dapat mulai menghasilkan bunyi (kondisi *onset*) dibutuhkan beda suhu minimum antara ujung-ujung *stack* yang disebut $(\Delta T)_{onset}$. Semakin kecil beda suhu *onset* $(\Delta T)_{onset}$ maka suhu sumber panas yang diperlukan semakin rendah. *Stack* merupakan jantung dari *prime mover* termoakustik dan tempat terjadinya osilasi paket gas akibat adanya perbedaan suhu antara kedua sisinya. Pada penelitian ini, *stack* yang digunakan adalah lembaran-lembaran *mesh* (kasa kawat) *stainless-steel* yang tersusun rapat dengan jejeri hidrolik 0,71 mm, 0,59 mm, 0,50 mm, dan 0,34 mm dengan panjang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Dalam penelitian ini, panjang resonator adalah 1,28 m dan udara digunakan sebagai medium dengan tekanan atmosfer. Telah ditemukan bahwa jejeri hidrolik *stack* mempengaruhi beda suhu *onset* ΔT_{onset} pada *prime mover* termoakustik. Jejeri hidrolik optimum pada 0,59 mm. Selain itu, ditemukan juga bahwa *stack* yang lebih panjang membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi *onset* dibandingkan dengan *stack* yang lebih pendek. Untuk mendapatkan ΔT_{onset} lebih rendah dan waktu *onset* lebih cepat, perlu dilakukan penelitian tambahan tentang pengaruh beberapa parameter lain seperti panjang resonator, kalor input dan tekanan gas.

Kata kunci : *prime mover* termoakustik, *Stack mesh stainless steel*, jejeri hidrolik, beda suhu *onset* ΔT_{onset} , waktu *onset*

Abstract

Thermoacoustic prime mover is a device to convert heat into work in the form of sound. The heat used here can be obtained from unused and abundant heat source such as incineration hospital equipment, geothermal, and solar energy. A minimum onset temperature difference ΔT_{onset} between stack ends is needed to produce the sound. Low onset temperature differences are desired when we intend to utilize low quality of heat sources. Stack is the main part of thermoacoustic prime mover in where the gas parcels oscillate due to a large temperature gradient along the stack. The stack used in this research is a pile of stainless-steels wire mesh screen with various hydraulic radius of 0.71 mm, 0.59 mm, 0.50 mm, and 0.34 mm and various stack length of 4 cm, 5 cm, and 6 cm. The length of resonator is 1.28 m and air as the working medium at atmosphere pressure is used to fill the resonator. It is found that the hydraulic radius is affecting the ΔT_{onset} in the thermoacoustic prime mover. Hydraulic radius optimum at 0.59 mm. In addition, it is also found that longer stacks need longer time to reach the onset condition. Investigation on the influences of other parameters, such as resonator length, heat input, and gas pressure, are required in order to have low ΔT_{onset} .

Keywords: thermo-acoustic prime mover, stack mesh stainless steel screen, hydraulic radius, onset Temperature difference ΔT_{onset} , onset time.

1. Pendahuluan

Interaksi termodinamik antara gelombang akustik dan permukaan padat yang memiliki gradien suhu disebut efek termoakustik. *Prime mover* termoakustik memanfaatkan efek termoakustik untuk menghasilkan kerja mekanik

dalam bentuk gelombang bunyi. Gelombang bunyi yang dihasilkan bisa digunakan sebagai *driver* untuk pembangkit listrik atau untuk pendingin termoakustik yang beroperasi tanpa menggunakan refrigeran/medium yang berbahaya bagi lingkungan namun menggunakan gas seperti udara, helium dan lainnya. Dalam *prime mover* termoakustik tidak

ada bagian yang bergerak (*no moving part*) sehingga sederhana, tidak membutuhkan pelumasan, biaya rendah, sedikit perawatan, dan umur pakai panjang. Untuk saat ini, *prime mover* termoakustik masih memiliki nilai efisiensi yang rendah sehingga sumber panas yang digunakan menjadi hal yang krusial. Oleh karena itu diperlukan sumber panas yang tidak terpakai atau sumbernya berlimpah, sebagai contoh panas yang dibuang dari turbin pembangkit, insenerasi alat-alat rumah sakit, tenaga surya, dan masih banyak lagi. kelebihan selanjutnya yaitu alat ini tidak menghasilkan gas CO₂ seperti mesin-mesin konvensional lainnya [1].

