

ARTIKEL RISET

Penentuan Kondisi Optimum Panjang Pipa Resonator dan Daya *Input* Listrik Terhadap Kinerja *Prime Mover* Termoakustik Gelombang Berdiri

Wahyu Nur Achmadin^{*}, Ikhsan Setiawan dan Agung Bambang Setio Utomo

Abstrak

Telah dilakukan penelitian tentang penentuan kondisi optimum panjang pipa resonator dan daya input terhadap kinerja mesin *prime mover* termoakustik gelombang berdiri. Prinsip *prime mover* termoakustik adalah memindahkan panas dari suhu tinggi ke suhu rendah dan menghasilkan usaha dalam bentuk gelombang bunyi. *prime mover* termoakustik terdiri atas sebuah heater, sebuah pipa resonator, dan sebuah *stack*. *stack* terbuat dari susunan rapat lembaran-lembaran kasa kawat baja antikorosi (wire mesh stainless steel) ukuran #14 sepanjang 5 cm yang kemudian diletakkan 13 cm dari ujung pipa resonator. Pipa resonator terbuat dari *stainless steel* berdiameter 6,8 cm. Heater yang digunakan memiliki diameter 6,8 cm dengan kemampuan daya input listrik maksimal 400 W berada dalam pipa *stainless steel*. Panjang pipa resonator dan daya input listrik divariasi untuk mencari panjang pipa resonator optimum dan daya input listrik optimum. Panjang pipa resonator 155 cm dengan daya input listrik 400 W menghasilkan beda suhu *onset* terkecil dan waktu suhu *onset* terkecil (tercepat) yaitu $(251 \pm 4)^\circ\text{C}$ dan (308 ± 4) s. Panjang pipa resonator 105 cm menghasilkan frekuensi gelombang bunyi terbesar yaitu $(173,7 \pm 0,6)$ Hz. Panjang pipa resonator 180 cm dengan daya input listrik 266 W menghasilkan amplitudo tekanan terbesar yaitu $(4,4 \pm 0,2)$ kPa. Panjang pipa resonator 205 cm dengan daya input listrik 266 W menghasilkan daya bunyi dan efisiensi terbesar yaitu $(4,2 \pm 0,7)$ W dan $(1,6 \pm 0,3)\%$.

kata kunci: kasa kawat; *prime mover*; *stainless steel*; termoakustik

Abstract

A research on the determination optimum condition of pipe resonator length and electric power input on the performance of standing wave thermoacoustic *prime mover* engine has been conducted. The principle of thermoacoustic prime mover is to transfer the heat from high temperature to low temperature and produce a work in the form of sound waves. The thermoacoustic prime mover engine consists of a heater electric, a pipe resonator, and a stack. Stack was made of some stainless wire mesh sheets forming 5 cm long with a size of 5 cm thick by mesh #14 and then placed 13 cm from resonator hot-end. Pipe resonator are made of stainless steel pipes of 6.8 cm diameter. Heater electric was used has a diameter of 6.8 cm and a maximum power capability of 400 W within stainless steel pipes. The length of pipe resonator and the electric power input was varied to find the best result. Pipe resonator which have length of 155 cm with an electric power input of 400 W produce the smallest difference *onset* temperature and the smallest time to reach onset condition (fastest) is $(251 \pm 4)^\circ\text{C}$ and (308 ± 4) s, respectively. Pipe resonator which have length of 105 cm produces the largest sound waves frequency that is (173.7 ± 0.6) Hz. The pipe resonator of 180 cm with an electric power input of 266 W produce the largest pressure amplitude is (4.4 ± 0.2) kPa. The pipe resonator of 205 cm with an electric power input of 266 W produce the largest acoustic power and efficiency is (4.2 ± 0.7) W and $(1.6 \pm 0.3)\%$, respectively.

keywords: mesh; *prime mover*; *stainless steel*; thermoacoustic

^{*}Korespondensi: wahyu.achmadin@gmail.com

Department of Physics, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara PO BOX
BLS 21, 55281 Yogyakarta, Indonesia