Prime mover Termoakustik merupakan alat untuk mengkonversi kalor menjadi gelombang bunyi. *Prime mover* menggunakan aliran kalor dari sisi panas ke sisi dingin untuk menghasilkan bunyi. *Prime mover* membutuhkan gradien suhu yang tinggi untuk menghasilkan bunyi. Gradien suhu sendiri terjadi di bagian yang sering disebut “*stack*”, diletakkan antara sisi suhu tinggi dan sisi suhu rendah dari *prime mover*. Peneliti berusaha untuk mengoptimasi *stack* dari sisi bentuk, harga, dan performa. Perhatian khusus ditujukan kepada *stack* karena ia merupakan jantung dari *prime mover* termoakustik sebagai tempat terjadinya pertukaran energi termal dan akustik. *Stack* yang digunakan merupakan material yang tahan suhu tinggi (untuk *prime mover*) seperti keramik dan logam. *Stack* yang digunakan memiliki geometri berbeda-beda, seperti *stack* pelat sejajar [2], *stack* dari tumpukan kasa kawat baja antikorasi (*stainless-steel wire mesh screen*) [3], dan tumpukan *wool* berbahan baja [4].

Pada penelitian sebelumnya, *stack wire mesh* adalah *stack* yang ideal untuk digunakan dalam penelitian karena murah, mudah didapatkan, dan tahan terhadap suhu tinggi. Selain itu, kawat pada *mesh screen* memberikan konduksi termal lateral yang baik, yang penting dalam memberikan profil suhu lateral yang lebih seragam pada *stack*, sehingga mampu menghasilkan performa *prime mover* termoakustik yang lebih baik. Melihat keunggulan diatas, penelitian ini menggunakan *stack wire mesh screen stainless steel* dengan beberapa varian jejari hidrolik untuk mendapatkan beda suhu onset ΔT_{onset} terkecil.

Ada dua parameter dalam pemilihan *stack* yaitu porositas (ϕ) dan jejari hidrolik (r_h). Porositas adalah bagian dari volume terbuka (rongga) di dalam *stack*. Jejari hidrolik digunakan untuk mengukur ukuran pori-pori dalam medium berpori. Parameter-parameter ini digunakan untuk mengkarakterisasi kinerja sistem termoakustik untuk bermacam-macam jenis *stack*. Untuk *stack* yang terbuat dari *wire mesh screen*, porositas dan jejari hidrolik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\phi = 1 - \frac{\pi n d_{wire}^2}{4} \tag{1}$$

$$r_h = d_{wire} \frac{\phi}{4(1-\phi)} \tag{2}$$

dengan n adalah *mesh number* (banyaknya lubang/opening per inci) dan d_{wire} adalah diameter kawat *mesh* [5].

Kedalaman penetrasi termal (δ_k) adalah jarak difusi kalor melalui gas dalam selang waktu $t = 1/f$, dengan f adalah frekuensi gelombang bunyi [6], dan dapat dinyatakan sebagai

$$\delta_k = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho_m c_p}} \tag{3}$$

dengan k adalah konduktivitas termal gas, ρ_m adalah kerapatan gas merata, dan c_p adalah kalor spesifik pada tekanan konstan per satuan massa gas.