Informasi lengkap tentang penulis dapat dilihat pada akhir artikel

1. Pendahuluan

Termoakustik adalah suatu bidang yang mempelajari fenomena fisis dimana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang bunyi, atau sebaliknya,

gelombang bunyi dapat menimbulkan perbedaan suhu. Piranti termoakustik dapat dibagi menjadi beberapa kategori [1]. Salah satunya berdasarkan arah aliran panas, piranti termoakustik dibagi ke dalam dua kelompok yaitu penggerak utama (*prime mover*) dan pendingin (*refrigerator*). *Prime mover* memindahkan panas dari suhu tinggi ke suhu rendah dan menghasilkan usaha dalam bentuk gelombang bunyi. Sebaliknya, pendingin termoakustik memindahkan panas dari suhu rendah ke suhu tinggi dengan menggunakan usaha dari luar sistem berupa gelombang bunyi.

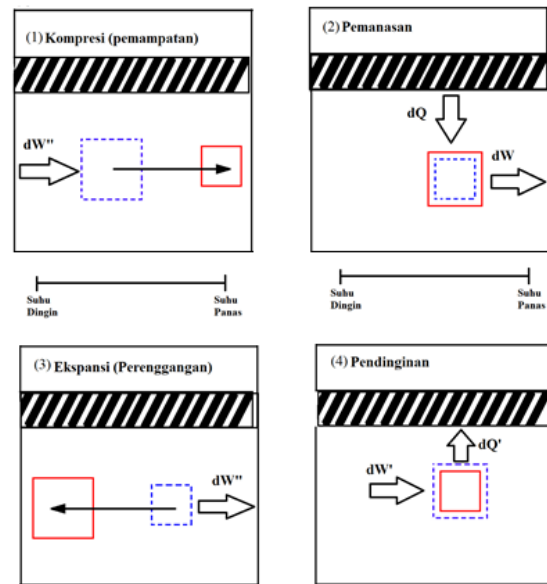
Penelitian mengenai *prime mover* termoakustik gelombang berdiri mulai dilakukan dan dikembangkan di Laboratorium Fisika Atom dan Inti FMIPA UGM. Setiawan telah berhasil membuat dan menguji *prime mover* termoakustik gelombang berdiri dengan menggunakan *stack* bahan stainless steel #14 dan menghasilkan efisiensi sebesar 1,4 % [2]. Murti melanjutkan penelitian tersebut dengan memberikan optimasi jejari hidraulik dan panjang *stack* terhadap *prime mover* termoakustik dan menghasilkan efisiensi terbaik sebesar 1,4 % [3]. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian tersebut. *stack* yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari susunan rapat lembaran-lembaran kasa kawat baja antikatrol (*mesh stainless steel*) dengan ukuran #14 setebal 5 cm. Pemilihan kasa kawat sebagai *stack* dikarenakan bahan ini jumlahnya banyak, harganya terjangkau dan mudah didapatkan di toko. Pipa resonator yang digunakan terbuat dari *stainless steel* dengan diameter pipa 6,8 cm.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Setiawan [2] dan Murti [3], perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang parameter yang mempengaruhi kinerja *prime mover* termoakustik gelombang berdiri. Oleh sebab itu, penulis melakukan penelitian mengenai pengaruh panjang pipa resonator dan pengaruh daya input listrik terhadap kinerja *prime mover* termoakustik.

2. Prinsip Termoakustik

Perpindahan panas sepanjang *stack* terdiri dari empat langkah yaitu dua langkah adiabatik (1 dan 3) dan dua langkah isobarik (2 dan 4) ditunjukkan oleh Gambar 1. Pada siklus tersebut terdapat empat langkah yaitu:

- Langkah (1): Paket gas mengalami proses kompresi (pemampatan) adiabatik sambil bergeser ke kanan sehingga memiliki suhu lebih tinggi dari sebelumnya.
- Langkah (2): Terjadi perpindahan panas dari *stack* menuju paket gas. Suhu paket gas menjadi lebih tinggi dari sebelumnya mengakibatkan volume paket gas semakin memampat dan usaha dW dilakukan pada paket gas.



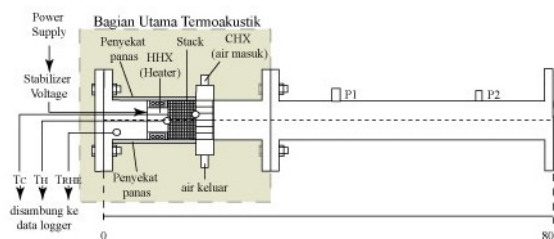
Gambar 1 Siklus mesin *prime mover* termoakustik pada gelombang berdiri

- Langkah (3): Kumpulan paket gas kembali mengalami proses ekspansi (perenggangan) adiabatik sambil bergeser ke kiri. Paket gas kembali ke posisi semula dan mengalami penurunan suhu.
- Langkah (4): Perpindahan panas kembali terjadi, namun kali ini terjadi dari paket gas menuju *stack*. Volume paket gas semakin merenggang dan usaha dW dilakukan pada paket gas. Siklus tersebut dapat berjalan hingga gas keluar dari kanal *stack*.

3. Metodologi Penelitian

Pengambilan data dimulai dengan melakukan persiapan. Data beda suhu direkam oleh perangkat lunak *WE7000 Ethernet*. Daya input listrik dihentikan setelah kenaikan beda suhu sudah tidak signifikan. Perekaman amplitudo tekanan dihentikan tiap beda suhu sedangkan perekaman suhu dihentikan setelah mesin termoakustik sudah tidak menghasilkan bunyi. Langkah ini diulangi untuk panjang pipa 105 cm, 130 cm, 155 cm, 180 cm, dan 205 cm.

Pada tahap akhir adalah dilakukannya analisis pada penentuan beda suhu *onset* (ΔT_{onset}) dan waktu *onset*. Nilai beda suhu diperoleh dari hasil pengurangan antara sisi panas dengan sisi dingin. Analisis selanjutnya pada penelitian ini adalah penentuan nilai frekuensi, amplitudo tekanan, daya bunyi, dan efisiensi sistem. Data yang terekam oleh pressure transducer berupa amplitudo tekanan,



Gambar 2 Skema lengkap mesin *prime mover* termoakustik

sehingga format data yang terekam adalah sumbu-*x* sebagai fungsi waktu dan sumbu-*y* sebagai amplitudo tekanan.

Setelah didapatkan nilai amplitudo pada tiap panjang pipa dan daya input listrik, kemudian daya bunyi dan efisiensi [4]. Pressure transducer yang dipilih untuk menghitung daya bunyi dan efisiensi adalah *pressure transducer* terdekat dari *stack* dan *pressure transducer* terjauh dari *stack* (bagian ujung).

4. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh panjang pipa resonator dan daya input listrik terhadap kinerja *prime mover* termoakustik gelombang berdiri terdiri dari beberapa parameter seperti: suhu *onset*, waktu *onset*, frekuensi, amplitudo tekanan, daya bunyi, dan efisiensi.

4.1. Beda Suhu *onset*

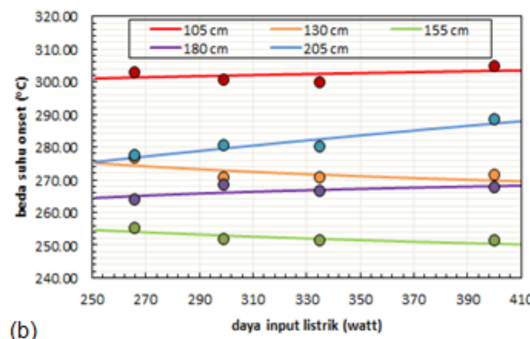
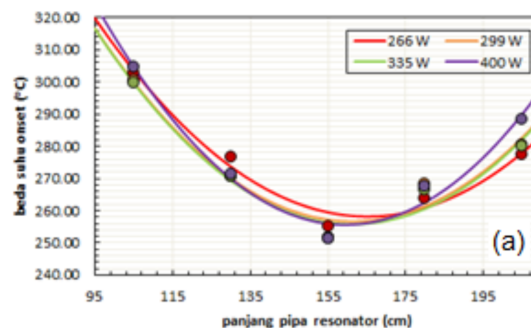
Beda suhu *onset* merupakan beda minimum suhu antara suhu sisi panas dengan suhu sisi dingin dari *stack* yang menyebabkan terjadinya gelombang bunyi pada *prime mover* termoakustik. Penentuan beda suhu *onset* dapat dilakukan dengan mengamati perilaku suhu terhadap waktu.