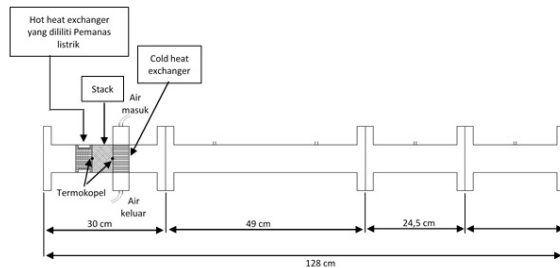
2. Metode Penelitian

Gambar 1 adalah skema *prime mover* termoakustik yang terdiri dari resonator, penukar kalor dingin, penukar kalor panas, dan *stack*. Resonator terbuat dari pipa stainless steel dengan diameter 6,8 cm dan panjang 128 cm. Geometri pipa ini dipilih agar dapat menghasilkan frekuensi 50 – 150 Hz. *Stack* diletakkan diantara penukar kalor panas (*hot heat exchanger*) dan penukar kalor dingin (*cold heat exchanger*). Inti penukar kalor panas liliti dengan kawat pemanas (*heater*) listrik dengan daya maksimum 400 watt. Sementara bagian luar penukar kalor dingin aliran air yang akan membuang kalor dari *stack* ke lingkungan. Kedua penukar kalor terbuat dari tembaga karena memiliki konduktivitas termal yang baik. Gas kerja (*working gas*) yang digunakan adalah udara dengan tekanan atmosfer. *Stack* terbuat dari susunan lembaran *wire mesh screen* dengan nomor *mesh* #10, #12, #14, dan #20 (Gambar 2) berdiameter kawat 0,38 mm; 0,35 mm; 0,32 mm; 0,26 mm. Lembaran-lembaran kasa (*mesh*) disusun secara rapat sehingga membetuk *stack* dengan panjang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) didapatkan jejari hidrolik sebagaimana terangkum dalam Tabel 1.

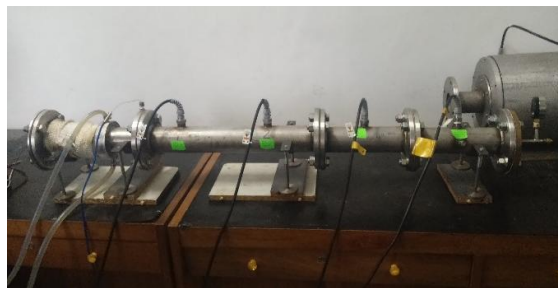
Tabel 1. Parameter-parameter *stack*.

Nomor <i>mesh</i> (inci)	r_h (mm)	δ_k (mm)
10	0,71	0,225585
12	0,59	0,225269
14	0,50	0,224605
20	0,34	0,223530

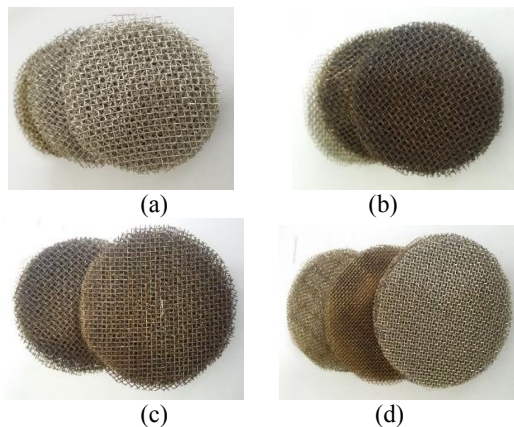
Termokopel tipe-K diletakkan pada kedua sisi *stack* untuk mengukur beda suhu kedua sisi tersebut. Termokopel terhubung dengan unit pengumpul data (*data logger*) buatan Yokogawa dan hasil pengukuran ditampilkan secara *real-time* lewat layar monitor komputer dengan bantuan *software* Yokogawa. Daya kawat pemanas (*heater*) dipantau dengan dua buah multimeter. Pompa digunakan untuk mengalirkan air guna memin-dahkan kalor dari penukar kalor dingin agar tetap terjaga suhunya.



Gambar 1. Skema *prime mover* termoakustik.