Pada Gambar 3a, hasil yang diperoleh adalah daya input listrik 400 W memiliki beda suhu *onset* terendah saat panjang pipa resonator 155 cm. Beda suhu *onset* mengalami penurunan pada panjang pipa resonator 105 cm hingga 155 cm, kemudian beda suhu *onset* naik seiring bertambahnya panjang pipa resonator. Pola yang sama terjadi pada daya input listrik 266 W, 299 W, dan 335 W, sehingga dapat dikatakan bahwa pada panjang pipa resonator 155 cm memiliki beda suhu *onset* yang terendah tanpa bergantung pada daya inputnya. Hal ini membuktikan bahwa rasio nilai jejari hidraulik dengan nilai kedalaman penetrasi termal (r_h/δ_k) terhadap beda suhu *onset* yang paling sesuai (optimum) untuk menghasilkan kontak termal adalah panjang pipa resonator 155 cm.

Setiawan telah melakukan perhitungan secara numerik mengenai pengaruh jejari hidraulik terhadap beda suhu *onset* yang menunjukkan rasio (r_h/δ_k)

Tabel 1 Parameter stack dalam panjang pipa resonator berbeda.

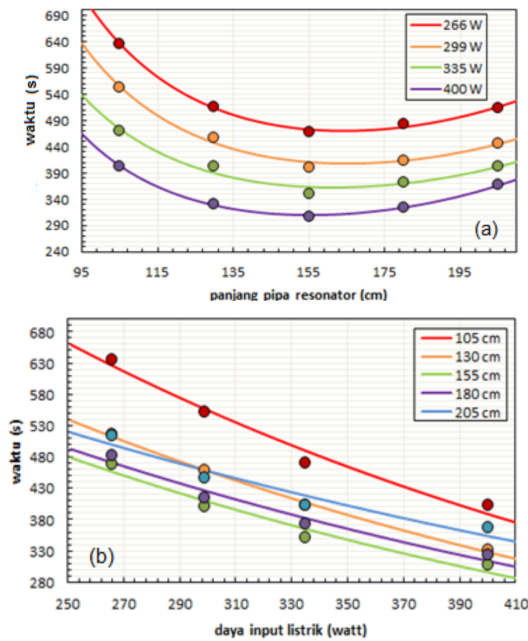
Panjang pipa (cm)	r_h (mm)	δ_k	$\omega\tau$	r_h/δ_k
105	0,497	0,2	6,19	2,49
130	0,497	0,23	4,68	2,16
155	0,497	0,25	3,96	2,0
180	0,497	0,27	3,4	1,84
205	0,497	0,29	2,94	1,71



Gambar 3 Perbandingan beda suhu onset terhadap (a) panjang pipa resonator dan (b) daya input listrik.

optimum bernilai 2,1 untuk semua gas yang diuji [5]. Pada penelitian yang sama, Murti secara eksperimen memperoleh nilai rasio optimum berkisar 2,2 – 2,5 di tiap panjang *stack* [3]. Sementara pada penelitian ini, untuk panjang pipa resonator 155 cm memiliki nilai rasio (r_h/δ_k) bernilai 2, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai rasio (r_h/δ_k) dalam penelitian ini sudah mendekati nilai rasio secara numerik dan eksperimen seperti yang ditampilkan pada Tabel 5.1.

Secara keseluruhan pada Gambar 3a terdapat garis yang berhimpitan dengan daya input listrik pada tiap panjang pipa resonator. Hal tersebut disebabkan adanya kemungkinan bahwa daya input listrik tidak begitu berpengaruh pada hasil beda suhu. Dalam hal ini, berapa pun daya input listrik yang diberikan, selama panjang pipa resonator tidak berubah maka akan menghasilkan nilai beda suhu yang tidak berbeda jauh seperti yang ditampilkan pada Gambar 3b.



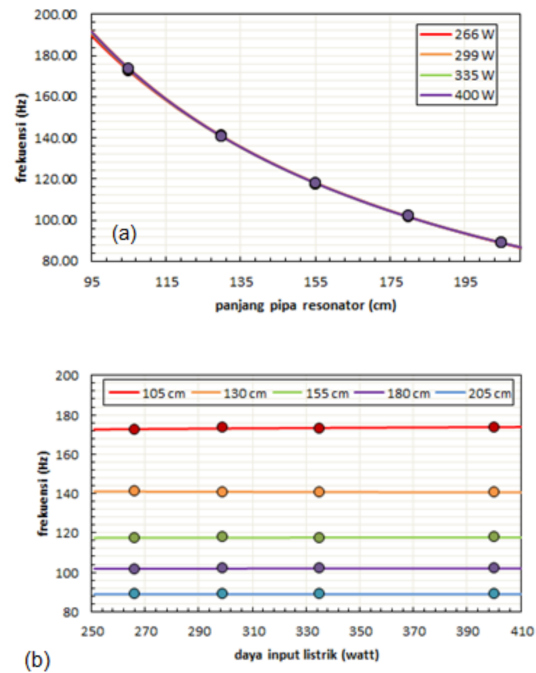
Gambar 4 Hubungan antara waktu suhu onset terhadap (a) panjang pipa resonator dan (b) daya input listrik.

4.2. Waktu Suhu onset

Gambar 4a menampilkan semakin besar daya input listrik yang diberikan terhadap *prime mover* termoakustik maka akan semakin cepat waktu untuk menghasilkan bunyi dan sebaliknya, semakin kecil daya input listrik yang diberikan terhadap mesin *prime mover* termoakustik maka akan semakin lambat waktu yang dihasilkan untuk menghasilkan bunyi.

Hal tersebut disebabkan daya input listrik yang besar akan memberikan aliran panas yang lebih cepat daripada daya input listrik yang rendah sehingga daya input listrik memiliki pengaruh terhadap waktu pada *prime mover* termoakustik. Pada penggunaan pipa 155 cm dengan daya input listrik 400 W memberikan waktu tercepat untuk menghasilkan bunyi dengan waktu *onset* sebesar (308 ± 4) s atau kurang lebih sekitar 5 menit sedangkan pipa 105 cm dengan daya input listrik 266 W memberikan waktu terlama untuk menghasilkan bunyi dengan waktu *onset* sebesar (636 ± 1) s atau 10 menit.

Perbandingan waktu *onset* terhadap panjang pipa resonator ditampilkan pada Gambar 4a. Berdasarkan hasil yang diperoleh, panjang pipa resonator 155 memiliki waktu *onset* tercepat (optimum). Oleh karena nilai waktu *onset* optimum dan nilai beda suhu *onset* optimum berada pada panjang pipa resonator 155 cm, maka dapat disimpulkan kondisi tersebut



Gambar 5 Hubungan antara frekuensi bunyi saat beda suhu 350°C terhadap (a) panjang pipa resonator dan (b) daya input listrik.

disebabkan oleh pengaruh rasio (r_h/δ_k) terhadap *prime mover* termoakustik.

4.3. Frekuensi Bunyi

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum panjang pipa resonator dan daya input listrik terhadap nilai frekuensi bunyi dalam mesin *prime mover* termoakustik. Hasil keluaran dari sensor tekanan adalah amplitudo tekanan, spektrum amplitudo tekanan yang dianalisa FFT (*Fast Fourier Transform*) tersedia di dalam perangkat lunak matlab R2003.

Berdasarkan hasil yang diperoleh bahwa sebesar apapun daya input listrik yang diberikan pada *prime mover* termoakustik dengan panjang pipa tetap, frekuensi gelombang di dalam pipa resonator tidak berubah (Gambar 5b). Hal tersebut dikarenakan frekuensi pada pipa resonator tertutup hanya dipengaruhi oleh kecepatan udara di dalam pipa resonator v dan panjang pipa resonator l . Hal ini sesuai dengan persamaan yang menyatakan bahwa panjang pipa resonator berbanding terbalik dengan nilai frekuensi, yang artinya semakin panjang pipa resonator yang digunakan maka akan semakin rendah nilai frekuensinya dan sebaliknya semakin pendek pipa resonator yang digunakan maka semakin tinggi nilai

frekuensi yang dihasilkan seperti yang ditampilkan oleh Gambar 5a.