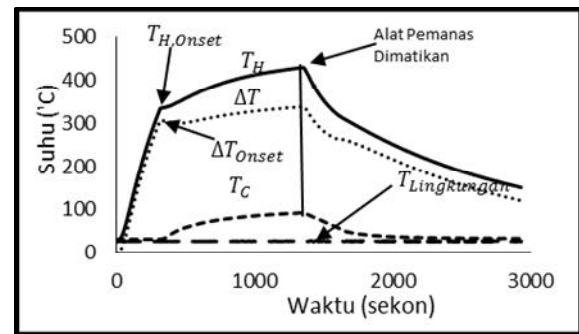


Gambar 2. *Prime mover* termoakustik gelombang berdiri



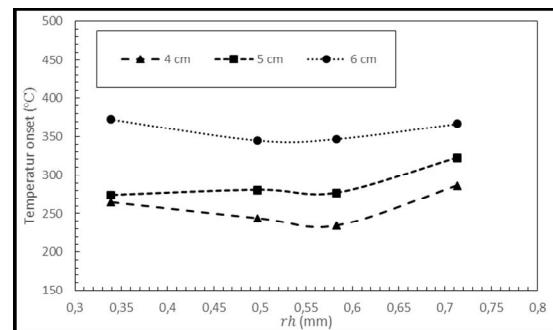
Gambar 3 *stack* jejari hidraulik (a) 0,71 mm, (b) 0,59 mm, (c) 0,50 mm, dan (d) 0,34 mm

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 4. Grafik waktu terhadap suhu *stack* jejari hidraulik 0,50 mm.

Setelah semua peralatan siap, pemanas listrik diaktifkan dengan daya 400 watt. Pengoperasian alat dilakukan hingga muncul bunyi. Setelah itu pemanas listrik dimatikan, namun tetap dilakukan perekaman data hingga bunyi hilang. Bunyi muncul bisa diidentifikasi dengan melihat lekukan pada grafik ($T_{H, Onset}$) (Gambar 4). Ketika pemanas listrik diaktifkan, grafik (T_H) naik secara cepat. Kemudian ketika mencapai puncak, suhu pada (T_H) tidak lagi naik secara cepat namun naik perlahan. Puncak ini adalah suhu *onset*. Sementara itu setelah mencapai puncak kenaikan suhu menjadi lambat. Hal ini dikarenakan kalor pada sisi panas *stack* (T_H) berpindah secara konveksi akibat gelombang bunyi ke sepanjang *stack* sehingga suhu sisi dingin *stack* (T_C) menjadi naik perlahan.



Gambar 5. Grafik jejari hidraulik terhadap ΔT_{Onset}

Hasil uji coba terhadap pengaruh jejari hidraulik terhadap ΔT_{Onset} tampak pada Gambar 5. Pada *stack* dengan panjang 4 cm, ΔT_{Onset} terendah diperoleh pada jejari hidraulik 0,50 – 0,59 mm, begitu pula pada panjang *stack* 5 cm dan 6 cm memiliki ΔT_{Onset} rendah. Selain itu terlihat juga bahwa semakin panjang *stack* cenderung memberikan beda suhu onset ΔT_{Onset} yang semakin tinggi. Melihat hasil tersebut bisa disimpulkan bahwa *stack* dengan jejari hidraulik optimum untuk *prime mover* termoakustik gelombang berdiri berkisar 0,50 – 0,59 mm. Perhitungan secara numerik telah dilakukan Ikhsan dkk. [7] untuk

menentukan pengaruh jejari hidraulik terhadap beda suhu kritis ΔT_{kritik} dengan berbagai varian gas. Dari hasil perhitungan tersebut hasil yang cenderung sama dengan hasil eksperimen ini. Hasil perhitungan numerik menunjukkan penurunan beda suhu kritis ΔT_{kritik} optimum pada rasio jejari hidraulik terhadap kedalaman penetrasi termal (r_h/δ_k) berkisar 2,1 untuk semua varian gas yang diuji. Sementara pada penelitian ini (r_h/δ_k) optimum berkisar 2,2 – 2,5. ΔT_{kritik} adalah beda suhu pada sisi *stack* ketika daya akustik dari *stack* sama dengan nol ($W_{stk} = 0$). Daya akustik pada *prime mover* termoakustik berasal dari resonator, *stack*, dan dua buah *heat exchanger* seperti pada persamaan berikut:

$$W = W_{stk} + W_{HE} + W_{ES} \quad (4)$$

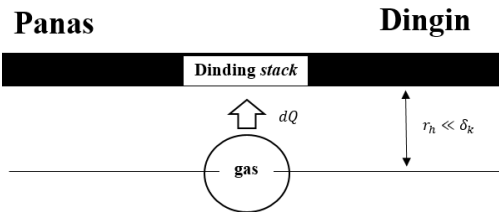
W_{HE} dan W_{ES} adalah disipasi (bernilai negatif) pada *heat exchanger* dan resonator. Nilai W_{stk} bisa negatif atau positif tergantung dari beda suhu dan posisi *stack*. Pada saat beda suhu kritis ΔT_{kritik} nilai W negatif namun seiring bertambahnya beda suhu, nilai W_{stk} menjadi positif sehingga W pun ikut bernilai positif. Pada beda suhu ini dinamakan beda suhu onset ΔT_{onset} . Oleh karena itu nilai beda suhu kritis ΔT_{kritik} akan selalu lebih rendah dibandingkan dengan beda suhu onset ΔT_{onset} namun secara pola akan selalu sama antara ΔT_{kritik} dan ΔT_{onset} [7].

Osilasi paket gas tidak akan terjadi apabila perbedaan suhu antar sisi *stack* tidak mencapai atau melebihi suhu kritis ΔT_{kritik} . Ketika paket gas sudah beresilasi, paket gas perlu memindahkan kalornya ke dinding *stack* untuk menghasilkan efek termoakustik. Namun apabila jarak paket gas dengan dinding *stack* terlalu jauh, maka paket gas hanya beresilasi saja tanpa memindahkan kalornya ke dinding *stack* dan efek termoakustik tidak akan terjadi.

Perpindahan kalor antara gas dan benda padat tergantung dari rasio jejari hidraulik dan kedalaman penetrasi termal. Kontak termal antara fluida kerja dengan benda padat (dinding *stack*) (Gambar 6) diklasifikasikan menjadi tiga [8]:

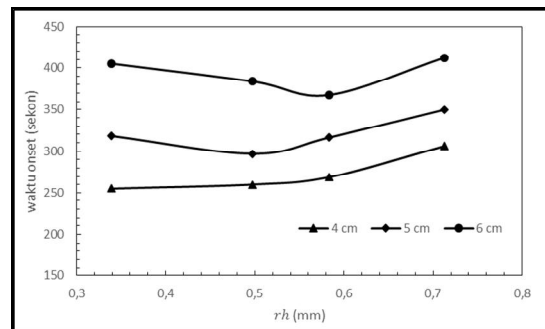
1. Tidak ada kontak termal: jika jejari hidraulik lebih besar dari kedalaman penetrasi termal ($r_h \gg \delta_k$), paket gas atau fluida kerja akan berekspansi dan kompresi adiabatik namun tanpa terjadi perpindahan kalor dengan benda padat (dinding *stack*) disekitarnya.
2. Kontak termal tidak sempurna: jika jejari hidraulik kurang lebih sama dengan kedalaman penetrasi termal ($r_h \approx \delta_k$). Ada jeda waktu untuk gas/fluida bergerak dan perpindahan kalor.
3. Kontak termal sempurna: jika jejari hidraulik lebih kecil dari kedalaman penetrasi termal ($r_h \ll \delta_k$). Perpindahan kalor akan terjadi bersamaan dengan

pergerakan gas. Suhu gas akan selalu sama dengan suhu benda padat (dinding *stack*). Perpindahan kalor antara gas dan benda padat adalah proses reversibel dan memiliki efisiensi tinggi.



Gambar 6. Ilustrasi jarak paket gas dengan dinding *stack*.

Prime mover termoakustik gelombang berdiri bekerja pada kontak termal tidak sempurna. Karena efek ini akan membuat beda fase antara kecepatan dan tekanan akibat dari ada jeda waktu pada proses ekspansi dan kompresi termal pada paket gas. Kriteria gelombang berdiri sendiri memiliki beda fase antara kecepatan dan tekanan $\approx \pi/2$.