4.4. Amplitudo Tekanan

Gambar 6a menampilkan bahwa terdapat penurunan nilai amplitudo tekanan pada panjang pipa 205 cm. Penurunan tersebut terjadi dimungkinkan nilai kontak termal $\omega\tau$ dengan frekuensi yang dihasilkan kurang sesuai sehingga nilai amplitudo tekanan menjadi turun. Dengan adanya penurunan amplitudo tekanan tersebut, amplitudo tekanan optimum terhadap mesin *prime mover* termoakustik dalam penelitian ini dihasilkan oleh panjang pipa 180 cm.

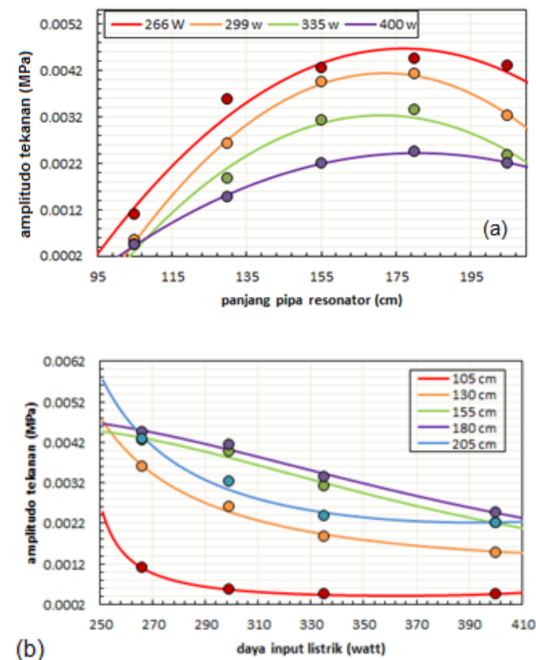
Adapun Gambar 6b menampilkan bahwa daya input listrik yang kecil pada *prime mover* termoakustik menghasilkan nilai amplitudo yang tinggi sedangkan daya input listrik yang besar pada mesin termoakustik menghasilkan nilai amplitudo yang rendah. Besarnya daya input listrik yang diberikan menyebabkan aliran panas dalam mesin termoakustik menjadi lebih cepat yang sehingga pencapaian beda suhu 350°C dapat dilakukan dengan mudah, namun besarnya amplitudo tekanan yang dihasilkan belum maksimal atau masih kecil. Hal ini berkebalikan apabila daya input yang diberikan kecil, kemampuan untuk mencapai beda suhu 350°C sulit untuk didapatkan, namun besarnya amplitudo tekanan yang dihasilkan sudah maksimal atau besar.

Hasil penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang telah dilakukan Biwa [6]. Biwa melakukan penelitian untuk mengetahui kinerja konversi energi termoakustik dua jenis *stack*. Biwa menggunakan *stack* dengan nilai kontak termal sebesar 0,13 dan 3,5. Didapatkan bahwa nilai kontak termal *stack* $\omega\tau$ sebesar 3,5 dengan rasio jejari hidraulik r_h/δ_k sebesar 1,87 merupakan *stack* terbaik dikarenakan mampu menghasilkan amplitudo, daya bunyi, serta efisiensi yang besar [6]. Sementara pada penelitian ini *stack* dengan amplitudo optimum terdapat pada nilai $\omega\tau$ sebesar 3,4 dan rasio (r_h/δ_k) sebesar 1,84.

4.5. Daya Bunyi

Pada Gambar 7a didapatkan bahwa pada panjang pipa resonator 205 cm terdapat kenaikan daya bunyi dan penurunan daya bunyi. Hal ini disebabkan adanya beberapa faktor yang mempengaruhi daya bunyi, yaitu jejari hidraulik *stack*, frekuensi resonansi, amplitudo tekanan, jarak antar dua sensor dan beda fase gelombang dari dua sensor.

Adapun pada Gambar 7b didapatkan bahwa daya input listrik 400 W menghasilkan daya bunyi yang lebih rendah dibandingkan daya input listrik 266 W. Seperti yang telah dipaparkan sebelumnya, bahwa



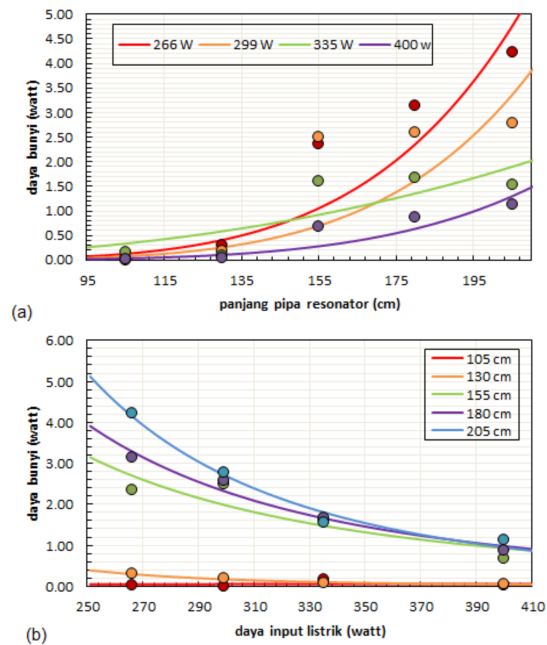
Gambar 6 Hubungan antara amplitudo tekanan saat beda suhu 350°C terhadap (a) panjang pipa resonator dan (b) daya input listrik.

dalam penelitian ini menggunakan beda suhu 350°C sebagai indikator sehingga dapat disimpulkan bahwa pada suhu 350°C daya 400 W masih menghasilkan daya bunyi yang kecil.

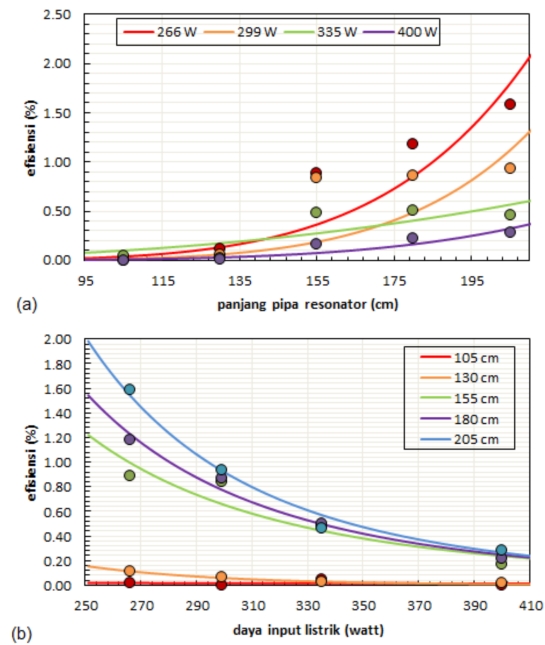
Gambar 7a memperlihatkan adanya penurunan daya bunyi seiring dengan bertambahnya panjang pipa resonator terbatas pada 205 cm. Apabila panjang pipa resonator terus diperpanjang, diduga akan ditemukan panjang pipa resonator optimum yang memberikan daya bunyi optimum seperti yang terjadi pada daya input listrik 299 W dan 335 W. Di atas panjang pipa resonator optimum, daya bunyi akan mengecil karena panjang pipa resonator yang terlalu panjang akan membuat disipasi menjadi terlalu besar sehingga menyebabkan efisiensi berkurang [1]. Pada penelitian ini juga *stack* yang digunakan terbatas yaitu kawat kasa #14 sehingga perlu dibuktikan dengan melakukan penelitian menggunakan panjang pipa resonator yang lebih panjang dari 205 cm serta kawat kasa yang berbeda.