Gambar 7. Grafik jejari hidraulik terhadap waktu onset ΔT_{onset}

Hasil lainnya yang diperoleh dari penelitian ini adalah bahwa penambahan panjang *stack* akan mempengaruhi waktu terjadinya bunyi. Gambar 7 memperlihatkan bahwa *stack* dengan panjang 6 cm membutuhkan waktu lebih lama untuk menghasilkan bunyi dibandingkan dengan *stack* lainnya yang lebih pendek. Sebaliknya *stack* dengan panjang 4 cm membutuhkan waktu lebih cepat untuk terjadinya bunyi. Hal ini terjadi karena panjang *stack* mempengaruhi aliran kalor dari sisi panas *stack* ke sisi dingin *stack*. Semakin panjang *stack* maka semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh aliran kalor mencapai sisi berlawanan *stack*.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Hasil pengujian pengaruh jejari hidraulik terhadap beda suhu onset (ΔT_{onset}) menunjukkan bahwa semakin besar nilai jejari hidraulik maka

beda suhu ΔT_{onset} cenderung semakin kecil. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Ikhsan dkk [7] yang memperlihatkan secara numerik beda bahwa beda suhu kritis ΔT_{kritik} cenderung menurun dengan bertambah besarnya nilai jejari hidraulik. Selain itu, nilai jejari hidraulik juga mempengaruhi kinerja alat secara keseluruhan. Ketika pemilihan jejari hidraulik tidak tepat maka perlu kalor yang besar untuk membangkitkan bunyi, hal ini tentu saja mengurangi nilai efisiensi *prime mover* termoakustik itu sendiri.

Panjang *stack* juga mempengaruhi nilai beda suhu onset ΔT_{onset} dan waktu terjadinya bunyi. Terlihat bahwa semakin panjang *stack* maka semakin tinggi beda suhu dan waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan bunyi.

4.2 Saran

Disamping jejari hidraulik, banyak parameter lain yang juga mempengaruhi beda suhu *onset* seperti: jenis gas yang digunakan, panjang pipa resonator, bahan *stack*, kalor input, dan tekanan gas.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada DIKTI yang telah memberikan beasiswa untuk melaksanakan penelitian ini. Terima kasih juga kepada Laboratorium Fisika Atom Inti Jurusan Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan fasilitas untuk melakukan penelitian tesis dan dosen pembimbing dan para laboran yang telah memberi masukan dan bantuan selama penelitian.

Daftar Acuan

- [1] I. Setiawan, A.B.S. Utomo, G. Maruto, Rancang bangun piranti termoakustik sebagai pemompa kalor, Sigma Vol. 10 No.1 (2007), p. 25-33.
- [2] S. Backhaus, G.W. Swift, Fabrication and use of parallel plate regenerators in thermoacoustic engine, Proceedings of the 36th intersociety energy conversion engineering conference, Savannah, Georgia (2001), IECEC2001-CT-41.
- [3] S. Backhaus and G.W. Swift, A thermoacoustic stirling heat engine: detailed study, J. Acoust. Soc. Am.107 (2000), p. 3148-3166.
- [4] P.H. Ceperley, A pistonless stirling engine—the travelling wave heat engine, The Journal of the Acoustical Society of America, 66(5) (1979), p. 1508-1513.
- [5] G.W. Swift, Thermoacoustic: A unifying perspective for some engine and refrigerator, Acoustical Society of America Publication, Los Alamos National Laboratory, (2001).
- [6] G.W. Swift, Thermoacoustic engine, Editor M. J.Crocker, Encyclopedia of acoustic, John Willey & Sons, New York (1997).
- [7] I. Setiawan, M. Katsuta, M. Nohtomi, Numerical study on the effect of working gases on the critical temperature difference of a standing wave thermoacoustic prime mover, Proceeding of The 8th international conference on fluid and thermal energy conversion, Semarang (2013).
- [8] P. Saechan, Application of thermoacoustic technologies for meeting the refrigeration needs of remote and rural communities in developing countries, Ph.D. dissertation, University of Leicester, Leicester (2014).