4.6. Efisiensi

Pada Gambar 8a ditunjukkan efisiensi terbesar dengan penggunaan daya input listrik 266 W dan 400 W terdapat pada panjang pipa resonator 205 cm, sementara efisiensi terbesar pada penggunaan daya input listrik 299 W dan 335 W adalah panjang



Gambar 7 Hubungan antara daya bunyi saat beda suhu 350°C terhadap (a) daya input listrik dan (b) panjang pipa resonator.



Gambar 8 Hubungan antara efisiensi saat beda suhu 350°C terhadap (a) daya input listrik dan (b) panjang pipa resonator

pipa resonator 180 cm. Pada Gambar 8b ditunjukkan efisiensi terbesar terdapat pada daya input listrik 266 W sedangkan efisiensi terkecil dihasilkan oleh daya input listrik 400 W. Sehingga dapat disimpulkan bahwa efisiensi optimum saat beda suhu 350°C adalah panjang pipa resonator 205 cm dengan daya input listrik 266 W, yaitu sebesar 1,6%.

Dalam hal ini, penambahan panjang pipa resonator diduga akan membuat kecepatan gas udara di *stack* menjadi berkurang. Nilai dissipasi energi membesar pada medium kerja dengan kecepatan tinggi, sedangkan medium kerja dengan kecepatan rendah akan mengalami dissipasi yang kecil. Nilai dissipasi kecil menandakan energi panas yang digunakan untuk memindahkan panas dari ujung sisi panas ke ujung sisi dingin semakin sedikit terbuang sehingga pemindahan panas berlangsung optimum.

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa: Penentuan kondisi optimum panjang pipa resonator terhadap kinerja mesin *prime mover* termoakustik gelombang berdiri yaitu: Beda suhu *onset* terkecil dan waktu *onset* terkecil dihasilkan oleh panjang pipa resonator 155 cm yaitu masing-masing sebesar $(251 \pm 4)^{\circ}\text{C}$ dan (308 ± 4) s. Frekuensi bunyi tertinggi saat beda suhu 350°C dihasilkan oleh panjang pipa resonator 105 cm yaitu

sebesar $(173,7 \pm 0,6)$ Hz. Amplitudo tekanan terbesar saat beda suhu 350°C dihasilkan oleh panjang pipa resonator 180 cm yaitu sebesar $(4,4 \pm 0,2)$ kPa. Daya bunyi dan efisiensi terbesar saat beda suhu 350°C dihasilkan oleh panjang pipa resonator 205 cm yaitu masing-masing sebesar $(4,2 \pm 0,7)$ W dan $(1,6 \pm 0,3)$ %.

Penentuan kondisi optimum daya input listrik terhadap kinerja mesin *prime mover* termoakustik gelombang berdiri yaitu: Beda suhu *onset* terkecil dan waktu *onset* terkecil dihasilkan oleh daya input listrik 400 W. Frekuensi bunyi saat beda suhu 350°C terhadap semua daya input listrik bernilai sama. Amplitudo tekanan, daya bunyi, dan efisiensi terbesar saat beda suhu 350°C dihasilkan oleh daya input listrik 266 W.

Pustaka

1. Panhuis, P.H.M.W.: Mathematical Aspects of Thermoacoustics
2. Setiawan, I., Murti, P., Achmadin, W.N., Utomo, A.B.S.: Pembuatan dan pengujian mesin penggerak termoakustik tipe gelombang tegak. In: Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV, Banjarmasin (2015)
3. Murti, P.: Studi Eksperimental Pengaruh Jejari Hidrolik Dan Panjang Stack Terhadap Kinerja Prime Mover Termoakustik Gelombang Berdiri
4. Fusco, A.M., Ward, W.C., Swift, G.W.: Two-sensor power measurements in lossy ducts. Journal of the Acoustical Society of America **84**, 2229–2235 (1992)
5. Setiawan, I., Masafumi, K., Makoto, N.: Numerical study on the effect of working gases on the critical temperature difference of a standing wave thermoacoustic prime

mover. In: Proceeding of The 8th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion (FTEC 2013), 8-11 November 2013, Semarang, Indonesia (2013)

6. Biwa, Y. T Tashiro, Mizutani, U.: Experimental demonstration of thermoacoustic energy conversion in a resonator. *Phys Rev E* **69(6)**, 066304–6 (2004)